

Ускорители твердых тел

К.И. Сухачёв, Н.Д. Сёмкин, А.В. Пияков

Самарский государственный аэрокосмический университет им. ак. С.П. Королева
443086, Российская Федерация, г. Самара
Московское шоссе, 34

Рассмотрены различные типы ускорителей макрочастиц, проведен анализ пригодности рассмотренных конструкций для имитации столкновений космических частиц, а так же элементов космического мусора с поверхностью космического аппарата. Показана эволюция ускорителей и основные направления их дальнейшего развития.

Ключевые слова: рельсотрон, катушечный ускоритель, резонансный ускоритель, электроразрядный ускоритель.

Введение

Интерес к разработке и изучению методов высокоскоростного метания твердых тел (единицы – десятки километров в секунду) имеет как чисто научную, так и практическую основу. Соударение тел с высокими скоростями позволяет исследовать поведение веществ в достигаемых при этом экстремальных условиях – высоких давлениях, плотностях и температурах. Проблема изучения высокоскоростного воздействия твердых частиц на материалы космических аппаратов возникла более 50-ти лет назад, однако, вследствие появления новых материалов и все увеличивающейся 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. Актуальность вопроса по защите космических аппаратов от техногенных космических частиц подтверждается регулярными конференциями (например, в 2006 году во Франции состоялся 10 международный симпозиум «Materials in a Space Environment» и 8-ая международная конференция «Protection of Materials and Structures in a Space Environment»; в 2007 году IEEE провела 22-ую международную конференцию «Particle Accelerator Conference», в 2008 году аналогичная конференция проводится 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 собой интерес не только с точки зрения моделирования факторов космической среды, влияющих на материалы конструкций КА, но и с точки зрения подпитки термоядерных реакторов топливом [1; 2]. Для этих целей необходимо обеспечить ускорение частиц твердого дейтерия массой около одного грамма до скорости примерно 10 км/с, что довольно затруднительно из-за их хрупкости.

Для имитации воздействия техногенных частиц на материалы конструкций КА, существуют различные способы ускорения твердых частиц в лабораторных условиях. Тип и конструкция ускорителя определяется поставленной задачей и зависит от диапазона исследуемых масс и скоростей ускоряемых частиц.

1. Типы ускорителей

В зависимости от параметров ускоряемой частицы целесообразно применять ускорители различных типов. Так, для ускорения частиц микронного диапазона, применяют электростатические [3; 4], электродинамические [5–7], импульсные [8] ускорители или их комбинацию [9–11]. Ускорители позволяют получить скорости частиц до сотни километров в секунду, с центром распределения по скоростям 20 км/с. Такие ускорители обладают высокой повторяемостью и контролируемостью эксперимента. Исторически первые электростатические ускорители использовались в качестве источника напряжения гене-

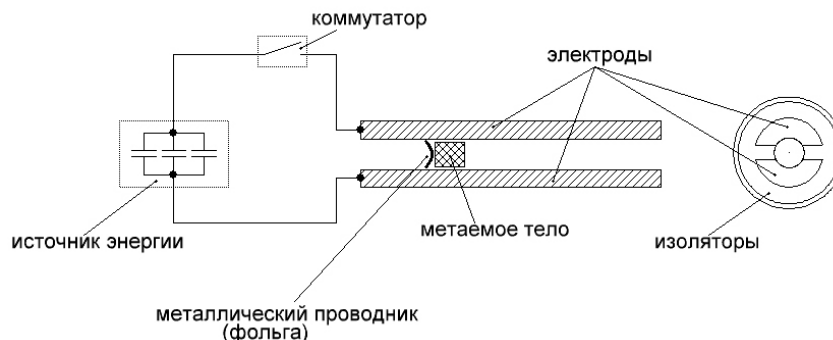


Рис. 1. Схема рельсового ускорителя

ратор Ван-де-Граафа [3]. 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 применения в лабораторном моделировании микрометеоритов до сих пор как в России (НИИЯФ МГУ, Москва, Россия) так и за рубежом (факультет ускорителей ядерного института имени Макса Планка, Хайдельберг, Германия). В линейных электродинамических ускорителях высоковольтный источник заменен относительно низковольтным, и частица получает приращение скорости, пролетая по дрейфовым трубкам напряжение на которых меняет свою полярность синхронно с пролетом частицы внутри трубки. Такая система позволяет получить эквивалентное ускоряющее напряжение в несколько мегавольт. Примеры таких ускорителей приведены в [5–7]. Значительно реже для ускорения частиц микронного диапазона применяют взрывные и лазерные ускорители, что обусловлено невозможностью обеспечения высокой повторяемости эксперимента, а как же сложной и дорогостоящей конструкцией таких ускорителей. Представленные типы ускорителей не подходят для разгона более крупных объектов, для ускорения которых применяют другие типы установок: легкогазовые, взрывные, газоразрядные и электромагнитные ускорители различных принципов действия и конструкций. В данной статье представлен обзор некоторых из них, особое внимание уделено электромагнитным методам ускорения, так как они являются наиболее перспективными в вопросе ускорения макротел до сверхвысоких скоростей.

Очевидно, что для полноценного моделирования воздействий высокоскоростных частиц не-

обходима установка, обладающая не только высокой эффективностью ускорения, необходимой для разгона частицы до космических скоростей, но и максимальным диапазоном параметров ускоряемых объектов: масса, форма, материал. Ускоритель должен обладать высокой повторяемостью значений скоростей частиц.

2. Рельсовые электромагнитные ускорители

Схема рельсотрона приведена на рис. 1 Рельсовый электромагнитный ускоритель в простейшем виде состоит из двух или кратным двум [10] параллельных изолированных друг от друга электродов, к которым через устройство коммутации подключен мощный источник энергии. Как правило, таким источником является батарея импульсных высоковольтных конденсаторов [11], взрывомагнитный или магнитокумулятивный генератор [12; 13], в некоторых случаях используется генератор на химическом топливе [14] или униполярный генератор с индуктивным накопителем [15; 16]. Между электродами находится метаемое тело и металлический проводник, как показано на рисунке, или цельнометаллическое метаемое тело. При замыкании цепи по ней протекает импульсный ток, взрывающий металлический проводник, превращая его в плазму, которая, ускоряясь под действием протекающего в цепи тока, ускоряет и метаемый объект. В случае цельнометаллического ускоряемого тела, ток протекает непосредственно через него, вызывая ускорение.

Первые упоминания о рельсовом электромагнитном ускорителе появились в начале XX века. А. Фшонн-Вилиппи из Франции создатель первого рельсотрона, а так же автор проекта электромагнитного ускорителя с кинетической энергией метаемого тела в 128 МДж и источником питания из 14 униполярных генераторов общей массой маховиков равной 1000 тонн. Но на-

стоящий интерес со стороны экспериментаторов и исследователей к контактным электродинамическим ускорителям стал появляться только в 80-х годах XX века, именно этот период характеризуется появлением большого числа работ по этой тематике. В 1978 г. в статье С. Рейшля и Р. Маршалла был описан электродинамический ускоритель (рельсотрон) питающийся от униполярного генератора с индуктивным накопителем. На этом ускорителе тело массой 2,5 г разогнали до скорости 5,15 км/с [17]. В компании «Вестингауз», (США) на рельсотроне длиной 4 м телу массой 320 г удалось придать скорость 4,2 км/с при величине тока $2,1 \cdot 10^6$ А. В лаборатории Максвелл (США) используя в качестве источника питания конденсаторную батарею энергетической емкостью 32 МДж на рельсотроне длиной 8 м тело массой 640 г разогнали до скорости 4,3 км/с [18]. В ИЭЭ РАН в 1982 г. был создан ускоритель сверхскоростного разгона тел (УСРТ) с диаметром канала 30 мм. Источником питания для ускорителя служила конденсаторная батарея напряжением 10 кВ и энергоемкостью 6 МДж. Ускоритель разгонял тела массой 13,8 г до 5,9 км/с и 300 г до 2,0 км/с КПД ускорителя составляло 23%.

Во время экспериментов исследователи столкнулись с рядом проблем:

- эрозия стартовой зоны канала ускорителя;
- значительные механические нагрузки на рельсы;
- декомпактизация (развал, расслоение) плазменного поршня.

Проводимые исследования и эксперименты показали, что при увеличении скорости разгона тел эрозия материала рельсов тем меньше, чем выше скорость разгона тел, т. е. меньше время воздействия дуги на данный участок рельсов. Влияние эрозии электродов на работу рельсотронных ускорителей твердых тел рассмотрено в [19], где показано, что учет присоединенной за счет эрозии массы существенно ограничивает максимальные скорости метаемого тела. Приведены оценки предельных скоростей для двух механизмов эрозии: 1) при бомбардировке электродов ионным током; 2) от джоулева оплавления электродов, возникающего при превышении критической плотности тока. При втором механизме эрозии предельная скорость v_{\max} тела и время τ , за которое присоединенная масса станет равной массе ускоряемого объекта, находится из уравнений:

$$v_{\max} = \frac{\lambda h}{2\chi R_1}, \quad \tau = \frac{mh}{\chi I_0^2 R_1}, \quad (1)$$

где h – скрытая теплота испарения; R_1 – сопротивление плазменного канала; I_0 – ток в цепи рельсотрона; χ – численный коэффициент, характеризующий электроэрозионную стойкость электродов. Из данных выражений становится ясно, что поиск материалов, обладающих высокой электроэрозионной стойкостью, являющейся важнейшей задачей на пути создания надежных ускорителей, способных осуществлять метание тел со скоростями более 6–7 км/с. В [20] проводились эксперименты по ускорению макрочастиц, качественно подтвердившие выводы о существенном влиянии эрозии электродов на работу ускорителя. В опытах ускорялись частицы массой 0,2 г и 1,3 г. Максимально достигнутая скорость была $v_{\max} = 6$ км/с, однако частицы при этом разрушались. Проблему эрозии частично можно решить, сокращая время воздействия плазмы на электроды, путем увеличения влетной скорости ускоряемого тела. Проводимые исследования и эксперименты показали, что при скорости более 10 км/с эрозия электродов будет практически отсутствовать [21]. Технически эта проблема решается с помощью устройств, обеспечивающих предварительное ускорение тел до момента входа в канал рельсотрона. Изучению физических факторов, ограничивающих возможности рельсовых электромагнитных ускорителей, посвящены работы [20–23]. Анализ общих энергетических соотношений [22] показал, что независимо от формы импульса тока отношение кинетической энергии ускоряемого тела $E_k(t)$ к омическим потерям $E_0(t)$ в предположении, что активное сопротивление цепи R_0 останется постоянным в процессе работы ускорителя, находится из выражения

$$\frac{E_k(t)}{E_0(t)} = \frac{v}{v_x}, \quad (2)$$

где $v_x = 4R_0 / \lambda$ – характеристическая скорость, при которой $E_k(t) = E_0(t)$; λ – погонная индуктивность рельсотрона. При $\lambda = 2,5 \cdot 10^{-7}$ Гн/м, $R_0 = 2,5 \cdot 10^{-3}$ Ом и $R_0 = 5 \cdot 10^{-3}$ Ом (что соответствует типичным условиям эксперимента) $v_x = 40$ и 80 км/с соответственно. Приведенные оценки скорости v_x показывают, что при $v \leq 5$ –10 км/с $E_k(t) \ll E_0(t)$, а эффективность ускорения составит примерно 11 %, что является теоретическим максимальным значением для рельсовых ускорителей классической двух-

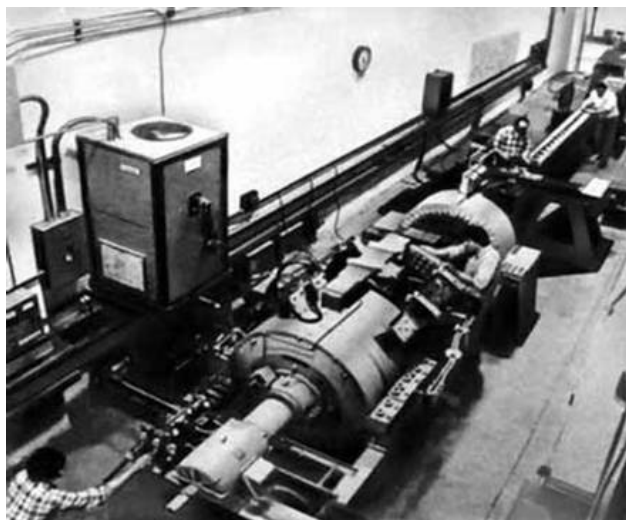


Рис. 2. Образец рельсотронного ускорителя

электродной одноступенчатой конструкции, использующих только электромагнитный принцип ускорения. В работах [24–26] большое внимание было уделено проблеме механической устойчивости канала ускорения рельсотрона, так как создание жесткой рельсовой конструкции при уровне токов свыше 10^6 А является сложной инженерной задачей. Еще одной сложной проблемой на пути достижения сверхвысоких скоростей стало явление развала плазменного поршня за счет поступления продуктов эрозии электродов и самого материала плазмы якоря в заснарядное пространство [27]. Следствием чего является уменьшение величины плотности тока в задней области и появление тока с передней стороны, что снижает ускоряющую силу и эффективность ускорения. Решение этой задачи осуществляется различными способами [28–31]. Так, в работе [30] сообщается о том, что на рельсотроне калибром 13 мм тело массой 0,86 г было ускорено до скорости 7,8 км/с при этом КПД ускорения составил 6,8 %. Авторы пытаются повысить действующее на снаряд давление и эффективность работы ускорителя с помощью введения дополнительного плазмообразующего вещества в заснарядное пространство, в частности воды для создания электро-термо-химического эффекта. Стоит заметить, что большинство современных рельсовых ускорителей являются гибридными установками и кроме силы электромагнитного взаимодействия используют электро-термо-химический эффект. Примером комбинации рельсотрона и электротермического ускорителя может являться образец (рис. 2), построенный в Пикатинском арсенале (город Денвер, штат Колорадо). Обладающий рекорд-

ным КПД, равным 35 % и метающим тела со скоростью более 4,2 км/с.

Рельсовый электромагнитный ускоритель является перспективным устройством для получения сверхвысоких скоростей, при этом он обладает относительно простой конструкцией. Но перечисленные проблемы, возникшие в ходе экспериментов с рельсотронами, на настоящий момент не позволяют получить скорости более 10 км/с. Так же неприятным моментом является необходимость постоянного обслуживания ускорителя в связи с наличием элементов, подверженных воздействию высоких температур и как следствие износу.

3. Катушечные электромагнитные ускорители

К данному типу ускорителей можно отнести два разных по принципу ускорения, но схожих по конструкции устройства. Это ускоритель, взаимодействующий с намагниченными телами и индукционный ускоритель. Пример классической схемы двухступенчатого катушечного ускорителя представлен на рис. 3. Как видно из схемы, катушечный ускоритель конструктивно сложнее рельсотрона и состоит из нескольких последовательных ступеней ускорения. Причем от количества ступеней, зависит эффективность ускорителя и конечная скорость объекта. Каждая ступень включает в себя тяговый соленоид или индуктор, соединенный с собственным накопителем энергии через независимый коммутатор. Соосно расположенные катушки являются источниками однонаправленного бегущего магнитного поля, которое намагничивая ускоряемый объект, втягивает его к центру катушки.

В случае с немагнитным материалом ускоряемого объекта внешнее поле катушки наводит в нем вихревой индукционный ток, поле которого противодействует изменению внешнего, в результате чего происходит выталкивание объекта из катушки.

Существует множество работ по изучению свойств и усовершенствованию конструкции катушечных ускорителей. Одни из первых – это работы академика М.П. Костенко [34; 35], другой ускоритель подобного типа был создан в Принстонском Университете США. Эффективность таких ускорителей возрастает пропорционально скорости объектов и количеству ступеней, а теоретически может достигать 90–95 % при

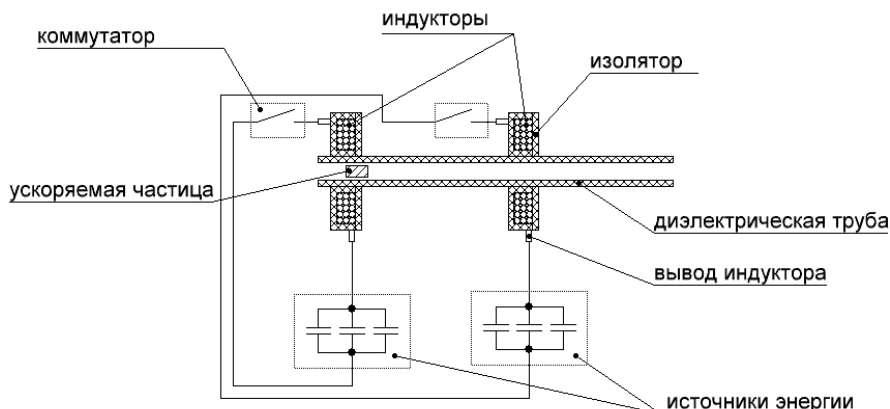


Рис. 3. Двухступенчатый катушечный ускоритель

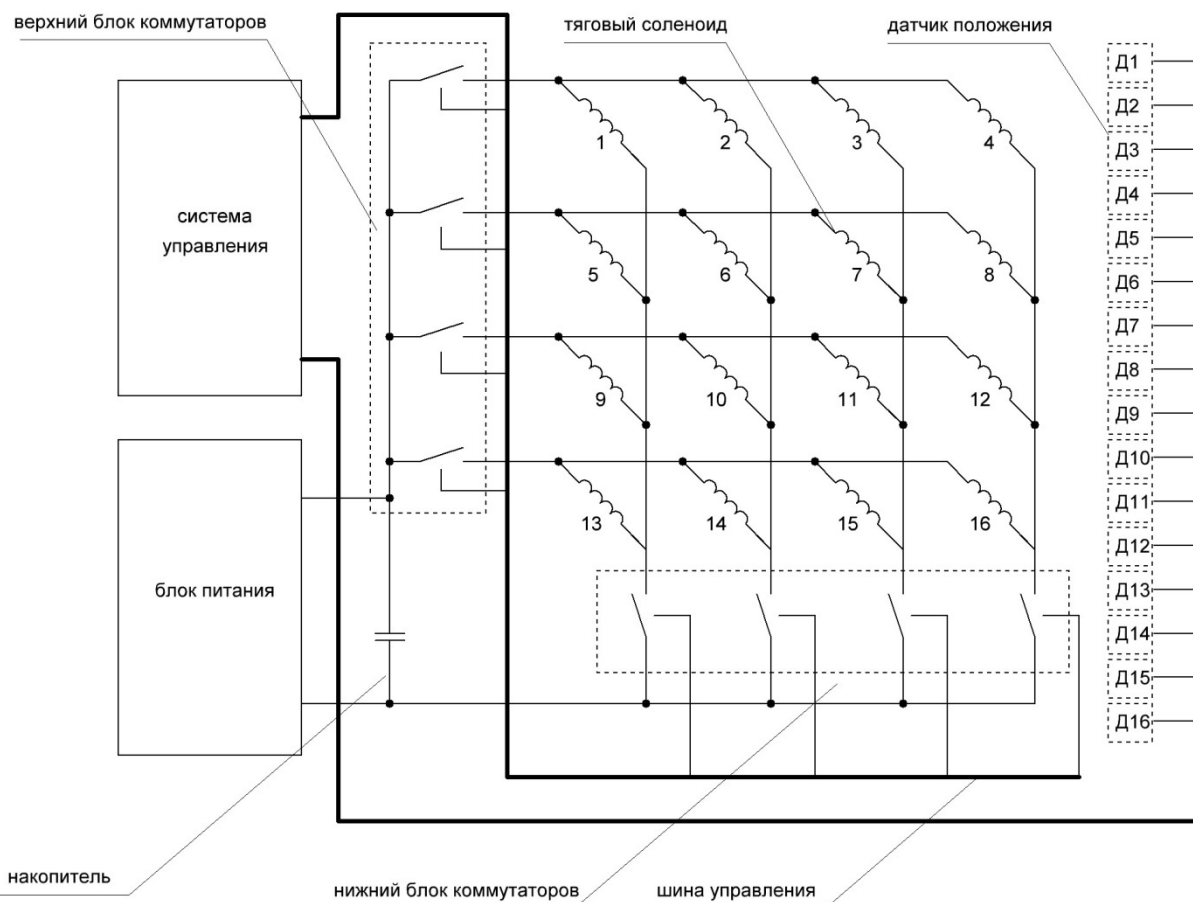


Рис. 4. Катушечный ускоритель с матричным включением соленоидов

скоростях 5–10 км/с [36]. В Бруклинском Политехническом Университете были проведены эксперименты с двухступенчатым индукционным ускорителем с длиной канала 0,6 м. Тело массой 137 г разогнали до скорости 476 м/с при средней величине ускорения $1,9 \cdot 10^5$ м/с². В качестве источника питания применялся мотор-генератор с маховиком массой 35 кг и величиной запасаемой энергии 4 МДж. [37].

Катушечный ускоритель в наибольшей степени подходит для имитации космических соударений аппарата с орбитальными техногенными

и метеоритными частицами. Он позволяет разгонять частицы любой формы, а так же группы частиц одновременно. Перестройка с одного диапазона масс частиц на другой облегчена в сравнении с другими типами электромагнитных ускорителей. Но реальные конструкции таких ускорителей обладают более низким КПД по сравнению с теорией, и на данный момент по скоростным характеристикам катушечные ускорители отстают от других типов электромагнитных ускорителей. За последнее время предложено много способов увеличить эффективность и

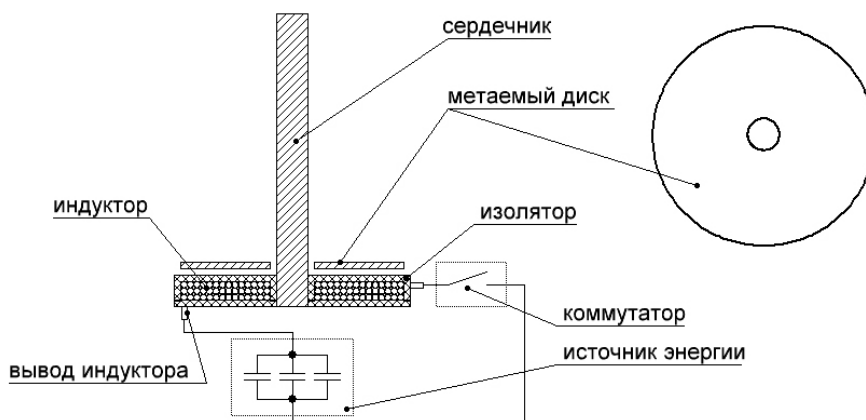


Рис. 5. Индукционный электромагнитный ускоритель Томсона

оптимизировать конструкцию. Можно выделить несколько основных направлений: повышение числа ступеней ускорителя, увеличение напряжения на накопителях, снижение активных потерь и частично использовать энергию самоиндукции при коммутации соленоидов. Так возникла концепция матричного включения соленоидов (рис. 4), которая считается максимально эффективной и перспективной, так как позволяет при большом числе ступеней сократить число коммутаторов.

Стоит отметить, что и матричная система имеет свои недостатки, такие как дополнительные потери в ключевых элементах из-за того, что ток протекает сразу по двум коммутаторам, полумостовая схема предполагает сложную систему управления верхними ключами, а так же при коммутации происходят всплески самоиндукции.

Другая идея повышения эффективности ускорителей заключается в использовании бегущей волны для разгона намагниченных тел, которая рассматривается в работе [39]. Предлагается использовать два накопителя, работающих поочередно, причем самоиндукция, вызванная коммутацией одного из накопителей, рекуперативной цепью направляется в другой накопитель, тем самым подзаряжая его. В качестве тел, используемых для разгона, предлагается применять ферромагнетики. Следует отметить, что применение двух идентичных накопителей существенно увеличивает габариты и стоимость установки. А цепи рекуперации обладают высокими потерями. Дальнейшее усовершенствование принципа бегущей волны представлено в работе [40], в ней приводится расчет и анализ конструкции, использующей резонансный разряд накопителя на согласованную индуктивную нагрузку с последовательным переключением

соленоидов синхронно с полупериодами колебательного процесса. Такой метод имеет множество преимуществ перед классическими многоступенчатыми конструкциями и теоретически по своей эффективности приближается к электродвигателям постоянного тока.

Основные преимущества резонансного ускорителя:

- Использование одного накопителя для нескольких ступеней;
- Максимально полное использование энергии накопителя без применения цепей рекуперации;
- Мягкий режим коммутации при нулевом токе.

В работе [41] рассмотрена возможность применения резонансного катушечного ускорителя для ускорения немагнитных материалов, т. е. переход на индукционный принцип ускорения. В работе [42] рассматриваются преимущества индукционных ускорителей, и приводится анализ индукционных ускорителей с дополнительным питанием якоря (ускоряемого объекта, выполненного в виде соленоида).

Следует отметить, что индукционные ускорители бывают дисковой конструкции, с сердечником (рис. 5, ускоритель Томпсона) и без него.

Помимо индукционных ускорителей существуют и другие, в которых используются механические и дуговые контакты для получения собственного магнитного поля ускоряемых тел. В работе [43] представлены варианты конструкции таких индукционных ускорителей.

В одной из работ [44] рассматриваются достоинства индукционных ускорителей, при этом отмечается:

- отсутствие контакта между ускоряемым телом и каналом;
- возможность ускорения тел широкого диапазона масс;

– хорошая согласованность с источником питания;

– в 100 раз большая ускоряющая сила, чем у рельсотронов, при той же величине тока.

К недостаткам можно отнести:

– сложная система управления, необходимая для создания бегущего электромагнитного поля, меняющегося синхронно с движением объекта по ускорительному тракту;

– сложная конструкция тяговых соленоидов, требующая принятия множества компромиссных решений, необходимых для оптимальной эффективности ускорения;

– достижение высокого КПД только в многоступенчатой конструкции с применением систем предварительно ускорения тел;

– сложный математический аппарат, позволяющий провести моделирование процессов, протекающих в ускорителях данного типа.

Перечисленные недостатки послужили причиной тому, что катушечные ускорители долгое время оставались без внимания экспериментаторов, и по настоящее время остаются одними из самых малоизученных электромагнитных ускорителей твердых тел. По катушечным ускорителям имеется большое количество противоречивых теоретических работ, показывающих их высокие потенциальные возможности, но при этом имеется всего несколько реальных прототипов.

4. Электроразрядные газодинамические ускорители

Ускорение тел в электроразрядных газотермических ускорителях происходит благодаря повышению температуры и давления легкого газа путем введения дополнительной энергии в ограниченный объем посредством мощного электрического разряда. Существуют различные вариации конструкций ускорителей, использующих данный принцип, так например конструкции с предварительным увеличением давления, и без него, или работающих по системе нагрев-сжатие и т. д. На рис. 6 представлена возможная схема электрогазоразрядного ускорителя.

Первое упоминание об использовании электрического разряда в легких газах относится к 1959 г. [45] В этой работе, выполненной в АЕДС, описывается ускоритель с длиной канала ускорения 1 м диаметром 14 мм и сменной разрядной камерой объемом 1 дм³. На этом ускорителе

тело массой 3,8 г разогнали до скорости 3.0 км/с при величине импульсного давления 200 МПа и температуре рабочего газа ~ 5500 К. В качестве рабочего газа использовался гелий при начальном давлении 45 атм. Основным элементом электроразрядных ускорителей, в основном определяющим характеристики подобных ускорителей является источник питания. Для питания ускорителя, описанного в данной работе, использовался источник питания импульсной электроразрядной аэродинамической трубы «Hotshot II», состоящий из униполярного генератора с маховиком и индуктивного накопителя энергии. Устройство работает следующим образом: Электродвигатель (1) мощностью 186 кВт в течение 15 минут разгоняет генератор (2) с маховиком (3) до 3600 об/мин, кинетическая энергия вращающихся масс составляет около 50 МДж; после этого включается система возбуждения, срабатывает замыкатель (5), что приводит к появлению электрического тока в обмотке накопителя (4), энергия магнитного поля которого через 4 с при токе 300 кА достигает 13 МДж; контакт (5) размыкается и после замыкания контактов (6) и (12) ток поступает в электродную систему разрядной камеры (8); срабатывает размыкатель (7), что приводит к возникновению электрической дуги между электродами и энергия индуктивного накопителя, за время горения дуги 10–20 мкс, преобразуется во внутреннюю энергию рабочего газа; давление газа резко возрастает, тело (9) устремляется в измерительную камеру (10), здесь с помощью датчиков-мишеней (11) замеряется скорость тела.

Недостатком этого типа ускорителя является загрязнение рабочего тела (легкого газа) продуктами эрозии электродов и низкое КПД ускорителя. Так во Франко-Германском исследовательском институте Сент-Луис (Франция) на электроразрядном ускорителе с каналом 5,5 мм объемом разрядной камеры 80 см³, работающем на водороде при начальном давлении 14 МПа питающемся от конденсаторной батареи напряжением 16 кВ и энергоемкостью 800 кДж, тело массой 0,1 г удалось разогнать до скорости 7.0 км/с, при этом КПД ускорителя составил 0,3 % [46].

В период с 60 по 80-е годы был накоплен значительный опыт и получены экспериментальные данные при изучении мощных импульсных дуг в газах высокой плотности и процессов теплопередачи «дуга-газ» в водороде и гелии. Также

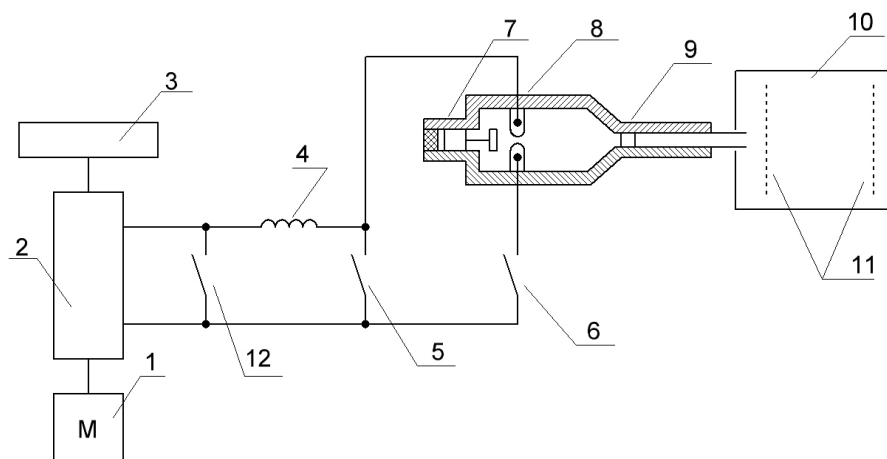


Рис. 6. Электрогазоразрядный ускоритель

источниками данных по изучению характеристик разрядов стали результаты исследований, выполняемых на импульсных электроразрядных аэродинамических трубах, конструкциях, принцип работы разрядных камер и источники питания которых аналогичны конструкциям, принципу работы и источникам питания разрядных камер электроразрядных ускорителей. Полученные данные позволили создать высокоэффективные электроразрядные ускорители. В 1982 был создан ускоритель в ИЭЭ РАН, затем в фирме «GT-Devices Inc.», Александрия США [47].

Результаты экспериментов, представленные в работе [47] выполненные на электроразрядном легкогазовом ускорителе с каналом 16 мм и длиной 5 м, разрядной камерой объемом 244 см³, работающей на гелии при начальном давлении до 100 МПа тело массой 2 г ускорялось до скорости 7,0 км/с, тело массой 10 г до 4,6 км/с и 17 г до скорости 3,5 км/с. При этом максимальный КПД составлял 32 %, коэффициент перевода энергии от конденсаторной батареи емкостью 300 кДж в рабочий газ – около 70 %, а импульсное давление в рабочей камере – 500 МПа.

На основании рассмотренных примеров видно, что электроразрядные легкогазовые ускорители являются высокоэффективными устройствами для проведения исследований в области ускорителей, обладающие довольно высокими скоростными характеристиками. Но для полномасштабной реализации своих возможностей, они в большей степени, чем другие электрические ускорители нуждаются в мощных источниках питания с уровнем запасаемой энергии в десятки мегаджоулей, которые являются очень дорогостоящими устройствами.

5. Комбинированные установки

Во время проведения экспериментов с ускорителями нередко возникает необходимость повысить их основную характеристику – скорость ускоряемых тел.

Причем каждый метод ускорения имеет свой скоростной предел, обусловленный прочностью материалов, из которых изготовлены элементы конструкций установки, особенностями процессов, происходящих во время ускорения, физико-химическими свойствами рабочего тела,

Существуют способы улучшения характеристик электродинамических и газодинамических ускорителей.

Одним из таких способов, применяемых в газодинамических установках является распределенный по длине канала ускорения подвод дополнительной энергии, обеспечивающей повышение средней величины действующего на ускоряемое тело давления, ускоряющей силы и температуры рабочего газа. Такой метод может быть реализован путем размещения вдоль канала ускорения нескольких электроразрядных систем, время срабатывания которых должно быть синхронизировано с моментами прохождения ускоряемого тела координат установки. В 1960 г. на исследовательской базе при Иллинойском технологическом институте на модернизированном легкогазовом ускорителе, питающемся от четырех конденсаторных батарей емкостью 0,8 кДж каждая.

Тело массой 1,6 г при ожидаемой скорости 3,8 км/с, полученной во время проведения серии экспериментов и одинаковых условиях, но без дополнительного ускорения, с ускорением разогнался до скорости 4,25 км/с, что соответствует приросту кинетической энергии тела по-

рядка 1800 Дж и КПД процесса дополнительно ускорения составило 57 % (107).

Подобный метод дополнительного ускорения описывался в работе [48], где тело массой 1,6 г при начальной скорости 4,5 км/с ускорялся до скорости 6,9 км/с, при этом КПД составил около 20 %.

Заключение

Очевидно, что для полноценного моделирования и изучения взаимодействия космических аппаратов с высокоскоростными частицами, микрометеоритами, твердыми макротелами, движущимися с космическими скоростями, а так же с элементами космического мусора, необходимо иметь испытательный комплекс, максимально перекрывающий диапазон масс ускоряемых частиц. Так же необходимо иметь возможность ускорения частиц различного материала и состава. Такой комплекс может представлять интерес не только для космических исследований, но и для изучения физики высокоскоростного удара, и физики экстремальных состояний материалов.

Список литературы

- Манзон Б.М. Ускорение макрочастиц для управляемого термоядерного синтеза // *Успехи физических наук*. 1981. Т. 134. Вып. 2. С. 611–639.
- E.R. Harrison *Phys. Rev. Lett.*, 1963. vol.11, p.535.
- Friichtenicht J.F. Two-million-volt electrostatic accelerator for hypervelocity research // *Rev. Sci. Instrum.* 1962. № 34. С. 209–212.
- Acceleration of micro-particles to hyper velocities by using a 3.75 mv van de graaff accelerator / S.Hasegawa [et al.] // *Lunar and Planetary Science XXX*. P. 1543–1544.
- Friichtenicht J.F. Micrometeoroid simulation using nuclear accelerator techniques // *Nucl. Instrum. Meth.* 1964. № 28. P. 70–78.
- Becker D.G., Friichtenicht J.F. Measurement and interpretation of the luminous efficiencies of iron and copper simulated micrometeors // *Astrophysical Journal*. 1971. V. 166. P. 699–716.
- Variable-frequency radially-stable micrometeoroid accelerator / D.G. Becker [et al.] // *Review of Scientific Instruments*. 1965. V. 36. № 10. P. 1480–1481 (перевод: Ускоритель для микрометеоритов / Д.Г. Беккер [и др.] // *Приборы для научных исследований*. 1965. № 10. С. 86–87).
- Импульсный ускоритель
- Ускоритель высокоскоростных твердых частиц / Н.Д. Семкин [и др.]. Патент на изобретение RUS 2205525 от 30.07.2001.
- Ускоритель высокоскоростных твердых частиц / Н.Д. Семкин [и др.]. Патент на изобретение RUS 2447626 от 13.04.2010.
- Моделирование частиц космического мусора с помощью электромагнитного и электроплазменного ускорителя / Н.Д. Семкин [и др.] // *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2012. Т. 15. № 1. С. 79–85.
- Holland L.D. The DES railgun facility at CEM-UT // *IEEE Transaction on Magnetics*. 1984. V. 20. № 2. P. 256.
- Explosive flux compression for railgun power sources / C.M. Fowler [et al.] // *IEEE Transaction on Magnetics*. 1982. V. 18. № 1. P. 64.
- Анисимов А.Г., Башкатов Ю.Л., Швецов Г.А. Взрывоманитные генераторы для питания рельсотронных ускорителей // *Физика горения и взрыва*. 1986. Т. 22. № 4. С. 76–82.
- Cowan M. Pulsed power for electromagnetic launching // *IEEE Transaction of Magnetics*. 1982. V. 18. № 1. P. 145.
- Pulsed high-voltage and high-current outputs from homopolar energy storage system / R.D. Ford [et al.] // *Review Scientific Instruments*. 1981. V. 52. № 5. P. 694–697.
- Koltern W.J., Jamet F. Electric energy gun technology: status of the French-German-Netherlands programme // *IEEE Transaction on Magnetics*. 1999. V. 35. № 1. P. 25.
- Rashleigh S.C., Marshall R.A. Electromagnetic accelerator of macroparticles to high velocities // *Journal of Applied Physics*. 1978. V. 48. № 4. P. 2540.
- Delsasso L.A. Japanese experiments with the electromagnetic gun // *U.S. Army Technical Intelligence Report Number* 17. 1946.
- Г.А. Швецов, В.М. Титов, Г.А. Анисимов, «Рельсотронные ускорители макрочастиц» Ч.1, Общие характеристики. Доклад на четвертой международной конференции по генерации мегагауссных полей и родственным экспериментам. США, Санта-Фе, 14–17 июля 1986
- Г.А. Швецов, В.М. Титов, Г.А. Анисимов. То же. Ч.2.
- EMET technology for rail launchers / R.J. Barton [et al.] // *IEEE Transaction of Magnetics*. 1986. V. MAG-22. № 6. P. 1410.
- Ю.Л.Башкатов, Г.А. Швецов. ПМТФ, 1987, 2.
- В.П. Чистяков, Г.А. Швецов. ПМТФ, 1987, 6.
- Predicting bore deformation and launcher stresses in railgun / R.F. Davidson [et al.] // *IEEE Transaction of Magnetics*. 1986. V. MAG-22. № 6. P. 1435.
- Kotas J.F., Buderjahn C.A., Littman F.D. A parametric evaluation of railgun augmentation // *IEEE Transaction of Magnetics*. 1986. V. MAG-22. № 6. P. 1573.
- Testing of a high performance, precision-bore railgun / D.R. Peterson [et al.] // *IEEE Transaction of Magnetics*. 1986. V. MAG-22. № 6. P. 1662.
- Marshall R.A. Structure of plasma armature of railgun // *IEEE Transaction of Magnetics*. 1986. V. MAG-22. № 6. P. 1609.

29. N. Kawashima, A. Yamori, M. Kohno, H. Kubo, S. Teii, S. Himeno, Proceedings of 5th European Symposium on Electromagnetic Launch Technology, Toulouse, France, April 10-13, 1995, p.57.
30. Parker J.V. Why plasma armature railguns don't work (and what can be done about it) // IEEE Transaction of Magnetism. 1989. V. 25. № 1. P. 418-424.
31. Postnikov B.V., Fomichev V.P., Fomin V.M. Two-stage railgun pinched plasma armature // 11th EML Symposium. Sain-Louis, France, May 14-17, 2002.
32. A.V. Shurupov, E.F. Lebedev, S.N. Luzganov, V.E. Ostashev, V.P. Polistchuk, V.E. Fortov, "Extreme Regimes of Railgun Launcher with Plasma Armature", 11th EML Symposium, Sain-Louis, France, May 14-17, 2002.
34. Частное сообщение академика М.П. Костенко.
35. Kapiza P., Kostenko M. Electrical impuls generator. British patent № 254,349. Application date: Dec. 30, 1924. Complite accepted: June 20, 1926.
36. Mass driver two: a status report / W.R. Snow [et al.] // IEEE Transaction of Magnetism. 1982. V. 18. № 1. P. 127.
37. On the design of a coilgun as a rapid-fire grenade launcher / M. Liao [et al.] // IEEE Transaction of Magnetism. 1999. V. 35. № 1. P. 148.
39. Васильев Е.В. Многоступенчатый ускоритель с бегущем переключением соленоидов. Патент на изобретение RU 2267074 C1, от 10.05.2008 Бюл.13.
40. Резонансный электромагнитный ускоритель / К.Е. Сухачев [и др.]. Патент на изобретение RU 2466340 C1, от 10.11.2012.
41. Резонансный метод ускорения немагнитных материалов / К.Е. Сухачев [и др.] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. акад. С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2012. № 2. С. 126-131.
42. Spear coilgun / D.A. Bresie [et al.] // IEEE Transaction of Magnetism. 1995. V. 31. № 1. P. 467-472.
43. Weh H., May H. Electromagnetic accelerator in flat coil arrangement. US Patent 5294850. Mar. 15, 1994.
44. Kolm H., Mongean P. Basic principles of coaxial launch technology // IEEE Transaction of Magnetism. 1984. V. 20. № 2. P. 227.
45. Stollenwerk E.J., Perry R.W. Preliminary planning for a hypervelocity aerolistic range at AEPC // AGARDograph. 1959. № 32. P. 200.
46. Лентон К. Высокоскоростное метание // Физика быстропротекающих процессов. Т. 2. М.: Мир, 1971. С. 247.
47. Experiments with a 0,5 megajoule electric gun system for fairing hypervelocity projectiles from plasma cartridges / D.W. Massey [et al.] // Final Report GTD 86-1, GT-Devices, Alexandria, VA, March 1986.
48. Говелл В.Ж., Опп В.Р., Крилл А.М. Использование электрических разрядов в легком газе для увеличения скорости движения модели, сообщаемой ей газовой пушкой // Современная техника аэродинамических исследований при гиперзвуковых скоростях. М.: Машиностроение, 1965. С. 384.

Solid bodies accelerators

K.I. Sukhachev, N.D. Semkin, A.V. Piyakov

Various types of accelerators particulate analysis examined the suitability of designs to simulate collisions of cosmic rays, as well as elements of the space debris from the surface of the spacecraft. The evolution of accelerators and basic directions for their further development.

Keywords: railgun, coil accelerator resonance accelerator, elektro-spark accelerator.
