

УДК. 539.1:621.039

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА УСКОРЕНИЯ ЧАСТИЦ ЕСТЕСТВЕННОГО И ТЕХНОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

© 2015 Н. Д. Сёмкин, К. И. Сухачёв, А. С. Дорофеев

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

Анализируются различные типы ускорителей твёрдых макрочастиц естественного и техногенного происхождения. Рассмотрены конструкции и принципы работы ускорителей микронового и миллиметрового диапазона с центром распределения по скоростям около 20 км/с: электростатические, электродинамические, импульсные, рельсовые электромагнитные, катушечные электромагнитные и электроразрядные газодинамические, комбинированные установки. Проведён обзор легкогазовых, взрывных, газоразрядных и электромагнитных ускорителей с различными принципами действия. Основное внимание уделено электромагнитным методам ускорения, которые наиболее перспективны для ускорения макротел до сверхвысоких скоростей. Указаны достоинства и недостатки различных типов ускорителей твёрдых тел. Проведён анализ пригодности различных конструкций ускорителей для имитации столкновений орбитальных метеоритных частиц и элементов космического мусора с поверхностью космического аппарата. Определены проблемы, возникающие при построении и работе ускорителей различного типа, и приведены решения этих проблем. Приведены результаты экспериментов по ускорению твёрдых тел микронового и миллиметрового диапазона на ускорителях различного типа и методы оптимизации конструкций ускорителей макрочастиц с целью увеличения их КПД и скорости ускоряемого тела. Приведена эволюция ускорителей и основные направления их дальнейшего совершенствования.

Рельсотрон, катушечный ускоритель, резонансный ускоритель, электроразрядный ускоритель, метание частицы естественного и техногенного происхождения, высокоскоростное ускорение твёрдых макрочастиц, ускорители, принцип работы, конструкция, эффективность.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-4-171-191

Введение

Интерес к разработке и изучению методов высокоскоростного метания твёрдых тел (единицы – десятки километров в секунду) имеет как 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 твёрдых частиц на материалы космических аппаратов возникла более 50 лет назад, однако вследствие появления новых материалов и всё увеличивающейся концентрации техногенных высокоскоростных частиц на орбитах Земли остаётся актуальной и по сегодняшний день. Как показала практика, наиболее целесообразным является лабораторное моделирование столкновения ускоренных частиц с различными материалами, так

как при нём 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 2012 году в Голландии состоялся 12-й международный симпозиум «Materials in a Space Environment»; 11-я международная конференция «Protection of Materials and Structures in a Space Environment» состоялась в 2014 году в КНР; в 2014 году IEEE в Германии проведена 5-я международная конференция «Particle Accelerator Conference»; в 2008 году аналогичная конференция проводилась в Канаде «The Ninth International Space Conference Protection of Materials and Structures from the LEO Space Environment».

Техника высокоскоростного метания представляет собой интерес не только с точки зрения моделирования факторов космической среды, влияющих на материалы конструкций космического аппарата (КА), но и с точки зрения подпитки термоядерных реакторов топливом [1, 2]. Для этих целей необходимо обеспечить ускорение частиц твёрдого 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 твёрдых частиц в лабораторных условиях. Тип и конструкция ускорителя определяется поставленной задачей и зависит от диапазона исследуемых масс и скоростей ускоряемых частиц.

Ускорители пылевых частиц

В зависимости от параметров ускоряемой частицы целесообразно применять ускорители различных типов. Так, для ускорения частиц микронного диапазона применяют электростатические [3, 4], электродинамические [5-7] и импульсные [8, 9] ускорители или их комбинацию [10, 11]. Ускорители позволяют получить скорости частиц до сотни километров в секунду с центром распределения по скоростям около 20 км/с. Такие ускорители обладают высокой повторяемостью и контролируемостью эксперимента. Исторически первые электростатические ускорители использовали в качестве источника напряжения генератор Ван-де-Граафа [3]. К достоинствам этого типа ускорителей следует отнести возможность ускорения широкого диапазона частиц по массе и заряду. В более поздних модификациях генератор Ван-де-Граафа был заменён каскадным множителем напряжения, что существенно упростило конструкцию и позволило использовать ускоритель на небольших напряжениях порядка сотен киловольт в прикладных целях. Однако ускорители с генератором Ван-де-Граафа как высоковольтного источника находят

применения в лабораторном моделировании микрометеоритов до сих пор как в России (НИИЯФ МГУ, г. Москва), так и за рубежом (факультет ускорителей ядерного института имени Макса Планка, Хайдельберг, Германия). В линейных электродинамических ускорителях высоковольтный источник заменён относительно низковольтным, и частица получает приращение скорости, пролетая по дрейфовым трубкам, напряжение на которых меняет свою полярность синхронно с пролётом частицы бесполового пространства внутри трубки. Такая система позволяет получить эквивалентное ускоряющее напряжение в несколько мегавольт. Примеры таких ускорителей приведены в [5-7].

В качестве примера рассмотрим комбинированный линейный ускоритель, состоящий из двух блоков: электростатического предускорителя и электродинамического ускорителя [11]. В данной конструкции электростатический предускоритель необходим не только для увеличения конечной скорости частиц, но и для обеспечения оптимальных начальных условий, необходимых для динамической части, и он служит также для измерения удельного заряда частиц. Представленный образец обладает эффективным напряжением 1 МВ и позволяет ускорять пылевые частицы размером около 1 мкм до скорости 15 км/с. Ускоритель входит в состав стенда по комплексному воздействию факторов космической среды на элементы КА: обшивку, солнечные батареи, элементы оптических незащищённых систем. Дальнейшее развитие идеи динамического ускорения представлено в [12], где предложено использовать систему квадруполь для создания циклического ускорителя микронных частиц.

Интересным представителем линейных ускорителей является импульсный ускоритель [8], сочетающий в себе преимущества статического и электродинамического ускорителя. Импульсный ускоритель состоит из нескольких независимых ускорительных каскадов. По устрой-

ству ускорительная секция аналогична конструкции электростатического ускорителя, а разница состоит лишь в том, что напряжение на электроды подаётся в момент влёта частицы в секцию. Напряжение вырабатывается генератором импуль-

сного напряжения (ГИН) по сигналу системы управления, детектирующей влёт частицы в ускорительную секцию. Блок-схема импульсного ускорителя приведена на рис. 1.

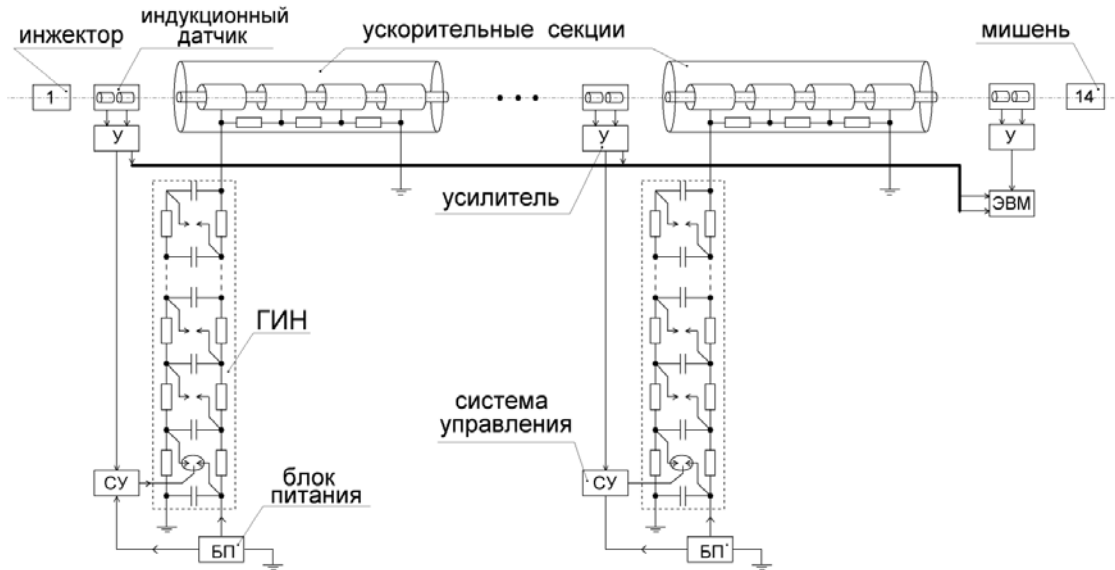


Рис. 1. Импульсный ускоритель пылевых частиц

Неотъемлемой частью любого ускорителя пылевых частиц является инжектор. В инжекторе частица получает заряд, от которого в конечном итоге зависит скорость частицы на выходе ускорителя. Кроме того, инжектор обеспечивает предварительное ускорение частиц до скорости порядка 1 км/с и необходимую плотность потока. Все существующие типы инжекторов можно разделить на два вида: с контактным и бесконтактным способом зарядки частиц. Примеры инжекторов контактного вида приведены в [13-15].

Значительно реже для ускорения частиц микронного диапазона применяют взрывные и лазерные ускорители, что обусловлено невозможностью обеспечения высокой повторяемости эксперимента и сложной, 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 электро-

магнитные ускорители различных принципов действия и конструкций. В статье рассмотрены некоторые из них. Особое внимание уделено электромагнитным методам ускорения, так как они являются наиболее перспективными для ускорения макротел до сверхвысоких скоростей. Очевидно, что для полноценного моделирования воздействий высокоскоростных частиц необходима установка, обладающая не только высокой эффективностью ускорения, необходимой для разгона частицы до космических скоростей, но и максимальным диапазоном параметров ускоряемых объектов: массы, формы, материала. Ускоритель должен обладать и высокой повторяемостью значений скоростей частиц.

Рельсовые электромагнитные ускорители

Схема рельсотрона приведена на рис. 2. Рельсовый электромагнитный ускоритель в простейшем виде состоит из

двух или кратных двум [16] параллельных изолированных друг от друга электродов, к которым через устройство коммутации подключён мощный источник энергии. Как правило, таким источником является батарея импульсных высоковольтных конденсаторов [17], взрывомагнитный или магнитокумулятивный генератор [18, 19], и в некоторых случаях используется генератор на химическом топливе [20] или униполярный генератор с индуктивным накопителем [21, 22]. В рельсовых уско-

рителях между электродами находится метаемое тело и металлический проводник (рис. 2) 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, выталкивает метаемый объект. В случае цельнометаллического ускоряемого тела ток протекает непосредственно через него, вызывая ускорение.

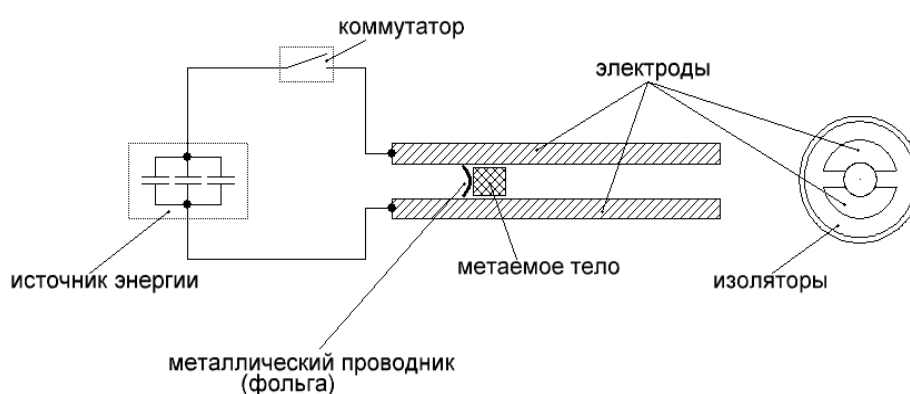


Рис. 2. Схема рельсового ускорителя

Большой интерес со стороны экспериментаторов и исследователей к контактным электродинамическим ускорителям стал появляться в 80-х годах XX века. Именно этот период характеризуется появлением большого числа работ по этой тематике. В [23] описан электродинамический ускоритель (рельсотрон), питающийся от униполярного генератора с индуктивным накопителем. На этом ускорителе металлическое тело массой 2,5 г разогнали до скорости 5,15 км/с. В компании «Вестингауз» (США) на рельсовом электромагнитном ускорителе с длиной рельс 4 м телу массой 320 г удалось придать скорость 4,2 км/с, величина тока при этом составляла $2,1 \cdot 10^6$ А. В лаборатории Максвелл (США), используя в качестве источника питания конденсаторную батарею энергетической ёмкостью 32 МДж, на рельсотроне длиной 8 м тело массой 640 г

разогнали до скорости 4,3 км/с [24]. В ИЭЭ РАН в 1982 г. был создан ускоритель сверхскоростного разгона тел (УСРТ) с диаметром ускорительного канала 30 мм. Источником питания для ускорителя служила конденсаторная батарея напряжением 10 кВ и энергоёмкостью 6 МДж. Ускоритель разгонял тела массой 13,8 г до 5,9 км/с и 300 г – до 2 км/с. КПД ускорителя составлял 23 %.

Во время экспериментов с рельсовыми электромагнитными ускорителями исследователи столкнулись с рядом проблем:

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

Проведённые исследования 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 твёрдых тел рассмотрено в [25], где показано, что учёт присоединённой за счёт 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 присоединённая масса станет равной массе ускоряемого объекта, находится из уравнений:

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

$$\tau = \frac{mh}{\chi I_0^2 R_1}, \quad (2)$$

где h – скрытая теплота испарения; R_1 – сопротивление плазменного канала; I_0 – ток в цепи рельсотрона; χ – численный коэффициент, характеризующий электроэрозионную стойкость электродов; m – масса ускоряемого объекта; λ – погонная индуктивность. Из данных выражений следует, что поиск материалов, обладающих высокой электроэрозионной стойкостью, является важнейшей задачей при создании надёжных ускорителей, способных осуществлять метание тел со скоростями, превышающими 6-7 км/с.

Влияние пинч-эффекта и скоростного скин-эффекта на механизм эрозии рельс рассмотрено в [26], где утверждается, что основным механизмом эрозии рельс является пинч-эффект, который проявляется тем сильнее, чем больше ток, протекающий через динамический контакт якоря и рельс. Суть пинч-эффекта состоит в том, что значительную часть

времени якорь движется на магнитном подвесе, тогда как ток течёт не через периферическую часть исходной контактной поверхности, образованную скоростным скин-эффектом, а через относительно тонкую и непрерывно сжимаемую магнитном полем металлическую перетяжку, которая в конце концов взрывается, порождая углубления на рельсах. При этом ток прекращается, металлический контакт восстанавливается на большей поверхности вследствие упругого расширения материала якоря и рельс, а процесс повторяется вновь. Данный эффект будет наблюдаться до тех пор, пока не установится полностью дуговой характер контакта вследствие уменьшения размеров якоря из-за его эрозии. В дуговом же режиме подключаются описанные выше механизмы эрозии: оплавление материала и ионный ток у поверхностей рельс и проводящего ускоряемого тела. В [27] приведены результаты экспериментов по ускорению макрочастиц, качественно подтвердившие выводы о существенном влиянии эрозии электродов на работу ускорителя. В опытах ускорялись частицы массой 0,2 и 1,3 г, максимальная достигнутая скорость равна 6 км/с, однако частицы при этом разрушались. Проблему эрозии частично можно решить, сокращая время воздействия плазмы на электроды путём увеличения влётной скорости ускоряемого тела. Проведённые исследования показали, что при скорости более 10 км/с эрозия электродов будет практически отсутствовать [28]. 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 [28-30].

Анализ общих энергетических соотношений [29] 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:

$$\frac{E_e(t)}{E_0(t)} = \frac{v}{v_x}, \quad (3)$$

где $v_x = \frac{4R_0}{\lambda}$ – 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. Приведённые оценки скорости v_x показывают, что при $v \leq 5 - 10$ км/с выполняется неравенство: $E_k(t) \ll E_0(t)$, а эффективность ускорения составит 11 %, что является теоретическим максимальным значением для рельсовых ускорителей классической двухэлектродной одноступенчатой конструкции, использующих только электромагнитный принцип ускорения.

Анализ распределения плотности тока по рельсам и якорю проводился в работах [31-33], в которых предложена математическая модель рельсотрона для трёх разных токов через рельсовые электроды и переключку: постоянный, синусоидальный и импульсный. На полученной модели показано влияние неравномерности распределения плотности тока на процесс ускорения и на конечную скорость объекта.

В [34-36] внимание было уделено проблеме механической устойчивости канала ускорения рельсотрона, так как создание жёсткой рельсовой конструкции при уровне токов свыше 10^6 А является сложной инженерной задачей. Ещё одной сложной проблемой на пути достижения сверхвысоких скоростей стало явление развала плазменного поршня за счёт поступления продуктов эрозии электродов и самого материала плазмы якоря в заснарядное пространство [37]. Следствием

этого 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 [38-41]. В работе [40] сообщается о том, что на рельсотроне калибром 13 мм тело массой 0,86 г было ускорено до скорости 7,8 км/с, и при этом КПД ускорения составил 6,8%. Авторы работы пытаются повысить действующее на снаряд давление и эффективность работы ускорителя с помощью введения дополнительного плазмообразующего вещества в заснарядное пространство, в частности воды для создания электротермохимического эффекта.

Отметим, что большинство современных рельсовых ускорителей являются гибридными установками и кроме силы электромагнитного взаимодействия используют электротермохимический эффект. Примером комбинации рельсотрона и электротермического ускорителя может являться образец, построенный в Пикатинском арсенале (город Денвер, штат Колорадо, США). Он обладает рекордным КПД, равным 35 %, и метает тела со скоростью более 4,2 км/с.

Ещё одной сложностью на пути к использованию рельсотрона в стенде по моделированию микрометеоритов и космического мусора является значительное падение эффективности ускорения при уменьшении размеров ускоряемого объекта, а в стенде по имитации столкновения космического аппарата и объекта космического мусора основной интерес представляют высокоскоростные частицы размером меньше 1 мм.

В [42] представлены результаты экспериментов по разгону тел миллиметрового диапазона с помощью рельсовых электромагнитных ускорителей. Применение классической схемы ускорения не привело к положительным результатам: кубик из поликарбоната со сторонами 1 мм и массой 1 г удалось разогнать только до скорости в 1 км/с и при этом наблюда-

лась сильная эрозия рельсовых электродов. Авторам удалось решить эту проблему за счёт введения дополнительного импульсного магнитного поля в межэлектродное пространство. Импульсное магнитное поле создавалось двумя дополни-

тельными парами электродов, расположенных параллельно основным и подключённых к своему накопителю энергии. На рис. 3 приведена схема данного ускорителя.

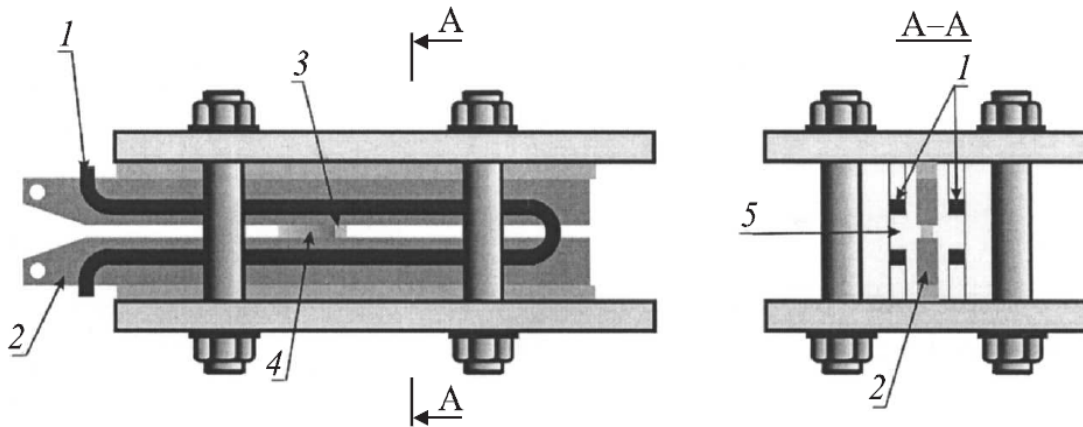


Рис. 3. Схематический чертёж рельсового ускорителя с внешним магнитным полем:
1 — витки для генерации внешнего поля; 2 — рельсовые электроды; 3 — разгоняемое тело;
4 — плазменный поршень; 5 — диэлектрические боковые стенки

Наложение внешнего магнитного поля позволило добиться скоростей порядка 6 км/с для диэлектрических кубиков со сторонами 1 и 2 мм. Удалось сделать теневой снимок ускоряемого объекта при вылете из канала ускорителя, на котором отчётливо видно, что объект после ускорения в канале рельсотрона не разрушился и сохранил свою кубическую форму.

Рельсовый электромагнитный ускоритель, обладая относительно простой конструкцией, является перспективным устройством для получения сверхвысоких скоростей. Но проблемы, возникшие в ходе экспериментов с рельсотронами, в настоящий момент не позволяют получить скорости более 10 км/с. Недостатком таких ускорителей является и необходимость постоянного их обслуживания в связи с наличием элементов, подверженных воздействию высоких температур и, как следствие, износу.

Катушечные электромагнитные ускорители

К данному типу ускорителей можно отнести два схожих по конструкции устройства, использующих разные принципы ускорения. Первый — ускоритель, взаимодействующий с намагниченными телами, а второй — индукционный ускоритель. Пример классической схемы двухступенчатого катушечного ускорителя представлен на рис. 4. Как видно из схемы, катушечный ускоритель конструктивно сложнее рельсотрона и состоит из нескольких последовательных ступеней ускорения, от числа которых зависит его эффективность и конечная скорость разгоняемого объекта. Каждая ступень включает в себя тяговый соленоид или индуктор, соединённый 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.

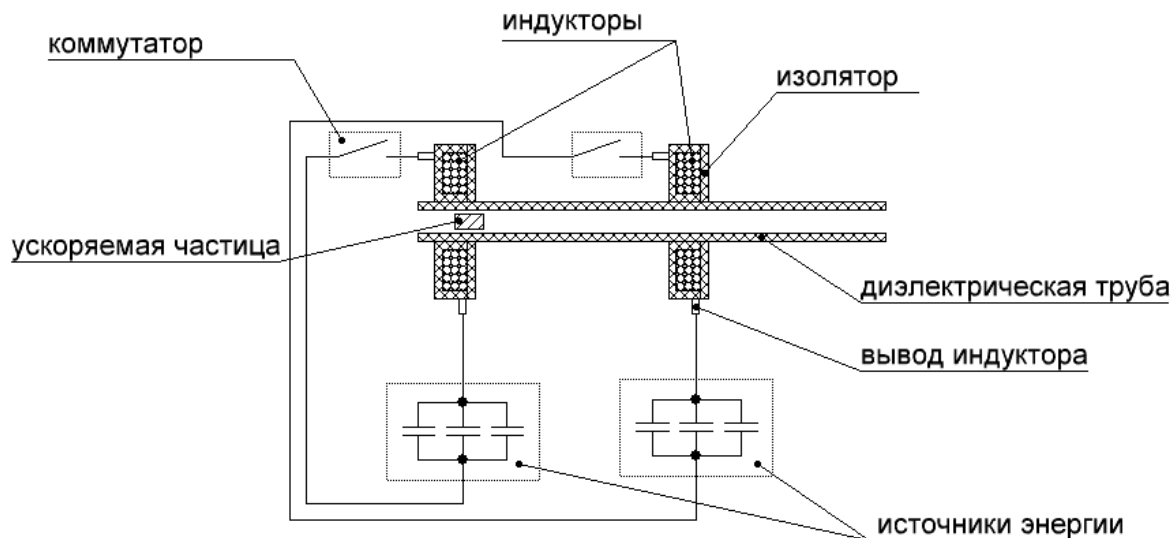


Рис. 4. Двухступенчатый катушечный ускоритель

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

Существует большое количество работ, посвящённых изучению свойств и усовершенствованию конструкции катушечных ускорителей, и одними из первых были работы [43, 44]. Эффективность таких ускорителей возрастает пропорционально скорости объектов и количеству ступеней и теоретически может достигать 90-95 % при скоростях 5-10 км/с [45]. В Бруклинском политехническом университете (США) 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 [45].

Катушечный ускоритель в наибольшей степени подходит для имитации космических соударений аппарата с орби-

тальными техногенными и метеоритными частицами. Он позволяет разгонять частицы любой формы и группы частиц одновременно. Перестройка с одного диапазона масс частиц на другой облегчена по сравнению с другими типами электромагнитных ускорителей. Но реальные конструкции таких ускорителей обладают более низким КПД по сравнению с теоретическими значениями, и в настоящее время катушечные ускорители отстают от других типов электромагнитных ускорителей по скоростным характеристикам.

Предложено много способов увеличить эффективность и оптимизировать конструкцию катушечных ускорителей. Среди них: повышение числа ступеней ускорителя, увеличение напряжения на накопителях, снижение активных потерь и частичное использование энергии самоиндукции при коммутации соленоидов. Так возникла концепция матричного включения соленоидов (рис. 5), которая считается максимально эффективной и перспективной, так как позволяет при большом числе ступеней сократить число коммутаторов.

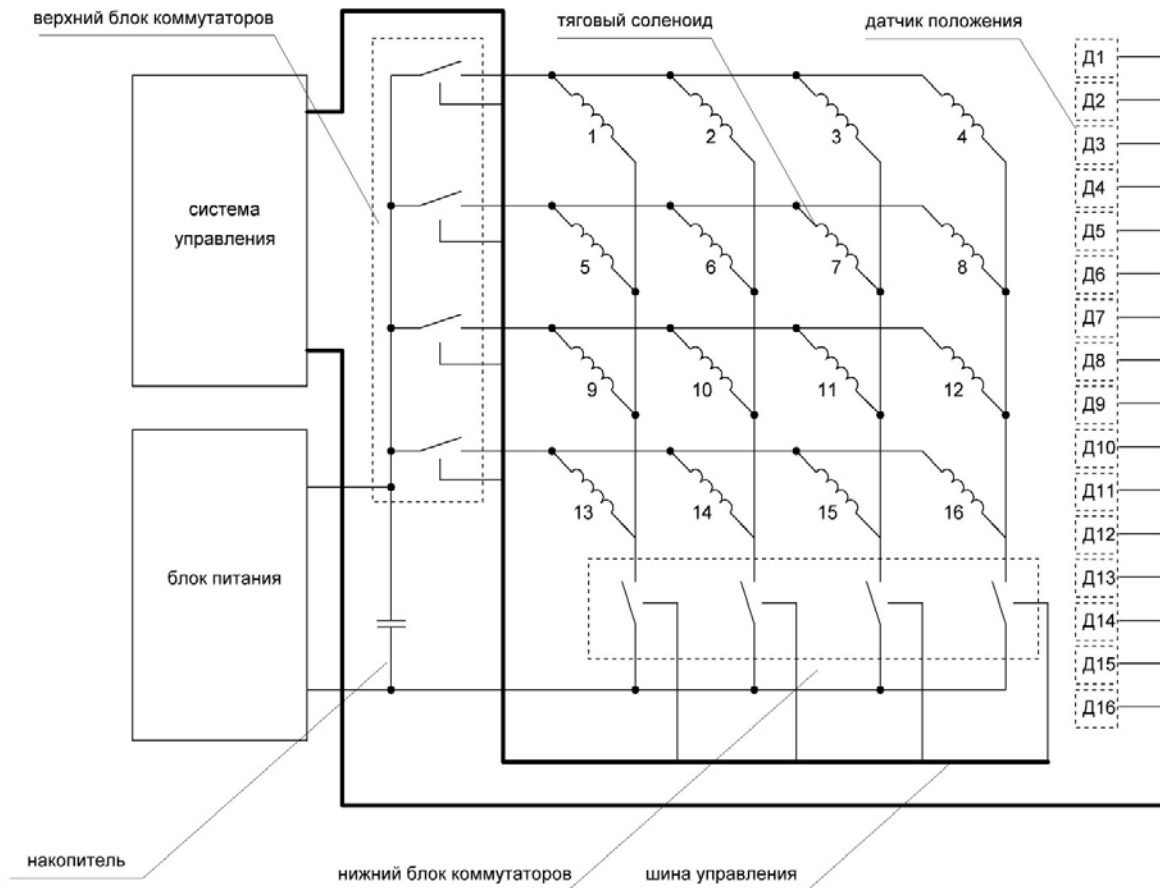


Рис. 5. Катушечный ускоритель с матричным включением соленоидов

Но 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 при коммутации происходят всплески самоиндукции.

Другая идея повышения эффективности ускорителей заключается в использовании бегущей волны для разгона намагниченных тел [47]. Предлагается использовать два накопителя, работающих поочередно. Самоиндукция, вызванная коммутацией одного из накопителей, рекуперативной цепью направляется в другой накопитель и подзаряжает его. В качестве тел, используемых для разгона, предлагается применять ферромагнетики. Однако применение двух идентичных накопителей существенно увеличивает габари-

ты и стоимость установки, а цепи рекуперации обладают высокими потерями.

Дальнейшее усовершенствование принципа бегущей волны представлено в [48, 49]. Приведён расчёт и анализ конструкции, использующей резонансный разряд накопителя на согласованную индуктивную нагрузку с последовательным переключением соленоидов синхронно с полупериодами колебательного процесса. Такой метод имеет преимущества перед классическими многоступенчатыми конструкциями и теоретически по своей эффективности приближается к электродвигателям постоянного тока.

Отметим 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 [50] приведены предельные теоретические возможности катушечных ускорителей, в том числе и для резонансного электромагнитного ускорителя, взаимодействующих с ферромагнитными телами. Сделан вывод о необходимости большого числа ступеней для достижения высоких скоростей метаемого тела. Это связано с невозможностью получения высокого приращения скорости метаемого тела, приходящегося на одну ступень катушечного ускорителя, за счёт приращения кинетической энергии тела одной ступенью.

Данный эффект объясняется зависимостью ускоряющей силы, действующей на объект, не от абсолютной величины магнитного поля, а от его неоднородности по направлению движения.

В [51] рассмотрена возможность применения резонансного катушечного ускорителя для ускорения немагнитных материалов, т.е. переход на индукционный принцип ускорения. В [52] рассматриваются преимущества индукционных ускорителей и приводится анализ индукционных ускорителей с дополнительным питанием якоря (ускоряемого объекта, выполненного в виде соленоида).

Помимо индукционных существуют ускорители, в которых используются механические и дуговые контакты для получения собственного магнитного поля ускоряемых тел. В [53] представлены варианты конструкции таких индукционных ускорителей, а в [54] отмечены следующие их достоинства:

- отсутствие контакта между ускоряемым телом и каналом;
- возможность ускорения тел с широким диапазоном масс;
- хорошая согласованность с источником питания;

- ускоряющая сила в 100 раз больше, чем у рельсотронов, при той же величине тока.

Имеются и недостатки:

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

- сложная конструкция тяговых соленоидов, требующая принятия компромиссных решений, необходимых для обеспечения эффективности ускорения;

- достижение высокого КПД возможно только в многоступенчатой конструкции с применением систем предварительного ускорения тел.

Эти недостатки объясняют, почему катушечные ускорители долгое время оставались без внимания экспериментаторов и по настоящее время остаются одними из самых малоизученных электромагнитных ускорителей твёрдых тел. Имеется большое количество теоретических работ, показывающих высокие потенциальные возможности катушечных ускорителей, но при этом имеется всего несколько их реальных прототипов.

Электроразрядные газодинамические ускорители

Ускорение тел в электроразрядных газотермических ускорителях происходит благодаря повышению температуры и давления газа с небольшой атомной массой (водород, гелий) путём введения дополнительной энергии в ограниченный объём посредством мощного электрического разряда. Существуют различные варианты конструкций ускорителей, использующих данный принцип: конструкции с предварительным увеличением давления и без него; конструкции, работающие по системе нагрев - сжатие и т.д. На рис.6 представлена возможная схема электрогазоразрядного ускорителя.

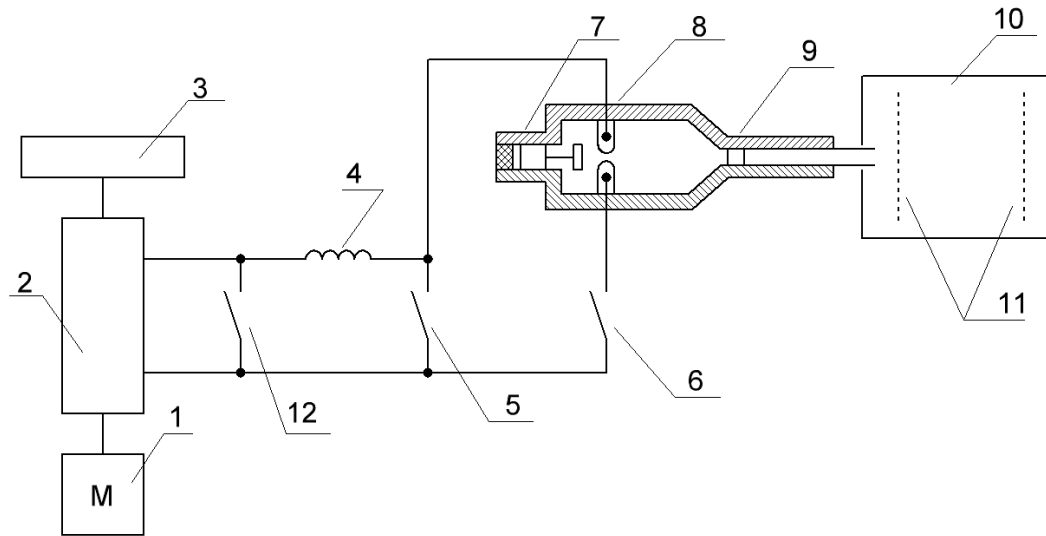


Рис. 6. Электрогазоразрядный ускоритель

Первое упоминание об использовании электрического разряда в лёгких газах имеется в [55]. В этой работе описывается ускоритель с длиной канала ускорения 1 м диаметром 14 мм и сменной разрядной камерой объёмом 1 дм³. На этом ускорителе тело массой 3,8 г разогнали до скорости 3 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 их характеристики, является источник питания. Для питания ускорителя использовался источник питания импульсной электроразрядной аэродинамической трубы «Hotshot II», состоящий из униполярного генератора с маховиком и индуктивного накопителя энергии. Устройство (рис. 6) работает следующим образом. Электродвигатель 1 мощностью 186 кВт в течение 15 минут разгоняет генератор 2 с маховиком 3 до 3600 об/мин, и кинетическая энергия вращающихся масс составляет около 50 МДж. После этого включается система возбуждения, срабатывает контакт 5, что приводит к появлению электрического тока в обмотке накопите-

ля 4, энергия магнитного поля которого через 4 секунды 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. 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, в которой с помощью датчиков – мишеней 11 замеряется скорость тела.

Недостатком этого типа ускорителя является загрязнение рабочего тела (лёгкого газа) продуктами эрозии электродов и низкое КПД ускорителя. Во Франко-Германском исследовательском институте Сент-Луис (Франция) на электроразрядном ускорителе с каналом 5,5 мм и объёмом разрядной камеры 80 см³, работающем на водороде при давлении 14 МПа, питающемся от конденсаторной батареи напряжением 16 кВ и энергоёмкостью 800 кДж, тело массой 0,1 г удалось разогнать до скорости 7 км/с и при этом КПД ускорителя составил 0,3 % [56].

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 источниками данных по изучению характеристик разрядов стали результаты исследований, выполняемых на импульсных электроразрядных аэродинамических трубах, 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 г. был создан ускоритель в ИЭЭ РАН (СССР), затем в фирме «GT-Devices Inc.» (Александрия, США) [57].

В [57] представлены результаты экспериментов, выполненных на электроразрядном легкогазовом ускорителе с каналом 16 мм и длиной 5 м, разрядной камерой объёмом 244 см³, работающей на гелии при начальном давлении до 100 МПа. Тело массой 2 г ускорялось до скорости 7 км/с, массой 10 г – до 4,6 км/с и массой 17 г – до 3,5 км/с. При этом максимальный КПД составлял 32 %, коэффициент перевода энергии от конденсаторной батареи энергоёмкостью 300 кДж в рабочий газ равен 70 %, а импульсное давление в рабочей камере равно 500 МПа.

Рассмотренные примеры показывают, что электроразрядные легкогазовые ускорители являются высокоэффективными устройствами для проведения исследований и обладают довольно высокими скоростными характеристиками. Но для полной 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 весьма дорогостоящими устройствами.

Комбинированные установки

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

Каждый метод ускорения имеет свой скоростной предел, обусловленный прочностью материалов, из которых изготовлены элементы конструкции установки; особенностями процессов, происходящих во время ускорения; физико-химическими свойствами рабочего тела.

Существуют различные способы улучшения характеристик электродинамических и газодинамических ускорителей.

Одним из таких способов, применяемых в газодинамических установках, является распределённый 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 путём размещения вдоль канала ускорения нескольких электроразрядных систем, время срабатывания которых должно быть синхронизировано с моментами прохождения ускоряемого тела координат установки. На исследовательской базе при Иллинойском технологическом институте (США) на легкогазовом ускорителе, питающемся от четырёх конденсаторных батарей ёмкостью 0,8 кДж каждая, тело массой 1 г при ожидаемой скорости 3,8 км/с, полученной без дополнительного ускорения, при дополнительном ускорении разогналось до скорости 4,25 км/с, что соответствует приросту кинетической энергии тела порядка 1800 Дж. КПД дополнительного ускорения составил 57 % [58]. Данный метод дополнительного ускорения описывается в [59], где тело массой 1,6 г при начальной скорости 4,5 км/с с применением методики дополнительного ускорения удалось разогнать до 6,9 км/с, и общий КПД установки составил 20 %.

Другим примером комбинированного ускорителя является система, описан-

ная в [60, 61]. В установке одновременно используются электротермический и индукционный механизмы ускорения объекта. Ускоритель позволяет разгонять тела массой до 80 г со скоростями порядка 1 км/с, при этом КПД составляет 28 %.

Одним из самых распространённых решений в комбинированных ускорительных системах является сочетание рельсотрона с предускорителем другого типа, например легкогазовая, пороховая или электроразрядная пушка. Популярность данной концепции обусловлена тем, что наличие начальной скорости, сообщаемой ускоряемому телу предускорителем, значительно снижает эрозию рельс на стартовом участке и повышает эффективность ускорения рельсотроном [62]. Установка такого типа была создана в Максвелловской лаборатории (США). Диаметр ускорительного канала рельсотрона составляет 51×51 мм, длина рельсотрона 5 м, источник питания – конденсаторная батарея с запасаемой энергией 6 МДж и рабочим

напряжением 44 кВ. В роли предускорителя выступает легкогазовая пушка на гелии с дульной скоростью до 700 м/с, длина рельсотрона 5 м. Ускоритель позволяет разгонять тела массой от 75 до 156 г до скорости 3,1 км/с, и общий КПД установки составляет 14 % [63].

Заключение

Приведённый анализ ускорителей микронного и миллиметрового диапазона, основанных на различных принципах действия, показывает, что электромагнитные методы ускорения наиболее перспективны для ускорения макротел до сверхвысоких скоростей. Ускорители, использующие эти методы, обладают относительно простой конструкцией, но имеют и недостаток, связанный с необходимостью постоянного их обслуживания из-за наличия элементов, подверженных быстрому износу.

Библиографический список

1. Манзон Б.М. Ускорение макро-частиц для управляемого термоядерного синтеза // Успехи физических наук. 1981. Т. 134, № 4. С. 611-639. doi: 10.3367/UFNr.0134.198108b.0611
2. Harrison E.R. Alternative Approach to the Problem of Producing Controlled Thermonuclear Power // Physical Review Letters. 1963. V. 11, Iss. 12. P. 535-537. doi: 10.1103/physrevlett.11.535
3. Friichtenicht J.F. Two-million-Volt electrostatic accelerator for hypervelocity research // Review of Scientific Instruments. 1962. V. 33, Iss. 2. P. 209-212. doi: 10.1063/1.1746548
4. Hasegawa S., Fujiwara A., Morishige K., Yano H., Nishimura T., Sasaki S., Hamabe Y., Ohashi H., Nogami K., Kawamura T., Iwai T., Kobayashi K., Shibata H. Microparticle acceleration for hypervelocity experiments by A 3.75MV van de Graaff accelerator and a 100KV electrostatic accelerator in Japan // International Journal of Impact Engineering. 2001. V. 26, Iss. 1-10. P. 299-308. doi: 10.1016/s0734-743x(01)00098-7
5. Friichtenicht J.F. Micrometeoroid simulation using nuclear accelerator techniques // Nuclear Instruments and Methods. 1964. V. 28, Iss. 1. P. 70-78. doi: 10.1016/0029-554x(64)90351-9
6. 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. P. 699-716. doi: 10.1086/150994
7. Becker D.G., Friichtenicht J.F., Hamermesh B., Langmuir R.V. Variable-Ferquence Radially-Stable Micrometeoroid Accelerator // Review of Scientific Instruments. 1965. V. 36, Iss. 10. P. 1480-1481. doi: 10.1063/1.1719360
8. Сухачев К.И., Сёмкин Н.Д., Пяков А.В. Импульсный ускоритель пылевых частиц // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2013. Т. 16, № 2. С. 70-78.

9. Сухачев К.И., Сёмкин Н.Д., Пияков А.В. Импульсный ускоритель твёрдых частиц: патент РФ № 2523666; опубл. 20.07.2014; бюл. № 20.
10. Сёмкин Н.Д., Пияков А.В., Воронов К.Е., Помельников Р.А. Ускоритель высокоскоростных твёрдых частиц: патент РФ 2205525; опубл. 27.05.2003; бюл. № 15.
11. Сёмкин Н.Д., Пияков А.В., Пияков И.В., Сухачев К.И. Ускоритель высокоскоростных твёрдых частиц: патент РФ 2447626; опубл. 10.04.2012; бюл. №10.
12. Сёмкин Н.Д., Пияков А.В., Пияков И.В., Каштанов Е.В. Циклический ускоритель пылевых заряженных частиц: патент РФ 2456781; опубл. 20.07.2012; бюл. № 20.
13. Акишин А.И., Новиков Л.С. Методика и оборудование имитационных испытаний материалов космических аппаратов. М.: Московский университет, 1990. 90 с.
14. Сёмкин 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.
15. Сёмкин Н.Д., Пияков А.В., Брагин В.В., Видманов А.С., Сухачев К.И. Источник заряженных пылевых частиц: патент на РФ 136668; опубл. 10.01.2014; бюл. № 1.
16. Holland L.D. The DES railgun facility at SEM-UT // IEEE Transaction on Magnetics. 1984. V. 20, Iss. 2. P. 256-269. doi: 10.1109/tmag.1984.1063047
17. Сёмкин Н.Д., Воронов К.Е., Телегин А.М., Изюмов М.В., Сухачев К.И. Моделирование частиц космического мусора с помощью электромагнитного и электроплазменного ускорителя // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. Т. 14, № 1. С.79-85.
18. Fowler C.M., Peterson D.R., Caird R.S., Erickson D.J., Freeman V.I., King J.C. Explosive flux compression for railgun power sources // IEEE Transaction on Magnetics. 1982. V. 18, no. 1. P. 64-67. doi.org/10.1109/tmag.1982.1061778
19. Анисимов А.Г., Башкатов Ю.Л., Швецов Г.А. Взрывомагнитные генераторы для питания рельсотронных ускорителей // Физика горения и взрыва. 1986. Т. 22, № 4. С. 76-82.
20. Cowan M. Pulsed power for electromagnetic launching // IEEE Transaction of Magnetics. 1982. V. 18, Iss. 1. P. 145-150. doi: 10.1109/tmag.1982.1061774
21. Ford R.D., Jankins D., Lupton W.H., Vitkovitsky J.M. Pulsed High-Voltage and high-current outputs from Homopolar Energy Storage System // Review Scientific instruments. 1981. V. 52, no. 5. P. 694-697. doi: 10.1063/1.1136665
22. Koltern W.J., Jamet F. Electric Energy Gun technology: Status of the French-German-Netherlands Programme // IEEE Transaction on Magnetics. 1999. V. 35, no. 1. P. 25-39. doi: 10.1109/20.738370
23. Rashleigh S.C., Marshall R.A. Electromagnetic accelerator of macroparticles to high velocities // Journal of Applied Physics. 1978. V. 48, no. 4. P. 2540-2552. doi: 10.1063/1.325107
24. Delsasso L.A. Japanese Experiments with the Electromagnetic Gun // U.S. Army Technical Intelligence. 1946. V. 17. P. 123-186.
25. Швецов Г.А., Титов В.М., Анисимов Г.А. Рельсотронные ускорители макрочастиц Ч. 1. Общие характеристики // Доклады четвертой международной конференции по генерации мегагауссных полей и родственным экспериментам. США. Санта-Фе, 1986. С. 98-123.
26. Дробышевский Э.М., Жуков Б.Г., Куракин Р.О., Розов С.И., Белобородый М.В., Латыпов В.Г. Роль пинч-эффекта в высокоскоростном металлическом контакте с большим током // Письма в Журнал технической физики. 1999. Т. 25, № 6. С. 89-94.
27. Швецов Г.А., Титов В.М., Анисимов Г.А. Рельсотронные ускорители макрочастиц Ч. 2. Общие характеристики // Доклады четвертой международной конференции по генерации мегагауссных полей и родственным экспериментам. США. Санта-Фе, 1986. С. 140-156.

28. Barton R.J., Goldstein S.A., Tidman D.A., Wang S.G., Winsor N.K., Witherpoon F.D. EMET Technology for Rail Launchers // *IEEE Transaction of Magnetics*. 1986. V. 22, no. 6. P. 1410-1415. doi: 10.1109/tmag.1986.1064670
29. Башкатов Ю.Л., Швецов Г.А. Общие энергетические соотношения в рельсотронных ускорителях твёрдых тел // *Прикладная механика и техническая физика*. 1987. Т. 28, № 2 (162). С. 166-171.
30. Чистяков В.П., Швецов Г.А. О критической плотности тока в рельсотронных ускорителях с плазменным поршнем // *Прикладная механика и техническая физика*. 1988. Т. 29, № 1 (167). С. 20-27.
31. Носов Г.В. Определение параметров рельсотронов. Ч. 1. Расчёт при постоянной плотности тока // *Известия Томского политехнического университета*. 2013. Т. 322, № 4. С. 65-69.
32. Носов Г.В. Определение параметров рельсотронов. Ч. 2. Расчёт при синусоидальном токе // *Известия Томского политехнического университета*. 2013. Т. 322, № 4. С. 70-74.
33. Носов Г.В., Лусс А.А. Определение параметров рельсотронов. Ч. 3. Расчёт при периодических не синусоидальных токах // *Известия Томского политехнического университета*. 2013. Т. 323, № 4. С. 95-100.
34. Davidson R.F., Cook W.A., Robem D.A., Schnurr N.S. Predicting Bore Deformation and Launcher Stresses in Railgun // *IEEE Transaction of Magnetics*. 1986. V. 22, no. 6. P. 1435-1440. doi: 10.1109/tmag.1986.1064668
35. Kotas J.F., Buderjahn C.A., Littman F.D. A Parametric Evaluation of Railgun Augmentation // *IEEE Transaction of Magnetics*. 1987. V. 22, no. 6. P.1573-1577. doi: 10.1109/tmag.1986.1064729
36. Peterson D.R., Weeks D.A., Zowarka R.S., Cook R.W., Weldon W.F. Testing of a High Performance, Precision-Bore Railgun // *IEEE Transaction of Magnetics*. 1986. V. 22, no. 6. P. 1662-1668. doi: 10.1109/tmag.1986.1064655
37. Marshall R.A. Structure of Plasma Armature of Railgun // *IEEE Transaction of Magnetics*. 1986. V. 22, no. 6. P. 1609-1612. doi: 10.1109/tmag.1986.1064672
38. Kawashima N., Yamori A., Kohno M., Kubo H., Teii S., Himeno S. Electrothermal Accelerators A brief overview on the work performed within the trilateral European Electric Gun Program // *Proceedings of 5th European Symposium on Electromagnetic Launch Technology*. 1995. V. 2. P. 293-301.
39. Parker J.V. Why Plasma Armature Railguns don't work (and what can be done about it) // *IEEE Transaction of Magnetics*. 1989. V. 25, no. 1. P. 418-424. doi: 10.1109/20.22574
40. Postnikov B.V., Fomichev V.P., Fomin V.M. Two-Stage Railgun Pinched Plasma Armature // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2002. V. 39, no. 1. P. 4-11.
41. Shurupov A.V., Lebedev E.F., Luzganov S.N., Ostashev V.E., Polistchuk V.P., Fortov V.E. Extreme Regimes of Railgun Launcher with Plasma Armature // *IEEE Transactions on Magnetics*. 2002. V. 28, no. 2. P. 36-41.
42. Жуков Б.Г., Куракин Р.О., Сахаров В.А., Бобашев С.В., Поняев С.А., Резников Б.И., Розов С.И. Малогабаритный рельсовый ускоритель диэлектрических твердых тел мм-размера // *Письма в ЖТФ*. 2013. Т. 39, № 12. С. 63-70.
43. Карцев В.П. Магнит за три тысячелетия. М.: Энергоатомиздат, 1988. 268 с.
44. Капиза П., Kostenko M. Electrical Impuls Generator: British patent no. 254, 349. Application date: Dec. 30, 1924. Complate accepted: June 20. 1926.
45. Snow W.R., Dunbar R.S., Kulby J.A., O'Neil G.R. Mass driver two: A status report // *IEEE Transaction of Magnetics*. 1982. V. 18, no. 1. P. 127-134. doi: 10.1109/tmag.1982.1061777
46. Liao M., Zabar Z., Gzarkowski D., Levi E., Birenaum L. On the Design of a Coilgun as a rapid-Fire Grenade Launcher // *IEEE Transaction of Magnetics*. 1999. V. 35, no. 1. P. 148-153. doi: 10.1109/20.738393
47. Васильев Е.В. Многоступенча-

тый ускоритель с бегущим переключением соленоидов: патент РФ № 2267074; опубл. 27.12.2005; бюл. № 36.

48. Сухачев К.И., Сёмкин Н.Д., Пияков А.В., Воронов К.Е. Резонансный электромагнитный ускоритель: патент РФ № 2466340; опубл. от 10.11.2012; бюл. № 31.

49. Сухачев К.И., Сёмкин Н.Д., Пияков А.В. Повышение эффективности резонансного электромагнитного ускорителя // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2013. Т. 16, № 4. С. 63-68.

50. Сухачев К.И., Сёмкин Н.Д. Анализ возможностей катушечного электромагнитного ускорителя для разгона ферромагнитных частиц // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2013. № 3(41), ч. 1. С. 235-247.

51. Сухачев К.И., Сёмкин Н.Д., Пияков А.В., Воронов К.Е. Резонансный метод ускорения немагнитных материалов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2012. № 2(33). С. 126-132.

52. Bresie D.A., Bacon J.L., Kennington K.S., Ingram S.K., Weeks A.A. SPEAR coilgun // IEEE Transaction of Magnetics. 1995. V. 31, no. 1. P. 467-472. doi: 10.1109/20.364645

53. Weh H., May H. Electromagnetic accelerator in flat coil arrangement: Patent US № 5294850. Mar. 15. 1994.

54. Kolm H., Mongean P. Basic principles of coaxial launch technology // IEEE Transaction of Magnetics. 1984. V. 20, no. 2.

P. 227-230. doi: 10.1109/tmag.1984.1063050

55. Stollenwerk E.J., Perry R.W. Preliminary planning for a hypervelocity aerolalistic range at AEPС // AGAPDograph. 1959. V. 32. P. 200.

56. Физика быстропротекающих процессов. Т. 2 / под ред. Н.А. Златина. М.: Мир, 1971. 252 с.

57. Massey D.W., Tidman D.A., Goldstein S., Napier P. Experiments with a 0,5 Megajoule Electric Gun System for fairing hypervelocity Projectiles from plasma cartridges // Final Report GTD 86-1. GT-Devices. Alexandria. VA. 1986. P. 150-154.

58. Техника гиперзвуковых исследований: сб. статей. М.: Мир, 1964. 524 с.

59. Говелл В.Ж., Опп В.Р., Крилл А.М. Использование электрических разрядов в лёгком газе для увеличения скорости движения модели, сообщаемой ей газовой пушкой. М.: Машиностроение, 1965. 384 с.

60. Герасимов Д.Ю., Сивков А.А. Коаксиальный магнитоплазменный ускоритель: патент РФ № 2498542; опубл. 10.11.2013; бюл. № 31.

61. Сивков А.А. Гибридная электромагнитная система метания твёрдых тел // Прикладная механика и техническая физика. 2001. Т. 42, № 1(245). С. 3-12.

62. Hawke R.S., Dixon W.R., Kang S.W., McCallen R.C., Susoeff A.R., Assay J.R., Shahinpoor M. The Importance of high injection velocity to reduce plasma armature growth and drag in hypervelocity railguns // Proceedings of the 14th international conference on Plasma science. Arlington. VA. USA. 1987. P. 122-143.

63. Hamilton G. Electromagnetic Launcher Facility Begins Operation in California // Aviation Week and Space Technology. 1986. V. 124, no. 4. P. 92-112.

Информация об авторах

Сёмкин Николай Данилович, доктор технических наук, заведующий кафедрой конструирования и технологии электронных систем и устройств, Самарский государственный аэрокосмический

университет имени академика С. П. Королева (национальный исследовательский университет). E-mail: semkin@ssau.ru. Область научных интересов: системы управ-

ления движением, физика высокоскоростного удара.

Сухачёв Кирилл Игоревич, аспирант кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: kir.sukhachev@gmail.com. Область научных интересов: системы управления движением, физика высокоскоростного удара.

Дорофеев Александр Сергеевич, аспирант кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: alexandr.dorofeev.ikp@yandex.ru. Область научных интересов: системы управления движением, физика высокоскоростного удара.

METHODS AND MEANS OF ACCELERATING PARTICLES OF NATURAL AND TECHNOGENIC ORIGIN

© 2015 N. D. Semkin, K. I. Sukhachev, A. S. Dorofeev

Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation

Various types of accelerators of solid particulates of natural and technogenic origin are analyzed in the paper. We consider the structure and principles of operation of micron- and millimeter-scale accelerators with the center of velocity distribution of about 20 km/s: electrostatic, electromagnetic, pulsed, rail electromagnetic, solenoid coil and electric-gas dynamics, combined installations. Light-gas, explosive, gas discharge and electromagnetic accelerators with different principles of action are reviewed. The focus is on the electromagnetic techniques of acceleration that are most promising for acceleration of macrobodies to superevelocities. The advantages and disadvantages of different types of accelerators of solids are pointed out. The usability of different designs of accelerators to simulate collisions of orbital meteorite particles and space debris with the surface of the spacecraft is analyzed. Problems emerging in the construction and operation of accelerators of various types are specified and solutions to these problems are presented. The results of experiments in the acceleration of solid micron- and millimeter-wave solids using accelerators of various types and methods of structural optimization of particle accelerators with a view to increasing their efficiency and the speed of the accelerated body are presented. The evolution of accelerators and the main directions of their further improvement are shown.

Mass driver, coil accelerator, resonant accelerator, electric-discharge accelerator, throwing particles of natural and technogenic origin, hypervelocity acceleration of solid particulates, accelerators, operating principles, design, efficiency.

References

1. Manzon B.M. Acceleration of macroparticles for controlled thermonuclear fusion. *Soviet Physics Uspekhi*. 1981. V. 24, Iss. 8. P. 662-678. doi: 10.1070/PU1981v024n08ABEH004832
2. Harrison E.R. Alternative Approach to the Problem of Producing Controlled Thermonuclear Power. *Physical Review Letters*. 1963. V. 11, Iss. 12. P. 535-537. doi:10.1103/physrevlett.11.535
3. Friichtenicht J.F. Two-million-Volt electrostatic accelerator for hypervelocity research. *Review of Scientific Instruments*. 1962. V. 33, Iss. 2. P. 209-212. doi: 10.1063/1.1746548
4. Hasegawa S., Fujiwara A., Morishige K., Yano H., Nishimura T., Sasaki S., Hamabe Y., Ohashi H., Nogami K., Kawamura T., Iwai T., Kobayashi K., Shibata H. Microparticle acceleration for hypervelocity experiments by a 3.75MV van de Graaff accelerator and a 100KV electrostatic accelerator in Japan. *International Journal of Impact Engineering*. 2001. V. 26, Iss. 1-10. P. 299-308. doi: 10.1016/s0734-743x(01)00098-7
5. Friichtenicht J.F. Micrometeoroid

simulation using nuclear accelerator techniques. *Nuclear Instruments and Methods*. 1964. V. 28, Iss. 1. P. 70-78. doi: 10.1016/0029-554x(64)90351-9

6. 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. P. 699-716. doi: 10.1086/150994

7. Becker D.G., Friichtenicht J.F., Hamermesh B., Langmuir R.V. Variable-Ferquense Radially-Stable Micrometeoroid Accelerator. *Review of Scientific Instruments*. 1965. V. 36. P. 1480-1481. doi: 10.1063/1.1719360

8. Sukhachev K.I., Semkin N.D., Piyakov A.V. Dust particle accelerator pulse. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*. 2013. V. 16, no. 2. P. 70-78. (In Russ.)

9. Sukhachev K.I., Semkin N.D., Piyakov A.V. *Impul'snyy uskoritel' tverdykh chastits* [Pulsed accelerator of solid particles]. Patent RF, no. 2523666, 2014. (Publ. 20.07.2014, bull. no. 20).

10. Semkin N.D., Piyakov A.V., Voronov K.E., Pomel'nikov R.A. *Uskoritel' vysokoskorostnykh tverdykh chastits* [High-speed solid-particle acceleratorelerator high solids]. Patent RF, no. 2205525, 2003. (Publ. 27.05.2003, bull. no. 15).

11. Semkin N.D., Piyakov A.V., Piyakov I.V., Sukhachev K.I. *Uskoritel' vysokoskorostnykh tverdykh chastits* [Acceleratorofhigh-speed solid particles]. Patent RF, no. 2447626, 2010. (Publ. 10.04.2012, bull. no. 10).

12. Semkin N.D., Piyakov A.V., Piyakov I.V., Kashtanov E.V. *Tsiklicheskiy uskoritel' pylevykh zaryazhennykh chastits* [Charged dust particle cyclic accelerator]. Patent RF, no. 2456781, 2012. (Publ. 20.07.2012, bull. no. 20).

13. Akishin A.I., Novikov L.S. *Metodika i oborudovanie imitatsionnykh ispytaniy materialov kosmicheskikh apparatov* [Methods and equipment for simulation tests of spacecraft materials]. Moscow: Moscovskiy universitet Publ., 1990. 90 p.

14. 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, Iss. 3. P. 440-445. doi:10.1134/s0020441206030262

15. Semkin N.D., Piyakov A.V., Bragin V.V., Vidmanov A.S., Sukhachev K.I. *Istochnik zaryazhennykh pylevykh chastits* [The source of charged dust particles]. Patent RF, no. 136668, 2014. (Publ. 10.01.2014, bull. no.1).

16. Holland L.D. The DES railgan facility at CEM-UT. *IEEE Transaction on Magnetics*. 1984. V. 20, Iss. 2. P. 256-269. doi.org/10.1109/tmag.1984.1063047

17. Semkin N.D., Voronov K.E., Telegin A.M., Izyumov M.V., Sukhachev K.I. Modeling of debris particles with electromagnetic and electroplasma accelerator. *Phisycs of Wave Processes and Radio Systems*. 2012. V. 14, no. 1. P. 79-85 (In Russ.)

18. Fowler C.M., Peterson D.R., Caird R.S., Erickson D.J., Freeman B.I., King J.C. Explosive flux compression for railgun power sources. *IEEE Transaction on Magnetics*. 1982. V. 18, Iss. 1. P. 64-67. doi: 10.1109/tmag.1982.1061778

19. Anisimov A.G., Bashkatov Yu.L., Shvetsov G.A. Explosive magnetic generators for power railgun accelerators. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 1986. V. 22, no. 4. P. 457-462. doi: 10.1007/BF00862892

20. Cowan M. Pulsed power for electromagnetic launching. *IEEE Transaction of Magnetics*. 1982. V. 18, no. 1. P. 145-150. doi: 0.1109/tmag.1982.1061774

21. Ford R.D., Jankins D., Lupton W.H., Vitkovitsky J.M. Pulsed High-Voltage and high-current outputs from Homopolar Energy Storage System. *Review Scientific instruments*. 1981. V. 52, no. 5. P. 694-697. doi: 10.1063/1.1136665

22. Koltern W.J., Jamet F. Electric Energy Gun technology: Status of the French-German-Netherlands Programme. *IEEE Transaction on Magnetics*. 1999. V. 35, no. 1. P. 25-39. doi: 10.1109/20.738370

23. Rashleigh S.C., Marshall R.A.

- Electromagnetic accelerator of macroparticles to high velocities. *Journal of Applied Physics*. 1978. V. 48, no. 4. P. 2540-2552. doi: 10.1063/1.325107
24. Delsasso L.A. Japanese Experiments with the Electromagnetic Gun. *U.S. Army Technical Intelligence*. 1946. V. 17. P. 123-186.
25. Shvetsov G.A., Titov V.M., Anisimov G.A. Railgun accelerators particulates Part 1. General characteristics. *Report of the Fourth International Conference on generating Megagauss fields and related experiments*. USA. Santa Fe, 1986. P. 98-123. (In Russ.)
26. Drobyshevskii E.M., Zhukov B.G., Kurakin R.O., Rozov S.I., Beloborodyy M.V., Latypov V.G. Role of the pinch effect in a high-velocity metallic contact with a high current. *Technical Physics Letters*. 1999. V. 25, no. 3. P. 245-247.
27. Shvetsov G.A., Titov V.M., Anisimov G.A. Railgun accelerators particulate Part 2. General characteristics. *Report of the Fourth International Conference on generating Megagauss fields and related experiments*. USA. Santa Fe, 1986. P. 140-156. (In Russ.)
28. Barton R.J., Goldstein S.A., Tidman D.A., Wang S.G., Winsor N.K., Witherpoon F.D. EMET Technology for Rail Launchers. *IEEE Transaction of Magnetics*. 1986. V. 22, no. 6. P. 1410-1415. doi: 10.1109/tmag.1986.1064670
29. Bashkatov Yu.L., Shvetsov G.A. General energy relations for rail guns. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1987. V. 28, no. 2. P. 316-320. doi: 10.1007/BF00918741
30. Chistyakov V.P., Shvetsov G.A. Critical current density in rail accelerators with a plasma piston. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 1988. V. 29, no. 1. P. 19-25. doi: 10.1007/BF00909685
31. Nosov G.V. Defining the parameters of the railgun. Part 1. Calculation at constant current density. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2013. V. 322, no. 4. P. 65-69 (In Russ.)
32. Nosov G.V. Defining the parameters of the railgun. Part 2. Calculation of a sinusoidal current. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2013. V. 322, no. 4. P. 70-74 (In Russ.)
33. Nosov G.V., Luss A.A. Defining the parameters of the railgun. Part 3. Calculation of non-sinusoidal currents with periodic. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2013. V. 323, no. 4. P. 95-100 (In Russ.)
34. Davidson R.F., Cook W.A., Robem D.A., Schnurr N.S. Predicting Bore Deformation and Launcher Stresses in Railgun. *IEEE Transaction of Magnetics*. 1986. V. 22, no. 6. P. 1435-1440. doi: 10.1109/tmag.1986.1064668
35. Kotas J.F., Buderjahn C.A., Littman F.D. A Parametric Evaluation of Railgun Augmentation. *IEEE Transaction of Magnetics*. 1987. V. 22, no. 6. P. 1573-1577. doi: 10.1109/tmag.1986.1064729
36. Peterson D.R., Weeks D.A., Zowarka R.S., Cook R.W., Weldon W.F. Testing of a High Performance, Precision-Bore Railgun. *IEEE Transaction of Magnetics*. 1986. V. 22, no. 6. P. 1662-1668. doi: 10.1109/tmag.1986.1064655
37. Marshall R.A. Structure of Plasma Armature of Railgun. *IEEE Transaction of Magnetics*. 1986. V. 22, no. 6. P. 1609-1612. doi: 10.1109/tmag.1986.1064672
38. Kawashima N., Yamori A., Kohno M., Kubo H., Teii S., Himeno S. Electrothermal Accelerators A brief overview on the work performed within the trilateral European Electric Gun Program. *Proceedings of 5th European Symposium on Electromagnetic Launch Technology*. 1995. V. 2. P. 293-301.
39. Parker J.V. Why Plasma Armature Railguns don't work (and what can be done about it). *IEEE Transaction of Magnetics*. 1989. V. 25, no. 1. P. 418-424. doi: 10.1109/20.22574
40. Postnikov B.V., Fomichev V.P., Fomin V.M. Two-Stage Railgun Pinched Plasma Armature. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2002. V. 39, no. 1. P. 4-11.
41. Shurupov A.V., Lebedev E.F., Luzganov S.N., Ostashov V.E., Polistchuk V.P., Fortov V.E. Extreme Regimes of Railgun Launcher with Plasma Armature. *IEEE*

Transactions on Magnetics. 2002. V. 28, no. 2. P. 36-41.

42. Zhukov B.G., Kurakin R.O., Sakharov V.A., Bobashev S.V., Ponyaev S.A., Reznikov B.I., Rozov S.I. Synchronous acceleration of two millimeter-sized bodies up to hypersonic velocities in a multichannel railgun. *Technical Physics Letters*. 2013. V.39, no. 12. P. 1057-1059.

doi: 10.1134/S1063785013120146

43. Kartsev V.P. *Magnit za tri tysyacheletie* [Magnet for three millennia]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1988. 268 p.

44. Kapiza P., Kostenko M. Electrical Impuls Generator. British patent № 254, 349. Application date: Dec. 30, 1924. Complite accepted: June 20.1926.

45. Snow W.R., Dunbar R.S., Kulby J.A., O'Neil G.R. Mass driver two: A status report. *IEEE Transaction of Magnetics*. 1982. V. 18, no. 1. P. 127-134.

doi: 10.1109/tmag.1982.1061777

46. Liao M., Zabar Z., Gzarkowski D., Levi E., Birenaum L. On the Design of a Coilgun as a rapid-Fire Grenade Launcher. *IEEE Transaction of Magnetics*. 1999. V. 35, no. 1. P. 148-153. doi: 10.1109/20.738393

47. Vasil'ev E.V. *Mnogostupenchatyy uskoritel' s begushchim pereklyucheniem solenoidov* [Multistage accelerator with series commutation of solenoids]. Patent RF, no. 2267074, 2005. (Publ. 27.12.2005, bull. no. 36).

48. Sukhachev K.I., Semkin N.D., Piyakov A.V., Voronov K.E. *Rezonansnyy elektromagnitnyy uskoritel'* [Resonance electromagnetic accelerator]. Patent RF, no. 2466340, 2012. (Publ. 10.11.2012, bull. no. 31).

49. Sukhachev K.I., Semkin N.D., Piyakov A.V. Increase of efficiency of the resonant electromagnetic accelerator. *Physics of Wave Processes and Radio Systems*. 2013. V. 16, no. 4. P. 63-68 (In Russ.)

50. Sukhachev K.I., Semkin N.D. Analysis of potentialities of coil electromagnetic accelerators for the accelerating of ferromagnetic particles. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2013. No. 3(41),

part 1. P. 235-247 (In Russ.)

51. Sukhachev K.I., Semkin N.D., Piyakov A.V., Voronov K.E. Resonant method of accelerating non-magnetic materials. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*. 2012. No. 2(33). P. 126-132. (In Russ.)

52. Bresie D.A., Bacon J.L., Kennington K.S., Ingram S.K., Weeks A.A., SPEAR coilgun. *IEEE Transaction of Magnetics*. 1995. V. 31, no. 1. P. 467-472. doi: 10.1109/20.364645

53. Weh H., May H. Electromagnetic accelerator in flat coil arrangement: Patent US № 5294850. Mar. 15. 1994.

54. Kolm H., Mongean P. Basic principles of coaxial launch technology. *IEEE Transaction of Magnetics*. 1984. V. 20, no. 2. P. 227-230. doi: 10.1109/tmag.1984.1063050

55. Stollenwerk E.J., Perry R.W. Preliminary planning for a hypervelocity aerolalistic range at AEPC. *AGAPDograph*. 1959. V. 32. P. 200.

56. *Fizika bystroprotekayushchikh protsessov. T. 2* [Physics of fast processes. V.2]. Moscow: Mir Publ., 1971. 252 p.

57. Massey D.W., Tidman D.A., Goldstein S. and Napier P. Experiments with a 0,5 Megajoule Electric Gun System for fairing hypervelocity Projectiles from plasma cartridges. *Final Report GTD 86-1. GT-Devices. Alexandria. VA*. 1986. P. 150-154.

58. *Tekhnika giperzvukovykh issledovaniy: sb. statey* [A technique of hypersonic investigations]. Moscow: Mir Publ., 1964. 524 p.

59. Govell V.Zh., Orr V.R., Krill A.M. *Ispol'zovanie elektricheskikh razryadov v legkom gaze dlya uvelicheniya skorosti dvizheniya modeli, soobshchaemoy ey gazovoy pushkoy* [Using electrical discharges in a light gas to increase the speed imparted to the model by a gas gun]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1965. 384 p.

60. Gerasimov D.Yu., Sivkov A.A. *Koaksial'nyy magnitoplazmennyy uskoritel'* [Coaxial magneto plasma accelerator]. Patent RF, no. 2498542, 2013. (Publ. 10.11.2013, bull. no. 31).

61. Sivkov A.A. Hybrid Electromag-

netic System for Acceleration of Solids. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2001. V. 42, no. 1. P. 1-9.

62. Hawke R.S., Dixon W.R., Kang S.W., McCallen R.C., Susoeff A.R., Assay J.R., Shahinpoor M. The Importance of high injection velocity to reduce plasma armature growth and drag in hypervelocity railguns.

Proceedings of the 14th international conference on Plasma science. Arlington. VA, USA. 1987. P. 122-143.

63. Hamilton G. Electromagnetic Launcher Facility Begins Operation in California. *Aviation Week and Space Technology*. 1986. V. 124, no. 4. P. 92-112.

About the authors

Semkin Nikolay Danilovich, Doctor of Science (Engineering), Head of the Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: semkin@ssau.ru. Area of Research: motion control systems, physics of high-velocity impact.

Sukhachev Kirill Igorevich, postgraduate student, the Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices, Samara State Aerospace University,

Samara, Russian Federation. E-mail: kir.sukhachev@gmail.com. Area of Research: motion control systems, physics of high-velocity impact.

Dorofeev Alexander Sergeevich, postgraduate student, the Department of Design and Technology of Electronic Systems and Devices, Samara State Aerospace University, Samara, Russian Federation. E-mail: alexandr.dorofeev.ikp@yandex.ru. Area of Research: motion control systems, physics of high-velocity impact.