

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТОИНДУКЦИОННЫХ СИСТЕМ УСКОРЕНИЯ МИКРОМЕТЕОРИТОВ И ТЕХНОГЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ ЧАСТИЦ

Сухачев К.И.* , Дорофеев А.С.**

*Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва,
Московское шоссе, 34, Самара, 443086, Россия*

**e-mail: kir.sukhachev@gmail.com*

***e-mail: alexandrdofofeev.ikp@yandex.ru*

Статья посвящена разработке экспериментального стенда на базе магнитоиндукционной рельсовой системы. Предложена методика повышения эффективности рельсового электромагнитного ускорителя небольших твердых тел. Повышение эффективности достигается применением многоконтурных магнитных систем, с независимыми коммутаторами и накопителями, но с общей системой управления. Для определения временных параметров коммутации и параметров магнитных систем рельсотрона была разработана методика расчета рельсотрона, работающего совместно с многоконтурным подмагничиванием. На основе предложенной методики создан экспериментальный ускорительный стенд, на котором проведены эксперименты, подтвердившие эффективность многоконтурных систем.

Ключевые слова: рельсовый электромагнитный ускоритель, рельсотрон, микрометеориты, внешнее магнитное поле, ударный эксперимент.

Введение

Столкновения космических аппаратов (КА) с метеорными телами и с объектами, входящими в состав космического мусора, относятся к числу важнейших факторов, вызывающих повреждения и разрушения КА. Характер повреждений зависит в первую очередь от размеров сталкивающихся с КА тел и скоростей соударения, значения которых лежат в диапазоне от 1 до 50 км/с [1—3]. При указанных скоростях соударения происходит интенсивное энерговыделение в ограниченном объеме вещества, сопровождаемое формированием ударных волн с последующими механическими разрушениями, плавлением, испарением и термической ионизацией образующихся паров. Удары частиц с поперечными размерами 0,2—1 см могут создавать сквозные пробоины в стенках КА и приводить к катастрофическим разрушениям. Исследования явлений, возникающих при высокоскоростном соударении твердых тел, весьма важны для разработки методов защиты КА, а также методов регистрации и измерения параметров объектов, входящих в состав метеорной материи и космического мусора. Такие исследования представляют и самостоятельный

научный интерес, поскольку многие детали, сопровождающие высокоскоростной удар, плазмообразование, эмиссию электронов и ионов, возникновение световых вспышек, инициирование электрических разрядов и т. д. пока изучены недостаточно.

Однако процессы взаимодействия твердых частиц с космическим аппаратом носят редкий и случайный характер, поэтому проведение экспериментов в космических условиях задача крайне сложная и неэффективная, так как нельзя с точностью прогнозировать параметры проведения эксперимента, размеры частиц, момент соударения, а также невозможно обеспечить повторяемость эксперимента. Поэтому для космического эксперимента требуется разработка стенда, позволяющего проводить ударные испытания тел различного размера и материала с объектами, подлежащими испытанию [4—6]. Скорость соударения должна быть сопоставима с космической и составлять 1—6 км/с, именно при такой скорости частица имеет максимальную пробивную способность [7]. Для достижения заявленных скоростей твердых тел предлагается разработать ускорительный стенд на базе рельсового уско-

рителя, однако в настоящее время существует проблема недостаточной эффективности преобразования энергии, что особенно проявляется при ускорении небольших объектов массой менее 1 г [8].

Рельсовый магнитоиндукционный ускоритель

Для решения поставленной задачи была разработана экспериментальная методика повышения эффективности рельсовых ускорителей небольших тел. Она состоит во введении в ускорительный тракт внешнего локального магнитного поля, которое перемещается синхронно с движущейся частицей [9]. Для расчета конструкции ускорителя разработана методика расчета рельсовых ускорителей, работающих совместно с многоконтурными системами подмагничивания [10], которая сводится к нахождению силы, действующей на каждый элемент ускоряемой частицы в каждый момент времени:

$$F_{total}(t) = \iiint_{V_{arm}} Bz_i(t) I_i(t) dx dy dz, \tag{1}$$

где $Bz_i(t)$ и $I_i(t)$ — соответственно z составляющая вектора магнитной индукции в i -й области якоря на данной временной итерации и ток, протекающий по i -й области якоря в тот же временной шаг.

Величина магнитного поля $Bz_i(t)$ находится как сумма всех проекций векторов магнитной ин-

дукции на ось z в i -й области якоря, создаваемых элементарными токами жгутов, на которые разбиты рельсовые электроды и электроды системы подмагничивания (СПР). На рис. 1 представлена иллюстрация описываемой модели.

Ток в контуре имеет характер затухающих колебаний и вычисляется на каждом шаге согласно следующему выражению:

$$I_{rail}(t) = \frac{U_{rail}(t_{-\Delta t})}{L_{rail}(t_{-\Delta t})\omega_{ce}(t_{-\Delta t})} \times \exp[-\delta(t_{-\Delta t}) \cdot t] \sin(\omega_{ce}(t_{-\Delta t}) \cdot t), \tag{2}$$

где $U_{rail}(t_{-1})$, $L_{rail}(t_{-1})$, $\omega_{ce}(t_{-1})$, $\delta(t_{-1})$ — соответственно напряжение конденсаторного накопителя рельсотрона, индуктивность контура рельсов, свободная частота затухающих колебаний и коэффициент затухания в предыдущий момент времени; t — текущее время с начала отсчёта, $t = t_{-1} + \Delta t$; t_{-1} — момент времени в предыдущий временной интервал.

Условием перехода от одного контура СПР к следующему является вхождение якоря в область контура, в противном случае контур не подключается к накопителю и расчёт данного контура не ведётся. Критериями остановки вычислений являются: выход якоря из области рельсов, разряд накопителя рельсотрона, превышение заранее задан-

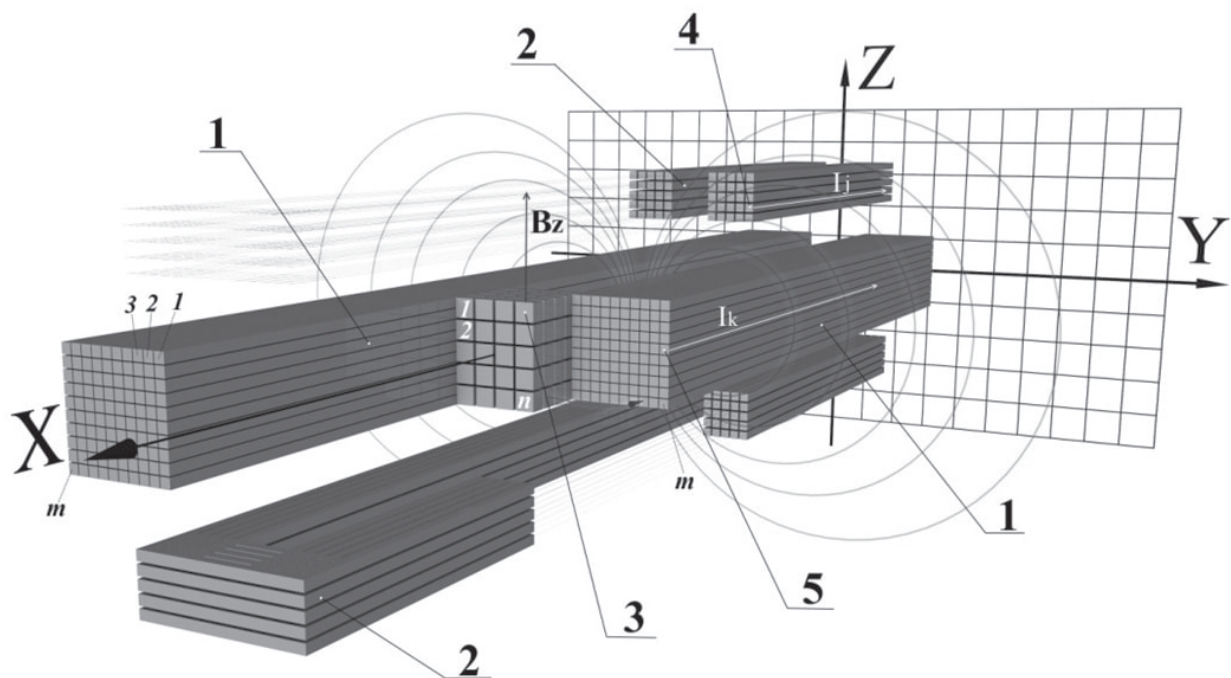


Рис. 1. Модель рельсотрона с улучшенной системой подмагничивания: 1 — рельсовые электроды; 2 — электроды СПР; 3 — i -й элемент объёма якоря; 4 — k -я ячейка электродов СПР; 5 — j -я ячейка рельсовых электродов

ного количества временных итераций. Таким образом, представленная модель позволяет получить оценку процесса ускорения якоря в канале рельсотрона с системой подмагничивания, работающей на синхронном колебательном процессе разряда накопителя рельсотрона и СПР. При этом модель может быть расширена путём введения дополнительных динамических параметров, пересчитываемых на каждом временном шаге.

Для испытания предложенной методики был создан экспериментальный ускорительный стенд, позволяющий оценить повышение эффективности многоконтурной системы подмагничивания за счет коммутации системы подмагничивания (рис. 2).

Способы коммутации системы подмагничивания:

1. Контурь соединены последовательно. В этом случае систему можно рассматривать как стандартный способ подмагничивания канала. (Составной накопитель системы подмагничивания при этом объединялся.)

2. Вся энергия подводится только к первому контуру подмагничивания, второй отключен и не действует.

3. Система подмагничивания работает в двухступенчатом режиме, каждый контур питается от своей секции накопителя, и коммутация осуществляется с учетом необходимых временных задержек для синхронизации процессов.

Общая функциональная схема устройства представлена на рис. 3, на рис. 4 приведена фотография стенда.

После зарядки накопителей по сигналу системы управления запускается контур подмагничивания, создающий внешнее магнитное поле в области нахождения якоря. После регулируемой паузы, во время которой внешнее поле успеет достигнуть необходимой величины, запускается основной контур. Суммарное магнитное поле основного контура и контура СПР ускоряет якорь, по которому протекает ток основного контура. По мере движения тела по ускорительному тракту, в зависимо-

сти от выбранного режима подмагничивания, внешнее поле смещается вдоль канала ускорителя, синхронно с движением якоря. За программу коммутации отвечает блок управления зажиганием, который выдерживает необходимые паузы между подачей сигнала на драйверы коммутаторов.

Экспериментальные исследования экспериментального рельсотрона

Первые испытания проводились на рельсотроне без подмагничивания, работающего от накопителя с емкостью 1800 мкФ и максимальным уровнем запасенной энергии 32 КДж. В качестве коммутатора использовался воздушный управляемый разрядник типа тригatrona. Эксперименты проводились с алюминиевым якорем массой 2,6 г на разных уровнях энергии накопителя. На рис. 5 представлена фотография мишени после соударения.

На рис. 6 представлена зависимость скорости от энергии накопителя, полученная в результате компьютерного моделирования. Точками на графике отмечены усредненные экспериментальные значения скорости, полученные на рельсотроне без СПР. Максимальная скорость была достигнута при энергии накопителя 32 КДж и составила 710 м/с, что согласуется с результатами численного эксперимента.

Испытания совместной работы рельсотрона с системой подмагничивания проводились на том же стенде, но на корпус рельсотрона были установлены два независимых контура подмагничивания. Испытания проводились на уровне энергии основного накопителя, равном 25 кДж, а контуры подмагничивания были скоммутированы тремя различными способами.

На рис. 7 представлены графики зависимостей конечной скорости якоря от суммарной энергии накопителя системы подмагничивания для трех описанных вариантов системы, в таблице приведены прочие параметры экспериментов.

На рис. 8 представлена многослойная дюралевая мишень, пробитая частицами, ускоренными на

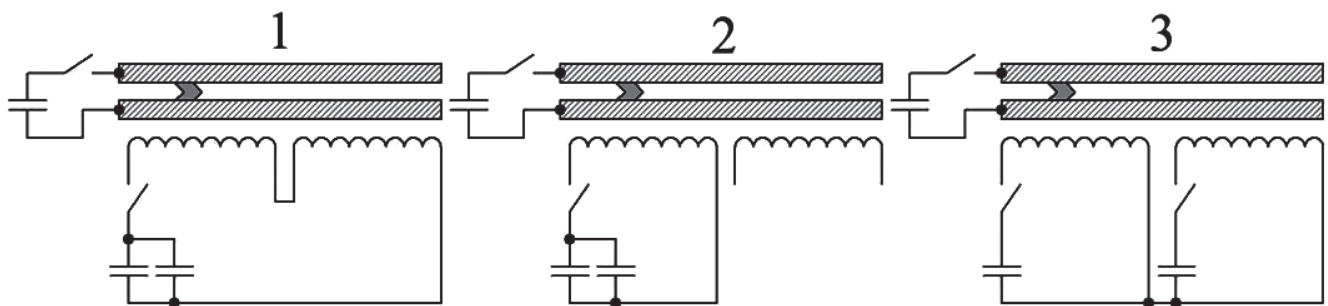


Рис. 2. Варианты коммутации системы подмагничивания рельсового электромагнитного ускорителя

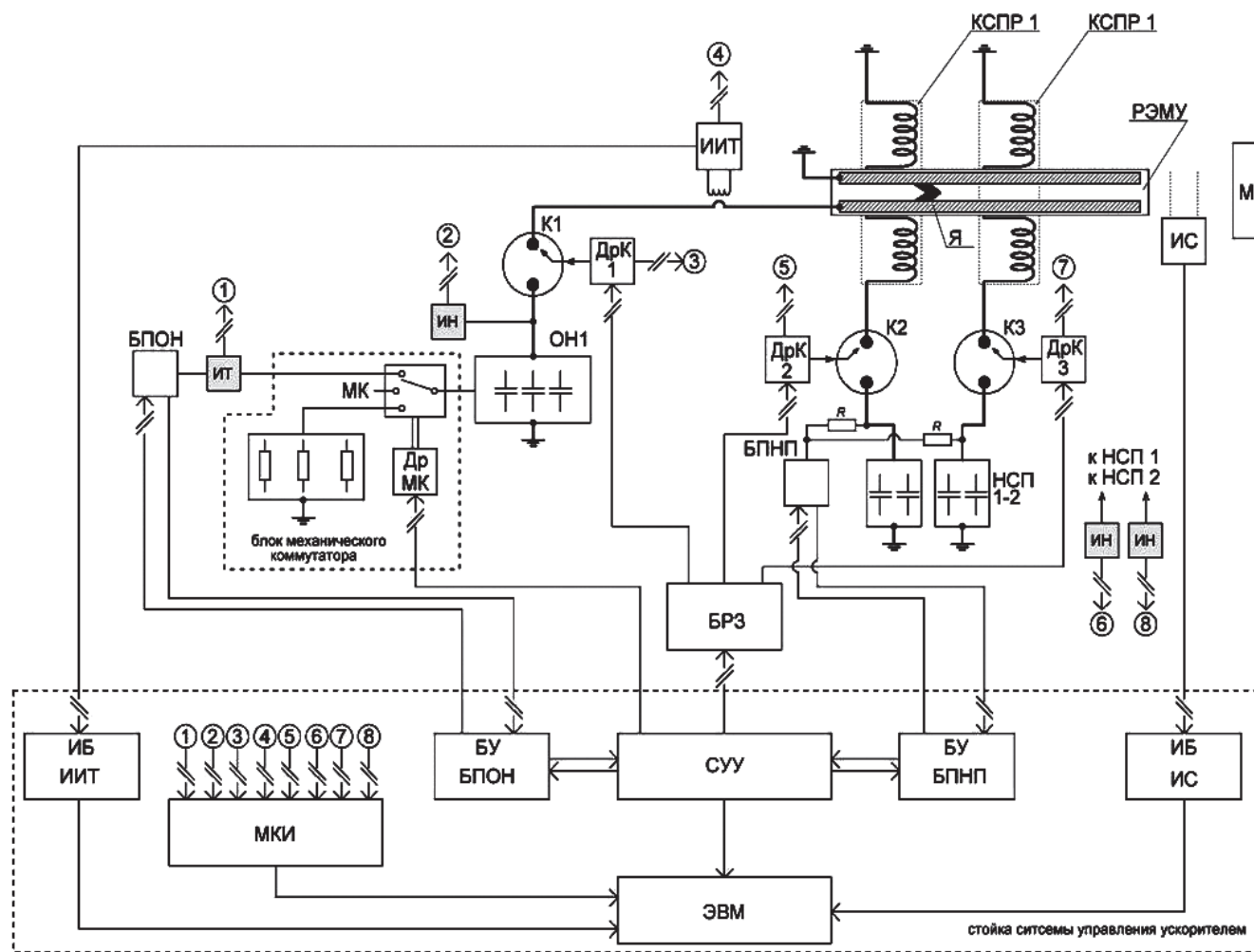


Рис. 3. Функциональная схема стенда экспериментального ускорителя: БПОН — блок питания основного накопителя; БУ БПОН — блок управления БПОН; МК — механический коммутатор; Др МК — драйвер механического коммутатора; МКИ — многоканальный измеритель; ИН — измеритель напряжения; ИТ — измеритель тока; ИИТ — измеритель импульса тока; ИБ ИИТ — интерфейсный блок измерителя импульса тока; К — коммутатор; ДрК — драйвер коммутатора; ОН — основной накопитель; НСП — накопитель системы подмагничивания; БПНП — блок питания накопителя системы подмагничивания; БУ БПНП — блок управления БПНП; КСПР — контур системы подмагничивания; РЭМУ — рельсовый электромагнитный ускоритель; ИС — измеритель скорости; ИБ ИС — интерфейсный блок измерителя скорости; М — мишень; БРЗ — блок распределения зажигания; СУУ — система управления ускорителем; ЭВМ — электронно-вычислительная машина; Я — якорь

рельсотроне с одноконтурной и двухконтурной системой подмагничивания рельсотрона (варианты 1 и 3 на рис. 7).

Из проведенного эксперимента видно, что наибольший прирост скорости дает двухступенчатый вариант СПР, при котором удалось повысить конечную скорость с 770 до 950 м/с, т.е. на 23 %. Из графика на рис. 7 видно, что результаты ускорения с двухступенчатым вариантом СПР согласуются с предложенной моделью.

Для охвата большего диапазона масс были проведены эксперименты на уменьшенной версии рельсового ускорителя с системой подмагничивания. Ускорительный канал данной версии ускорителя

имел квадратное сечение со стороной равной 2 мм. Ускорение проводилось с помощью плазменного поршня, рабочим телом выступала углеродная плазма, в роли метаемых тел были полимерные кубики массой примерно 10 мг. На рис. 9 представлена полубесконечная дюралевая мишень после соударения с таким кубиком на скорости 2100 м/с. В данном эксперименте энергия основного накопителя составляла 8,1 КДж, энергия накопителей подмагничивания — 3,5 КДж. Пунктиром обозначены размеры частицы; видно, что диаметр кратера примерно в три раза больше частицы, глубина кратера сопоставима с её размером.



Рис. 4. Экспериментальный ускоритель

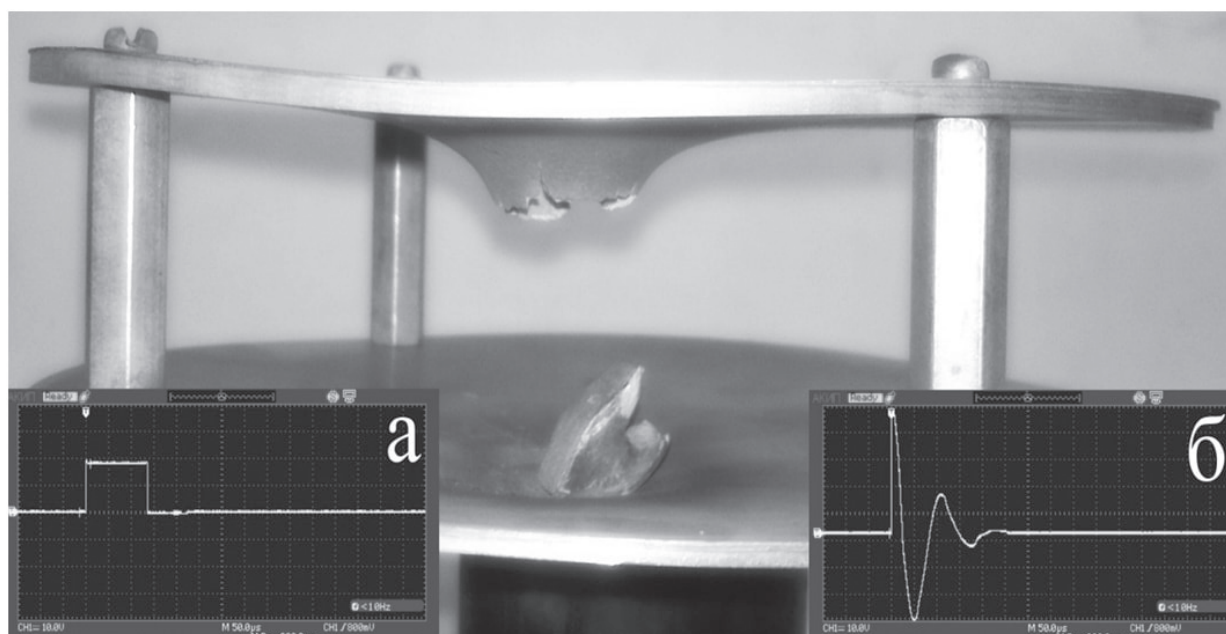


Рис. 5. Двухслойная мишень после соударения с якорем на скорости 710 м/с: *а*— осциллограмма с измерителя скорости (время пролета базы 0,1 м); *б* — осциллограмма с измерителя тока, амплитудное значение 830 кА

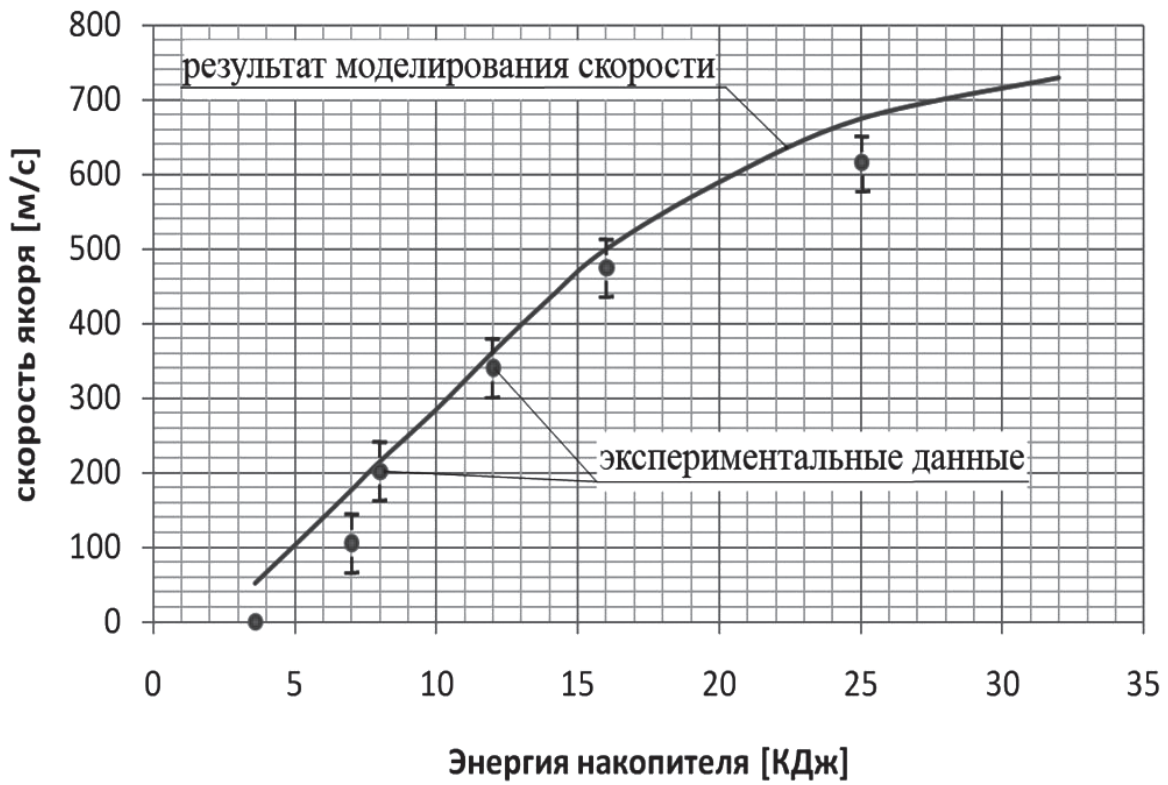


Рис. 6. Экспериментальная и теоретическая зависимости скорости якоря от уровня запасенной накопителем энергии

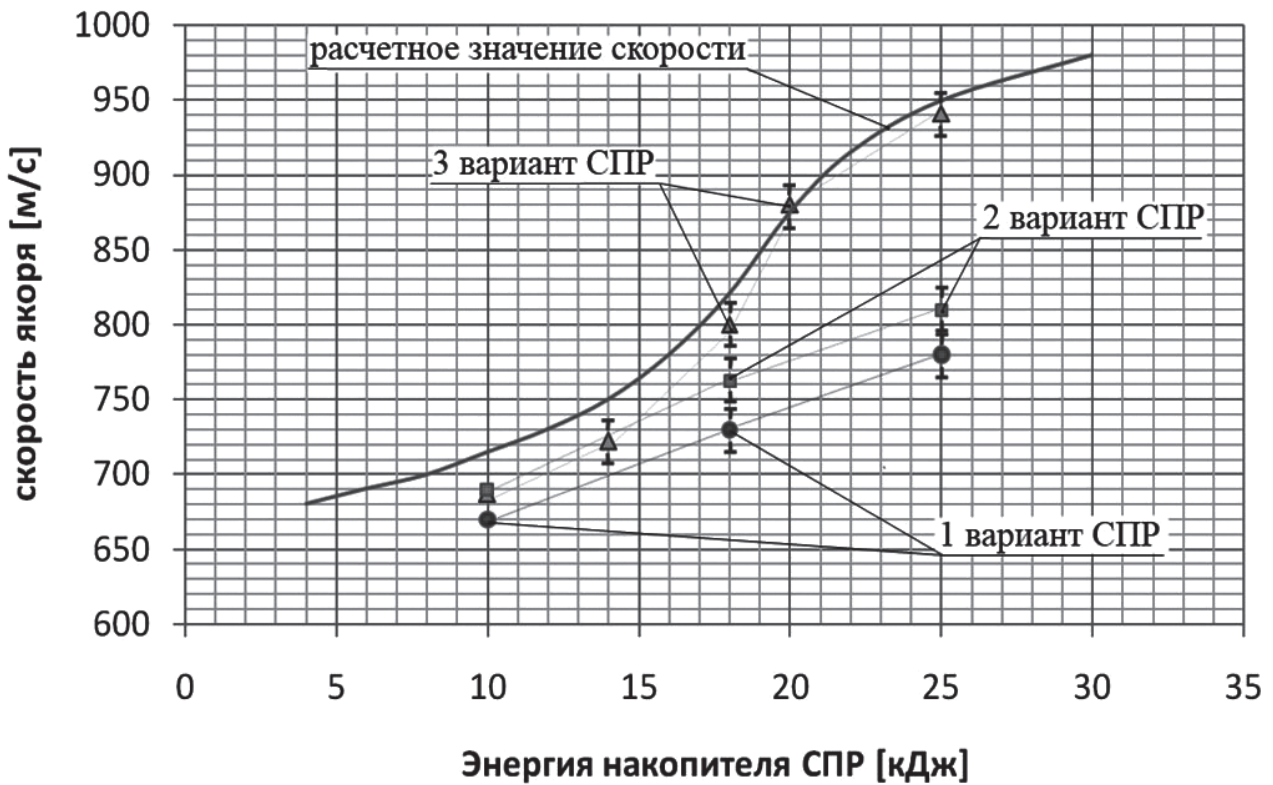


Рис. 7. Зависимости скорости якоря от суммарной энергии накопителя для трех вариантов СПР

Параметры проведения ударных экспериментов с применением трех вариантов системы подмагничивания рельсотрона

Параметр	1 вариант СПР	2 вариант СПР	3 вариант СПР
Расстояние до канала рельсотрона	30 мм		
Суммарная длина контура подмагничивания	800 мм	400 мм	400 мм × 2 (для двух контуров)
Суммарная емкость накопителя СПР	2000 мкФ		
Амплитуда тока контура	130 кА	340 кА	300 кА

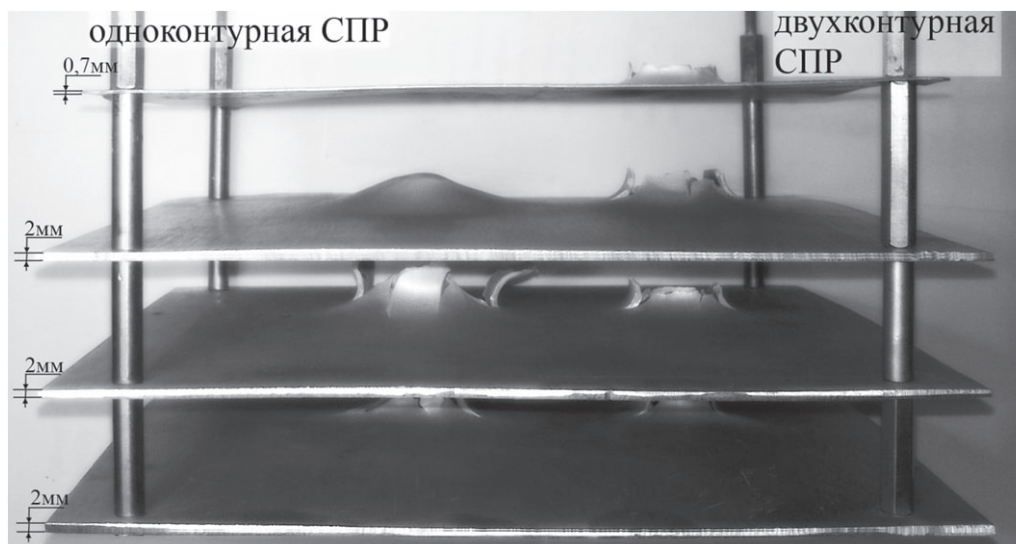


Рис. 8. Дюралевая многослойная мишень после столкновения с якорем, ускоренным на скорости 770 и 950 м/с

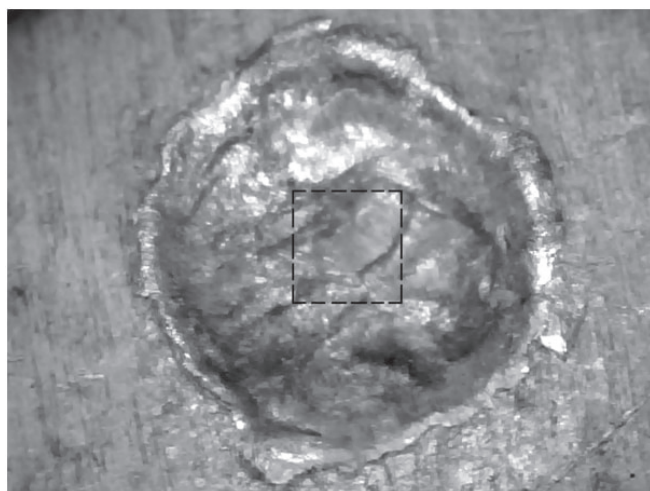


Рис. 9. Мишень после столкновения с частицей массой 10 мг на скорости 2100 м/с

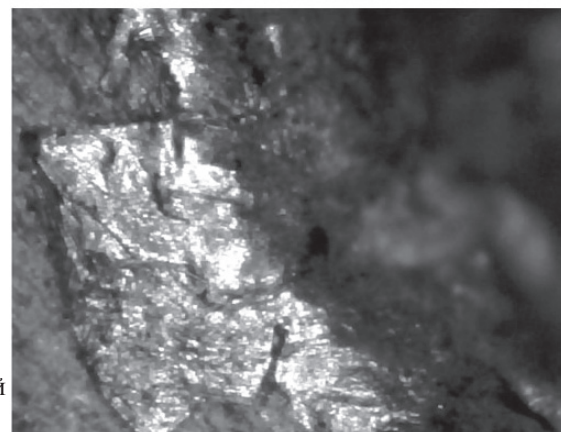
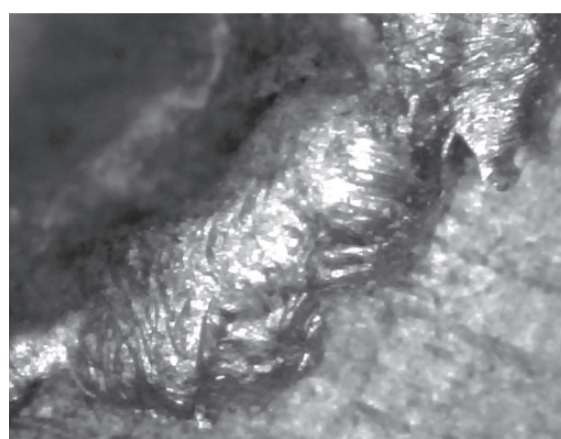


Рис. 10. Бортик кратера после столкновения с частицей массой 10 мг на скорости 2100 м/с

Частица после соударения разрушилась, остаточный материал частично вплавился в дно кратера. На краях хорошо виден бортик (рис. 10), свидетельствующий о высокоскоростном характере удара.

Выводы

Разработана методика повышения эффективности рельсовых магнитоиндукционных ускорителей небольших твердых тел, позволяющая повысить конечную скорость частицы без увеличения энергии накопителей. Для проверки предложенного принципа разработан экспериментальный ускорительный стенд. Проведены серии экспериментов, результаты которых схожи с результатами, полученными при моделировании работы рельсового ускорителя с многоконтурной системой подмагничивания.

Экспериментально показана эффективность многоконтурной системы подмагничивания, которая в экспериментах обеспечила увеличение скорости якоря на 23% по сравнению с классической одноконтурной системой подмагничивания, охватывающей весь ускорительный тракт.

*Работа выполнена при финансовой поддержке
Министерства образования и науки РФ в рамках
выполнения контракта по Соглашению
№ 14.575.21.0107 от «28» ноября 2014 г.*

Библиографический список

1. Новиков Л.С. Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты: Учебное пособие. — М.: Университетская книга, 2009. — 104 с.
2. Вениаминов С.С., Червонов А.М. Космический мусор — угроза человечеству. — М.: ИКИ РАН, 2012. — 192 с.
3. Зеленцов В.В. Проблема мелкого космического мусора // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 4. С. 89-104.
4. Семкин Н.Д., Воронов К.Е., Телегин А.М., Сухачев К.И., Изюмов М.В. Моделирование частиц космического мусора с помощью электромагнитного и электроплазменного ускорителя // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. Т. 14. № 1. С. 79-85.
5. Афанасьев В.А., Чудецкий Г.М., Чудецкий Ю.В. Исследование комет и астероидов при ударно-взрывном воздействии // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 2. С. 52-55.
6. Новиков Л. С., Надирадзе А. Б., Бедняков С. А., Гаврюшин А. В. Шунтирование элементов солнечных батарей при одиночных ударах твердых частиц // Труды МАИ. 2000. № 1. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=34739>
7. Ковалев Р.В., Лунев В.В., Минюшкин Д.Н. Взаимодействие высокоскоростных частиц с тонкостенной металлической оболочкой // Космонавтика и ракетостроение. 2000. № 18. С. 119-126.
8. Семкин Н.Д., Сухачев К.И., Дорофеев А.С. Методы и средства ускорения частиц естественного и техногенного происхождения // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2015. Т. 14. № 4. С. 171-191.
9. Сухачев К.И., Семкин Н.Д., Пияков А.В., Ильин Е.А., Видманов А.С. Резонансный рельсовый ускоритель. Патент RU № 2554054 С1. Бюлл. № 17, 20.06.2015.
10. Сухачев К.И. Рельсовый электромагнитный ускоритель с внешним магнитным полем // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2015. № 1. С. 177-189.

DEVELOPMENT AND STUDY OF MAGNETIC INDUCTION SYSTEMS FOR MICROMETEORITES' AND COSMIC PARTICLES' ACCELERATION

Sukhachev K.I.* , Dorofeev A.S.**

*Samara National Research University named after academician S.P. Korolev,
34, Moscovskoe shosse, Samara, 443086, Russia*

** e-mail: kir.sukhachev@gmail.com*

*** e-mail: alexandr.dorofeev.ikp@yandex.ru*

Abstract

This work is dedicated to development of experimental test-bench based on magnetic induction rail system. The test-bench allows the ground testing of spacecraft materials and equipment on resistance to micro particles of natural and artificial origin impacts. It will solve the problems related to the costly and

inefficient space experiments, and will significantly increase the repeatability, controllability and frequency of impact experiments. In the long-run this accelerator will be an essential part for developing effective protection of the spacecraft from the meteorite hazard, non-existent at the moment.

To solve the problem of low efficiency while converting electrical energy into kinetic energy, which is of great importance for acceleration of small bodies, weighing less than 0.1 g, the authors propose an experimental technique, allowing increasing the efficiency, and, thus, the impactor's maximum speed without increasing the stored energy in storage facilities. The unique feature of the proposed technique consists in increasing the accelerating force acting on the object from external magnetic systems. The authors propose to create a localized external magnetic field directly in the surrounding area of accelerated particles, and then move the magnetization area synchronously with the movement of the accelerated object over the path of the accelerator. This effect is achieved by using multiple-magnetic systems with independent switches and drives, and a single control system. To determine the switching time parameters and parameters of the railguns magnetic systems, the technique of the railgun computation, operating in combination with the multi-loop magnetizing system has been developed.

To test the proposed approach a prototype accelerator was designed and developed. The series of experiments confirming the effectiveness of the proposed method was carried out. Experiments were carried out with particles of various masses, a variety of energy storage levels, as well as for several options for magnetizing systems. The upgraded magnetizing system was 23% more efficient than the classic one, with the same energy storage. The developed accelerator allowed obtain the speed of more than 2100 m/s with a total energy of 11.6 kJ stored in the capacitor bank was reached.

The authors plan to apply the proposed methodology to the main circuit. According to the simulation results, the main circuit multi-step power supply will also contribute to the efficiency increase of rail accelerators.

Keywords: rail electromagnetic accelerator, railgun, micrometeorites, external magnetic field, impact experiment

References

1. Novikov L.S. *Vozdeistvie tverdykh chastits estestvennogo i iskusstvennogo proiskhozhdeniya na kosmicheskie apparaty* (Impact of solid particles of natural and artificial origin on a spacecraft), Moscow, Universitetskaya kniga, 2009, 104 p.
2. Veniaminov S.S., Chervonov A.M. *Kosmicheskii musor – ugroza chelovechestvu* (Space debris - a threat to mankind), Moscow, IKI RAN, 2012, 192 p.
3. Zelentsov V.V. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baubana*, 2015, no. 4, pp. 98-104.
4. Semkin N.D., Voronov K.E., Telegin A.M., Sukhachev K.I., Izyumov M.V. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy*, 2011, vol. 14, no. 1, pp. 79-85.
5. Afanas'ev V.A., Chudetskii G.M., Chudetskii Yu.V. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta*, 2011, vol. 18, no. 2, pp. 52-55.
6. Novikov L. S., Nadiradze A. B., Bednyakov S. A., Gavryushin A. V. *Trudy MAI*, 2000, no. 1, available at: <http://www.mai.ru/science/trudy/eng/published.php?ID=34739>
7. Kovalev R.V., Lunev V.V., Minyushkin D.N. *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2000, no. 18, pp. 119-126.
8. Semkin N.D., Sukhachev K.I., Dorofeev A.S. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2015, vol. 14, no. 4, pp. 171-191.
9. Sukhachev K.I., Semkin N.D., Piyakov A.V., Il'in E.A., Vidmanov A.S. *Patent RU № 2554054 C1*, 20.06.2015.
10. Sukhachev K.I. *Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroenie*, 2015, vol. 14, no. 1, pp. 177-189.