

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОТОКА ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЧАСТИЦ НА МАТЕРИАЛЫ И ЭЛЕМЕНТЫ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

© 2011 Н. Д. Сёмкин, М. П. Калаев, А. М. Телегин

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

Воздействие микрометеороидов и частиц космического мусора на материалы и открытые элементы конструкций космических аппаратов в условиях длительной эксплуатации приводит к деградации их характеристик. Для экспериментального моделирования метеорного и техногенного воздействия на поверхности оптического стекла разработана и изготовлена установка, включающая электродинамический ускоритель, систему регистрации и обработки информации. Экспериментальный стенд позволяет решить следующие задачи:

- определение основных механизмов, приводящих к деградации материалов;
- определение экспериментальных зависимостей деградационных характеристик от массы и скорости потока частиц.

Оптическое стекло, коэффициент пропускания, микрометеороидный поток, кратер, электродинамический ускоритель.

Введение

В последние годы сохраняется тенденция увеличения концентрации высокоскоростных техногенных пылевых частиц на околоземных орбитах. По некоторым данным, уже сейчас концентрация техногенных пылевых частиц в три раза превышает концентрацию микрометеороидов естественного происхождения. Учитывая все повышающиеся требования к надежности и долговечности космических аппаратов, а также появление множества новых материалов, необходимо дальнейшее развитие исследований процессов взаимодействия высокоскоростных пылевых частиц с материалами элементов конструкции космических аппаратов.

Стоит отметить, что в последнее время в космической промышленности появляются и находят применение новые материалы, что обуславливает необходимость проведения ударных экспериментов. Для имитации воздействия микрометеороидов и техногенных частиц на материалы конструкций КА, а также для создания и калибровки новых микрометеороидных датчиков существуют различные способы ускорения пылевых частиц в лабораторных условиях.

Оборудование и методика проведения эксперимента

В [1] приведено описание конструкции и принципа действия линейного ускорителя для моделирования микрометеороидов, использующего электродинамический метод ускорения частиц. Данный ускоритель позволяет моделировать в лабораторных условиях столкновения микрометеороидов размером 0,1...10 мкм и скоростями 1...15 км/с с различными материалами.

На рис. 1 приведена структурная схема линейного ускорителя для моделирования микрометеороидов, тракт которого так же, как и у прототипа состоит из инжектора, линейного электростатического ускорителя (ЛЭСУ), линейного электродинамического ускорителя (ЛЭДУ), трёх измерительных линеек и камеры для экспериментов. Вакуум в системе обеспечивают две откачные системы, каждая из которых состоит из вакуумного диффузионного масляного агрегата АВМД - 250, форвакуумного насоса НВПР - 16 и необходимых задвижек (КВЭ-63). Предельное остаточное давление в системе составляло 10^{-5} мм рт. ст..

Фотография ускорителя для моделирования микрометеороидов приведена на рис. 2. Остановимся на основных узлах тракта. В

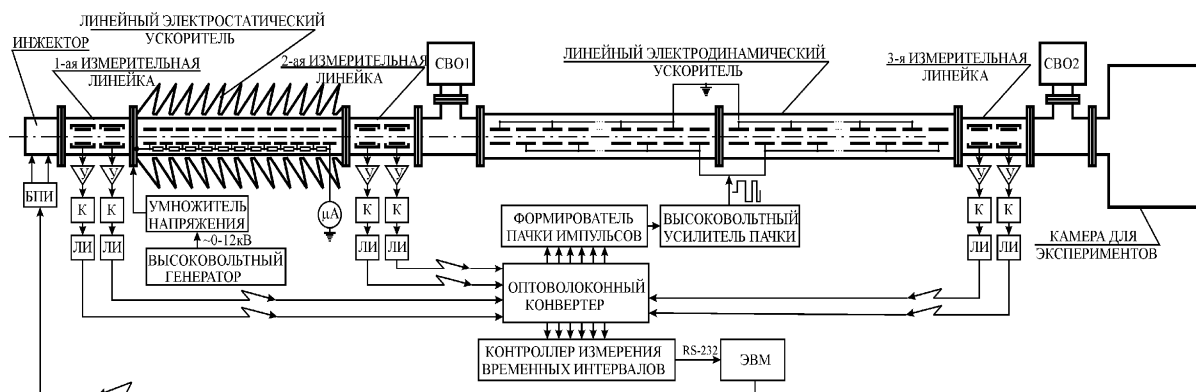


Рис. 1. Структурная схема линейного ускорителя микрометеоритов:
 У – усилитель; К – компаратор; ЛИ – лазерный излучатель;
 СВО1, СВО2 – система вакуумной откачки 1 и 2 соответственно; БПИ – блок питания инжектора



Рис. 2. Ускоритель для моделирования микрометеороидов

конструкцию инжектора заряженных частиц [2] не было внесено никаких изменений, так как он достаточно хорошо зарекомендовал себя при работе с различными порошками.

Однако при работе ускорителя наблюдалась неравномерность потока инжектируемых частиц. Вследствие случайных процессов, протекающих в инжекторе, а также

из-за флуктуаций напряжений на зарядном и бункерном электродах, интервалы следования между частицами не были периодическими. Это приводило к неравномерности разрядки конденсаторных батарей высоковольтного усилителя пачки, а следовательно, к потере частиц.

Иногда поток частиц был достаточно плотным даже для того, чтобы система измерения параметров частиц и формирователь пачки импульсов успевала идентифицировать каждую частицу. При работе ускорителя приходилось постоянно отслеживать интенсивность следования частиц и при необходимости регулировать напряжение на бункерном электроде. Для автоматизации данного процесса в описываемом ускорителе управление блоком питания инжектора осуществляется по оптическому каналу через последовательный порт ЭВМ. Программа, которая осуществляет сбор и предварительную статистическую обработку данных о частицах, отслеживает периодичность следования частиц и регулирует напряжения на бункерном и зарядном электродах инжектора.

Результаты экспериментов

Исследование кратеров после воздействия алюминиевых частиц на кварцевое стекло с нанесенной платиновой пленкой

В ходе данного эксперимента в камеру устанавливалось кварцевое стекло, на поверхность которого была нанесена пленка из платины толщиной $\sim 0,2$ мкм. Затем образец подвергался воздействию высокоскоростных пылевых частиц. Скорости частиц при ударе находились в диапазоне от 1 до 12 км/с. На рис.3,а приведено изображение кратера от удара низкоскоростной частицы. На рис.3,б приведена кривая, соответствующая атомарному составу на поверхности.

Как видно из рис.3,а, частица имела недостаточную скорость, чтобы полностью

испариться при ударе о поверхность кварцевого стекла. Частично материал частицы (в данном случае алюминий) находится в кратере и рядом с ним. Нахождение в зоне кратера алюминия подтверждает рис. 3,б.

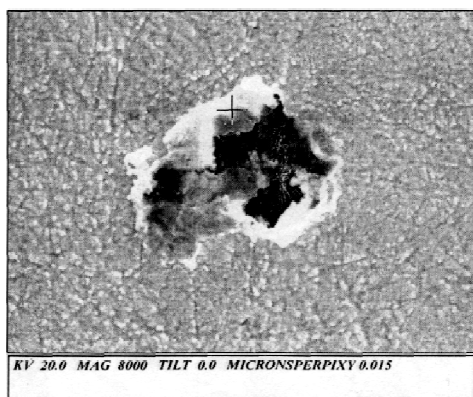
Размер полученного кратера в несколько раз больше размера частицы и зависит от скорости частицы при ударе. Наиболее вероятная скорость частиц в эксперименте составляла 5,5 км/с. Исходя из этого, можно заключить, что размер частицы для кратера на рис. 3,а составляет около 1 мкм.

Данные результаты хорошо согласуются с элементами теории механики соударения со сверхвысокими скоростями [3]. Не вдаваясь в подробности теоретических исследований, приведенных в литературе, отметим некоторые практически важные факты.

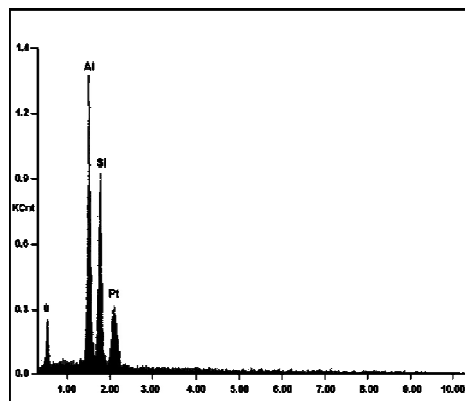
При отличии плотностей двух соударяемых материалов не более чем в два раза либо при скорости удара свыше 5 км/с, когда практически при любых материалах пар кратер при прямом ударе принимает полусферическую форму, глубину и диаметр кратера можно определить согласно следующим формулам [3]:

$$h_0 = 0,5 \left(\frac{\rho_p V_p}{\rho_s E_p} \right)^{\frac{1}{3}}, d_k \approx 2h_0, d_i \approx kd_k,$$

где E_p – удельная энергия кратерообразования, d_k – диаметр кратера, d_n – диаметр поврежденной зоны, k – коэффициент, характеризующий размер поврежденной околokrатерной



а)



б)

Рис. 3. Изображение кратера на поверхности стекла (а), атомарный состав поверхности кратера (б)

зоны. Для стеклянных поверхностей $k \approx 2,5$.

На рис.4. приведены расчётная зависимость диаметра кратера от диаметра частицы при различных скоростях соударения (кривая 1) и экспериментальная (кривая 2), полученная при усреднении результатов многократных экспериментов.

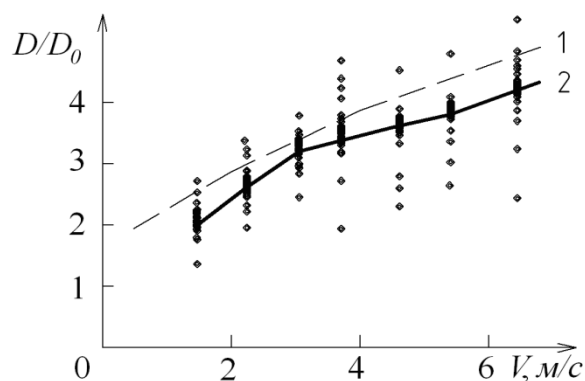


Рис. 4. Зависимость диаметра кратера от диаметра частицы при различных скоростях соударения

Исследование кратеров после воздействия алюминиевых частиц на мишень из титана

Методика проведения эксперимента была такой же, как и в предыдущем разделе. На рис.5,а приведена зависимость атомарного состава в области кратера на поверхности титановой мишени. На рис.5,б дано изобра-

жение кратера, полученное с помощью электронного микроскопа.

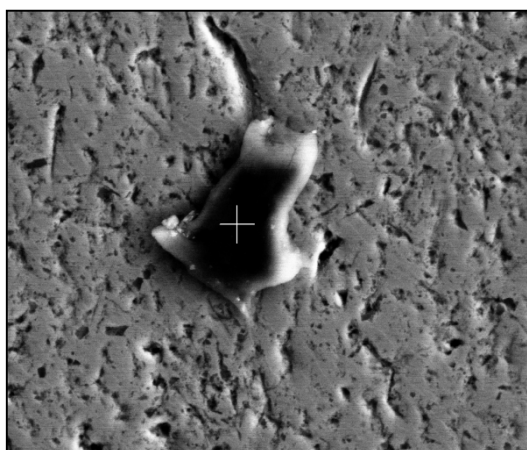
Как видно из рис.5,а, в области кратера остался материал частицы, что свидетельствует о том, что частица “застряла” в мишени. Скорость частицы в момент соударения составляла около 4 км/с.

Исследование оптических свойств кварцевого стекла после воздействия потока алюминиевых частиц

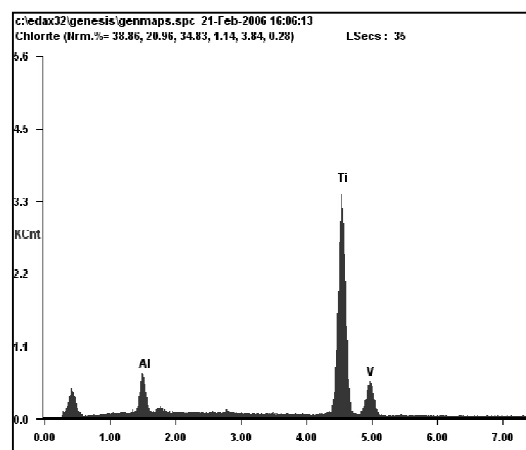
Как известно, характер рассеяния света в дисперсной среде зависит от типа неоднородностей и их расположения в пространстве. Эффективность рассеяния излучения на отдельном поверхностном дефекте, образованном в результате бомбардировки оптических элементов мелкодисперсными частицами, определяется оптическими постоянными вещества, из которого состоят эти элементы, размером дефекта, его формой, внутренней структурой и т.д. Диаметр и глубина проникновения дефекта зависят от размеров и кинетической энергии частицы, а также от физико-механических свойств материалов частицы и поверхности.

Поверхностные дефекты можно разделить на три группы:

1. Пустотелые кратеры.
2. Кратеры, заполненные (частично или полностью) материалом аэрозольной частицы или продуктами сгорания.



а)



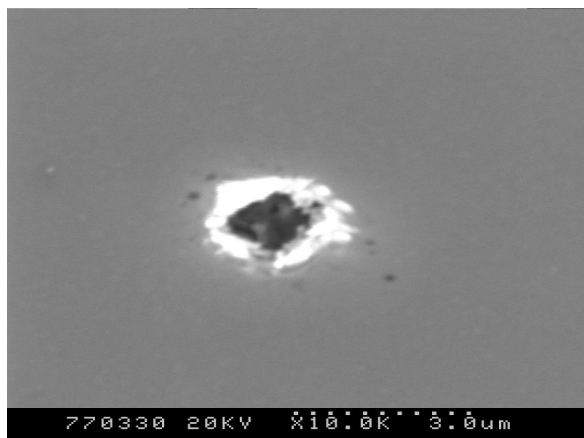
б)

Рис. 5. Изображение кратера на поверхности титана (а) и атомарный состав поверхности кратера (б)

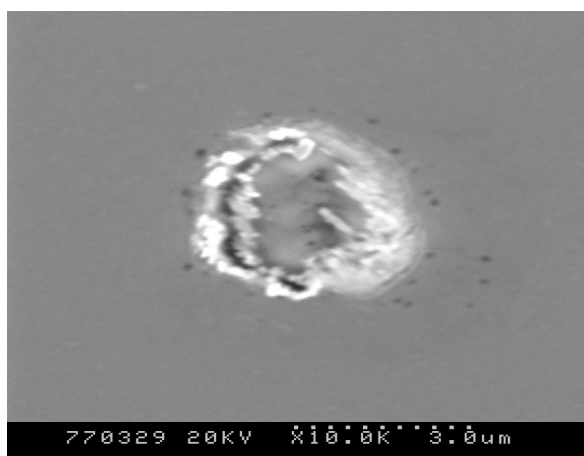
3. Пустотелые или заполненные кратеры с ореолом из микродефектов в материале оптического элемента.

Пустотелые и заполненные кратеры можно считать сферически симметричными. Так как реальные кратеры имеют размеры 2...5 мкм, то необходимо использование модели, описывающей взаимодействие видимого и ИК-диапазона с такими типами неоднородностей. С элементами теории рассеяния волн в неоднородных средах можно ознакомиться в [4].

В ходе данного эксперимента в качестве мишени использовалось оптическое стекло. Материал частиц – алюминий. На рис. 6,а приведена фотография кратера с характерным размером 2 микрона, на рис 6,б – кратер размером 4 микрона.



а)



б)

Рис. 6. Фотография кратера с характерным размером 2 мкм (а) и 4 мкм (б)

В процессе эксперимента изменялся коэффициент полного пропускания

$$K_t = \frac{F_f}{F_r},$$

где F_r и F_f - соответственно воздействующий и обратный световые потоки в зависимости от длины волны.

Исходным значением является коэффициент пропускания чистых образцов.

Коэффициент ослабления равен

$$K_s = \frac{K_{t1}}{K_{t2}},$$

где K_{t1} - коэффициент пропускания чистых образцов, K_{t2} - коэффициент пропускания после экспонирования.

Функциональная схема экспериментальной установки представлена на рис. 7. В качестве источников световых волн использована матрица ярких светоизлучающих диодов с длиной волны 0,35...0,9 мкм, а также светодиод белого свечения со спектром излучения, близким к солнечному свету. Это позволяет измерить изменение характеристик во всём диапазоне длин световых волн, а также выявить специфические эффекты при размерах МДЧ, близких к длине волны источника света.

Использование двух каналов (опорного и измеряемого) с инструментальным усилителем на входе позволило свести к минимуму составляющие погрешности, вызванные изменением температуры окружающей среды и изменением свойств источников световых волн. Начальный разброс характеристик опорного и измеряемого каналов устраняется фазой калибровки, которая происходит автоматически при включении устройства.

Данные измерений и настройки устройства передаются в ЭВМ, где производится дальнейший анализ результатов. Комплекс принятых мер позволил получить точность измерения не ниже 0,02%.

Параметры частиц измеряются при помощи двух датчиков на выходе ускорителя – индукционного и ионизационного. На входе индукционного датчика установлена заземлённая экранирующая сетка, осуществляющая защиту от наводок, источником которых

является электродинамический контур ускорителя.

На рис. 8 показано изменение коэффициента полного пропускания стекла в зависимости от количества попавших на поверхность частиц для различных длин световой волны.

Также проводилось исследование прозрачности стекла при помощи спектрофотометра. На рис. 9 показано изменение коэффициента пропускания до воздействия на стекло частицами (кривая 1) и после проведения экспериментов на электродинамическом ускорителе (кривая 2).

Как видно из рис.9, в диапазоне длин волн от 500 до 870 нм, при воздействии на поверхность стекла площадью 5 см² потоком

из 3000 частиц наблюдается уменьшение коэффициента пропускания примерно на 0,7%.

Кроме того, проводилось сравнение экспериментальных данных с теоретическими расчётами, полученными с использованием теории рассеяния волн в неоднородных средах [4].

С помощью разработанного прибора измерения деградации материалов под воздействием высокоскоростных пылевых частиц возможно исследование как поведения элементов конструкций КА в условиях воздействия потоков пылевых частиц, так и выполнение тарировки различных детекторов микрометеороидов и частиц космического мусора.

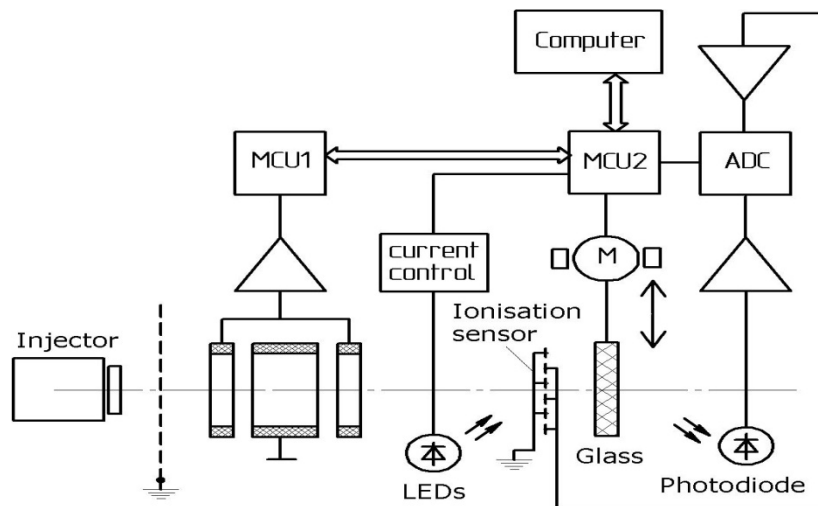


Рис. 7. Функциональная схема измерительной установки

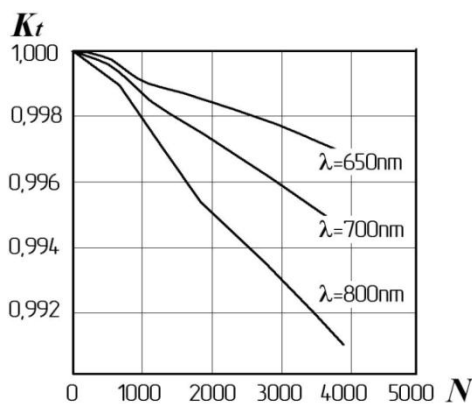


Рис. 8. Изменение коэффициента пропускания стекла в зависимости от количества частиц

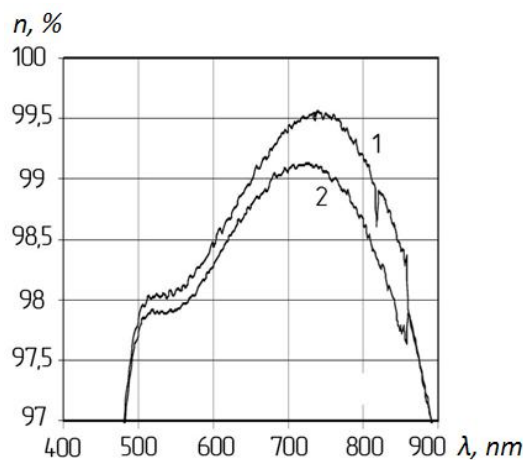


Рис. 9. Зависимость изменения коэффициента пропускания стекла от длины световой волны

Библиографический список

1. Сёмкин, Н. Д. Линейный ускоритель для моделирования микрометеоритов [Текст] / Н. Д. Сёмкин, А. В. Пияков, К. Е. Воронов, Н. Л. Богоявленский, Д. В. Горюнов // Приборы и техника эксперимента.– 2007. - №2 – С. 140-147.
2. Сёмкин, Н. Д. Инжектор заряженных пылевых частиц [Текст] / Н. Д. Сёмкин, А. В. Пияков, К. Е. Воронов, Н. Л. Богоявленский, С. М. Шепелев // Приборы и техника эксперимента.– 2006. - №3. – С. 154-159.
3. Хэллон, Ф. Механика соударения со сверхвысокими скоростями [Текст] / Ф. Хэллон, Сфифт // В кн.: Динамика удара. – М.: Мир, 1985. – 341с.
4. Исимару, А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах [Текст] / А. Исимару. – М.: Мир, 1981. – 356 с.

MODELING OF HIGH SPEED FLOW OF PARTICLES IMPACT ON MATERIALS AND STRUCTURAL ELEMENTS OF THE SPACECRAFT

© 2011 N. D. Semkin, M. P. Kalaev, A. M. Telegin

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolev
(National Research University)

The impact of micrometeoroids and space debris on materials and structural elements of the open space vehicles in long-term use leads to degradation of their characteristics. For the experimental simulation of the meteor and human impact on the surface of optical glass is designed and manufactured unit, which includes an electro-accelerator system of registering and processing information. Experimental stand allows the following tasks:

- identify the main mechanisms leading to the degradation of materials;
- determination of the experimental curves of degradation characteristics of the mass and velocity of the particles.

Optical glass, transmittance, micro-meteoroid stream, crater, an electrodynamic accelerator.

Информация об авторах

Сёмкин Николай Данилович, директор института космического приборостроения, д.т.н, профессор кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: semkin@ssau.ru. Область научных интересов: высокоскоростной удар, масс-спектрометрия, космическое приборостроение.

Калаев Михаил Павлович, аспирант кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sgau5@yandex.ru. Область научных интересов: высокоскоростной удар, космическое приборостроение.

Телегин Алексей Михайлович, аспирант кафедры радиотехники и медицинских диагностических систем, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: sgau5@yandex.ru. Область научных интересов: высокоскоростной удар, космическое приборостроение.

Semkin Nikolay Danilovich, director of the institute of space device engineering, doctor of technical sciences, professor, department of radio engineering and medical diagnostic systems, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: semkin@ssau.ru. Sphere of scientific interests: high-speed impact, mass spectrometry, space devices development.

Kalaev Mikhail Pavlovich, post-graduate student of radio engineering and medical diagnostic systems department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: sgau5@yandex.ru. Sphere of scientific interests: high-speed impact, space devices development.

Telegin Aleksey Mikhailovich, post-graduate student of radio engineering and medical diagnostic systems department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: sgau5@yandex.ru. Sphere of scientific interests: high-speed impact, space devices development.