

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

М.П. КАЛАЕВ, А.М. ТЕЛЕГИН

КОНСТРУИРОВАНИЕ АППАРАТУРЫ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА И МИКРОМЕТЕОРОИДОВ НА ПОВЕРХНОСТЬ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для обучающихся по основной образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 11.04.03 Конструирование и технология электронных средств

САМАРА

Издательство Самарского университета
2020

ISBN 978-5-7883-1560-7

© Самарский университет, 2020

УДК 629.78(075)
ББК 39.6я7
К170

Рецензенты: д-р техн. наук, доц. А. И. Д а н и л и н;
д-р физ.-матем. наук, проф. Д. П. Т а б а к о в

Калаев, Михаил Павлович

К170 Конструирование аппаратуры для регистрации воздействия космического мусора и микрометеороидов на поверхность космического аппарата: учебное пособие / М.П. Калаев, А.М. Телегин; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Самарский университет. – Самара: Издательство Самарского университета, 2020. – 1 CD-ROM (3,4 Мб). – Загл. с титул. экрана. – Текст: электронный.

ISBN 978-5-7883–1560-7

Изложены основные физические эффекты, наблюдаемые при высокоскоростном соударении микрометеороидов и частиц космического мусора с поверхностью космического аппарата. Особое внимание уделено исследованию процесса деградации материалов в окружающем космическом пространстве. Также приведены конструкции датчиков для регистрации высокоскоростных микрочастиц, основанные на различных физических принципах.

Предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 11.04.03 Конструирование и технология электронных средств и 11.05.01 Радиоэлектронные системы и комплексы.

Подготовлено на кафедре конструирования и технологии электронных систем и устройств.

УДК 629.78(075)
ББК 39.6я7

Минимальные системные требования:

PC, процессор Pentium, 160 МГц;
Microsoft Windows XP; мышь; дисковод CD-ROM;
Adobe Acrobat Reader.

© Самарский университет, 2020

Редактор И.И. Спиридонова
Компьютерная вёрстка И.И. Спиридоновой

Подписано для тиражирования 20.11.2020.

Объем издания 3,4 Мб.

Количество носителей 1 диск.

Тираж 10 дисков.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С. П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

443086, Самара, Московское шоссе, 34.

Издательство Самарского университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ	6
ВВЕДЕНИЕ.....	7
Глава 1 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКОВ МИКРОМЕТЕОРОИДОВ, УДАРНЫХ ДЕФЕКТОВ И МЕТОДЫ ИХ ИЗУЧЕНИЯ.....	9
1.1 Анализ источников высокоскоростных частиц на околоземных орбитах.....	9
1.2 Модели распределения и долгосрочный прогноз антропогенного загрязнения околоземного космического пространства.....	11
1.3 Анализ дефектов поверхности, возникающих при высокоскоростном ударе.....	17
1.4 Методы и средства изучения деградации элементов конструкции космического аппарата в космических условиях.....	24
1.5 Приборы для исследования деградации оптических элементов ...	29
1.6 Приборы для оценки изменения характеристик солнечных батареи.....	32
1.7 Приборы для оценки изменения характеристик терморегулирующих покрытий.....	33
1.8 Основные проблемы и требования к прибору для оценки деградации оптических материалов.....	35
Список использованной литературы	38
Глава 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИБОРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕГРАДАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА.....	40
2.1 Методы моделирования потоков высокоскоростных пылевых частиц в лабораторных условиях.....	40
2.2 Исследование деградации характеристик оптических материалов.....	47
2.3 Исследование индикатрисы рассеяния с помощью установки с поворотным фотоприёмником.....	50
2.4 Исследование деградации характеристик солнечных батарей.....	56
2.5 Исследование деградации характеристик ТРП.....	58
Список использованной литературы	66
Глава 3 ЭФФЕКТЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ С МАТЕРИАЛАМИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ.....	68
3.1 Поляризация материалов мишени при высоком давлении, вызванном высокоскоростным ударом.....	69

3.2 Вакуумный пробой промежутка «частица – преграда»	70
3.3 Внесение вещества частицы в преграду	71
3.4 Кратеообразование	71
3.5 Ионизация	73
3.6 Фотоэмиссия	76
3.7 Электромагнитное излучение.....	79
3.8 Тепловой эффект	80
3.9 Изменение электропроводности.....	81
Список использованной литературы	82
Глава 4 КОНСТРУКЦИЯ ПРИБОРОВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МИКРОМЕТЕОРОИДОВ И КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА.....	88
4.1 Методы и средства регистрации частиц естественного и искусственного происхождения на основе тонких пленок.....	91
4.2 Комбинированные датчики	93
4.3 Пленочные конструкции на основе резистивных проводников	94
4.4 Датчик на основе пьезоэффекта	101
4.5 Матрица тонкопленочных конденсаторов	107
4.6 Датчик на основе регистрации ударной вспышки.....	108
4.7 Полупроводниковые датчики	110
4.8 Датчик на основе теплового эффекта при ударе.....	112
4.9 Сферический пленочный датчик.....	115
4.10 Несколько современных детекторов пылевых частиц	117
4.10.1 LDEX	117
4.10.2 DTS	118
4.10.3 ELDA	119
4.10.4 LAMA	119
4.10.5 NDA	120
4.11 Датчик МЕТЕОР, установленный на малом космическом аппарате АИСТ	121
Список использованной литературы	132
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	136

ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АМИ	– аппаратурные методы измерений
ВАХ	– вольтамперная характеристика
ЗЧУ	– зарядочувствительный усилитель
КА	– космический аппарат
КЗ	– короткое замыкание
КЧХ	– контрастно-частотная характеристика
МДЧ	– мелкодисперсионные частицы
МК	– микроконтроллер
МКС	– международная космическая станция
МТ	– многопараметрический датчик
ОКП	– окружающее космическое пространство
ПЧ	– пылевые частицы
СБ	– солнечная батарея
СИД	– светоизлучающий диод
ТРП	– терморегулирующее покрытие
ФКП	– факторы космического пространства
ФПФ	– функция передачи фазы
ХХ	– холостой ход

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время космические аппараты (КА) проектируются с учетом длительного пребывания их в космическом пространстве. Элементы конструкций таких аппаратов в полете подвергаются влиянию факторов космического пространства, в частности, воздействию частиц космического мусора, что может привести к выходу из строя дорогостоящего оборудования (солнечные батареи, антенны, радиаторы и т.д.). За большинством частиц следят наземными методами, но мелкие частицы (микрочастицы) не поддаются наблюдению (из-за малости их размеров), причем таких частиц много, к ним относятся и микрометеороиды. Поэтому для КА необходимо получать информацию о состоянии окружающей микрометеороидной обстановки, а также о частицах космического мусора в реальном времени. Для этого нужна современная научная аппаратура.

В июне 2007 г. на заседании Комитета ООН по использованию космического пространства в мирных целях приняты Руководящие принципы предупреждения образования космического мусора (документ A/62/20).

На сессии Генеральной Ассамблеи ООН в ноябре 2007 г. Руководящие принципы предупреждения образования космического мусора одобрены на самом высоком международном уровне (документ A/RES/62/217 от 01.02.08). Принципы носят рекомендательный характер и представляют собой первый документ, определяющий «кодекс поведения» в космосе. Начата работа в направлении выработки «правил дорожного движения» в космосе и контроля за их соблюдением.

Целый ряд аспектов (технических и юридических), связанных с проблемой космического мусора, требует дальнейшего внимательного изучения и анализа.

С увеличением срока функционирования космических аппаратов, появлением долгоживущих космических станций, проблема регистрации микрометеороидов и все возрастающего количества техногенных частиц, а также защита космического аппарата становятся более актуальными.

Исследования высокоскоростного взаимодействия твердых частиц с различными элементами конструкции космического аппарата проводятся с 50-х годов XX века с помощью ракет, а позднее – с помощью искусственных спутников Земли.

В 60-80-х годах было поставлено несколько десятков космических экспериментов по изучению физико-химических свойств частиц естественного и искусственного происхождения. В результате был накоплен опыт по созданию аппаратных средств регистрации частиц, методик проведения и обработки информации лабораторных и космических экспериментов. Имеющиеся экспериментальные данные о характеристиках потоков микрометеороидов и техногенных частиц имеют значительный разброс, что предполагает проведение дальнейших исследований в области создания более современных технических средств регистрации параметров высокоскоростных частиц. Аппаратура для исследования параметров микрометеороидов и частиц космического мусора базируется на самых различных физических эффектах: распространение ударных волн, ионизации, фотоэмиссии, радиоизлучения и т.д. Для улучшения качества построения первичных преобразователей необходимо изучать данные физические эффекты и проводить исследования на специализированном оборудовании.

В Самаре производятся ракетносители и спутники, которые ежегодно запускаются в космос, поэтому проблема разработки аппаратуры для контроля микрометеороидной обстановки должна стоять в одних из первых рядах, как сейчас и происходит за границей, где такая аппаратура запускается в космос достаточно часто, а уж лабораторные испытания проводятся непрерывно.

Глава 1 ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТОКОВ МИКРОМЕТЕОРОИДОВ, УДАРНЫХ ДЕФЕКТОВ И МЕТОДЫ ИХ ИЗУЧЕНИЯ

1.1 Анализ источников высокоскоростных частиц на околоземных орбитах

Длительное исследование пылевой компоненты атмосферы с помощью наземных и прямых методов измерения, а также использование средств для моделирования пылевых частиц (ПЧ) позволяет произвести разделение их на частицы естественного и искусственного происхождения [1]. Искусственные объекты и обломки преобладают в числе объектов, окружающих Землю. Но это утверждение не относится к частицам 0,1–0,001 см в диаметре, среди которых большую часть составляют метеориты. Эти частицы значительно отличаются от искусственных по материалу и динамическим свойствам. Относительная скорость искусственных объектов – 8–10 км/с, метеоритов – 20 км/с, при максимуме в 70 км/с.

Класс пылевых частиц искусственного происхождения – техногенных частиц – появился сравнительно недавно как побочный результат расширяющегося процесса освоения космического пространства. В связи с тем, что именно они на данный момент представляют основную опасность, вследствие более высокой концентрации наиболее опасных крупноразмерных фрагментов, для долгосрочных космических программ. Изучению техногенных частиц, процесса их образования и распределения в околоземном космическом пространстве посвящены практически все последние исследования.

Рассмотрим основные возможные источники техногенных пылевых частиц.

1. Утечка воздуха из отсека КА.

Одновременно с утечкой воздуха из отсека КА может происходить выброс пылевых частиц, находящихся в отсеке во взвешенном состоянии. Зная пылевой состав воздуха в отсеке КА и размеры отверстий, через которые происходит утечка воздуха, можно прогнозировать поток частиц и их размеры. По оценкам [1] скорости таких пылевых частиц лежат в диапазоне от 0 до 400 м/с.

2. Пыль с поверхности КА.

При выходе КА в космос на его поверхности будут находиться пылевые частицы разного состава, осевшие на стартовой площадке и в процессе подготовки КА к орбитальному полету. Согласно имеющимся данным, поверхностная плотность пылевых частиц составляет 7500 шт/м². Основными механизмами покидания ПЧ поверхности КА являются вибрации и удары. Главную роль в удержании ПЧ на поверхности играют Ван-дер-Ваальсовы силы. Вторым механизмом освобождения частиц с поверхности КА является электростатическое отталкивание, связанное с зарядкой КА в ионосферной плазме и воздействием солнечной радиации.

3. Пылевые частицы, образовавшиеся при работе двигателей и других систем КА.

Источником образования ПЧ может также является работа двигательных установок и функционирование отдельных систем КА. Пылевые частицы образуются при конденсации некоторых газовых компонент, а также слива топлива.

4. Абразивный износ, эрозия и абляция поверхностей.

По результатам анализа остатков частиц в ударном кратере на окне Shuttle orbiter, этот остаток содержал элементы, общие для КА. Это подтверждает предположение, что одним из источников микрочастиц является эрозия и разрушение поверхностей КА.

5. Взрывы и разрушения КА, отработавших верхних ступеней ракетносителей и разгонных блоков.

Пылевые частицы естественного происхождения – метеорные потоки. Их исследование началось еще в прошлом веке с чисто визуального наблюдения и определения направления потоков светящихся микрометеорных тел. С развитием техники увеличилось количество исследований, появились многочисленные каталоги, описывающие значительное количество роев, метеорных потоков, создаются модели их движения, определяются их источники. На основании анализа многочисленных результатов исследований орбит радио и фото метеоров, на основании некоторого сходства орбит комет и метеорных роев, ряд авторов делает вывод, что основным источником метеорных тел, в том числе и спорадических, в солнечной системе является распад комет.

1.2 Модели распределения и долгосрочный прогноз антропогенного загрязнения околоземного космического пространства

Целью прогнозирования засоренности околоземного пространства является предсказание количества объектов как функции времени, высоты снижения и размеров. Эти прогнозы играют важную роль в оценке необходимости применения мер по снижению засоренности, эффективности таких мер, а также влияния новых видов космической деятельности. Методы исследования эволюции космического мусора в настоящее время бурно развиваются. Наиболее распространенный подход к прогнозам его производства и эволюции (модели EVOLVE, MASTER и IDES) основан на отслеживании всех космических объектов методами небесной механики. Источники загрязнения космоса моделируются стохастически. Результаты затем усредняются по достаточно большому числу пробных расчетов. Недостатки подобного под-

хода очевидны: метод является слишком затратным по ресурсам и по расчетному времени, даже при использовании упрощенных статистически усредненных моделей загрязнения. Включение в традиционные модели более реалистичных моделей орбитальных разрушений и фрагментации, каждая из которых является затратной сама по себе, приводит к тому, что долговременные прогнозы становятся практически невозможными: расчетное время экспоненциально увеличивается с ростом числа столкновений при возникновении каскадного процесса самовоспроизводства мусора.

На рисунке 1.1 показано число ударов на 1 м^2 поверхности космического аппарата в год для орбиты МКС, полученное с помощью модели MASTER [2].

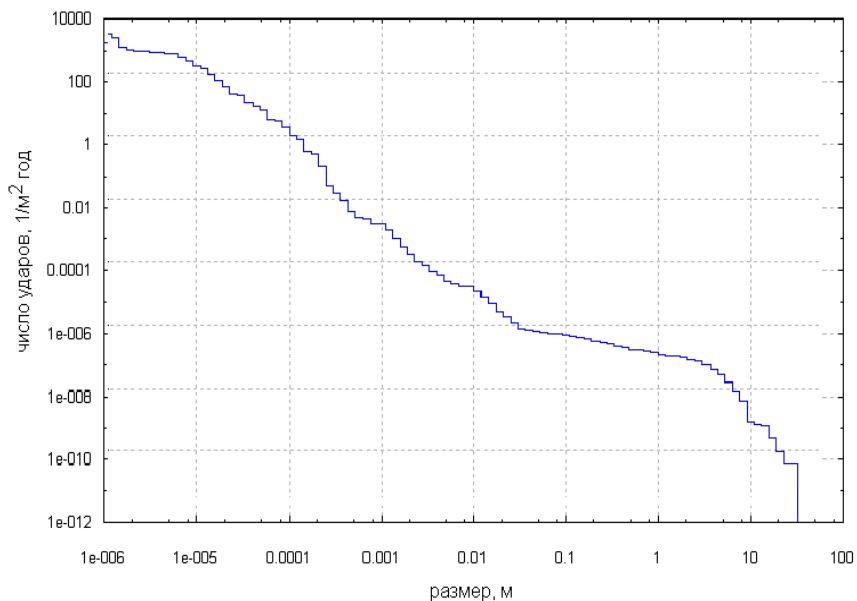


Рисунок 1.1 – Распределение частиц по размерам

Рассмотрим составление прогноза распределения частиц на основе модели MASTER европейского космического агентства (ESA). Модель MASTER реализует прогноз для следующих источников частиц космического мусора (в скобках указаны общепринятые сокращения):

- Объекты, связанные с осуществленными и будущими запусками КА (LMRO).
- Фрагменты взрывов на орбите (EXPL).
- Частицы, образованные при столкновении фрагментов (COLL).
- Продукты деградации поверхности КА – покрытия, краски (PAFL).
- Шлак, образованный при работе твердотопливных ракетных двигателей (SRMS).
- Пылевые частицы, образованные при работе твердотопливных ракетных двигателей (SRMD).
- Метеориты естественного происхождения (MTBG).
- Продукты удара частиц космического мусора о поверхность космических аппаратов (EJEC).
- Скопления частиц, образованных при разрушении космических аппаратов (CLOUD).
- Продукты разрушения многослойной изоляции (MLI).
- Аэрозоли теплоносителей на основе NaK (NAKD).

Типовые размеры частиц указанных источников космического мусора показаны на рисунке 1.2 [2].

Модель MASTER использует метод Монте-Карло для составления долгосрочного прогноза распределения частиц космического мусора на орбите. Исходными данными для моделирования являются: высота, склонение, прямое восхождение и время. Кроме того, в процессе моделирования учитывается эволюция фрагментов размером более 1 мм.

Результаты моделирования приведены на рисунке 1.3.

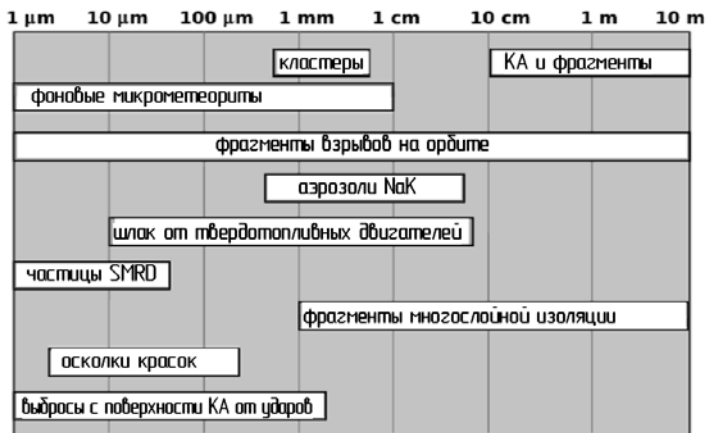


Рисунок 1.2 – Диапазоны типовых размеров частиц космического мусора от различных источников

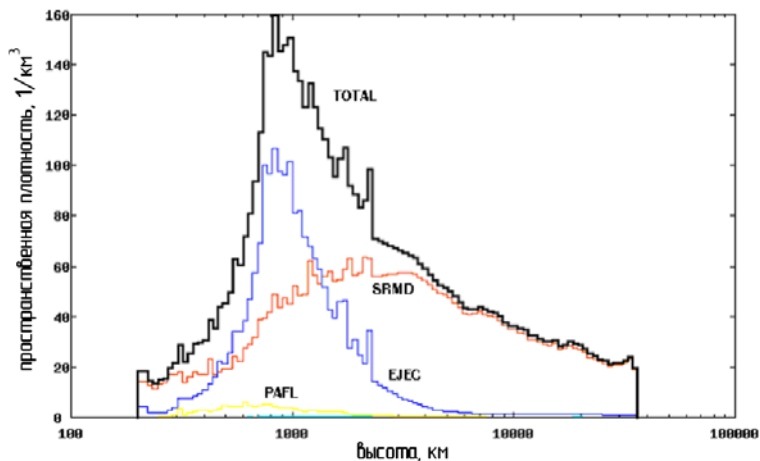


Рисунок 1.3 – Зависимость пространственной плотности от высоты за 2011 год для орбиты МКС ($51^\circ,6$, 340 км): SRMD – частицы, образованные при работе твердотопливных ракетных двигателей (Al_2O_3), PAFL – осколки покрытий и красок КА, EJEC – продукты удара частиц космического мусора о поверхность космических аппаратов, TOTAL – суммарная пространственная плотность

На рисунке 1.4 показано распределение частиц космического мусора по орбитам с различным наклоном за 2012 год. На графике видно, что распределение частиц космического мусора по высотам неоднородно, и образует пик концентрации в диапазоне высот 800-1000 км.

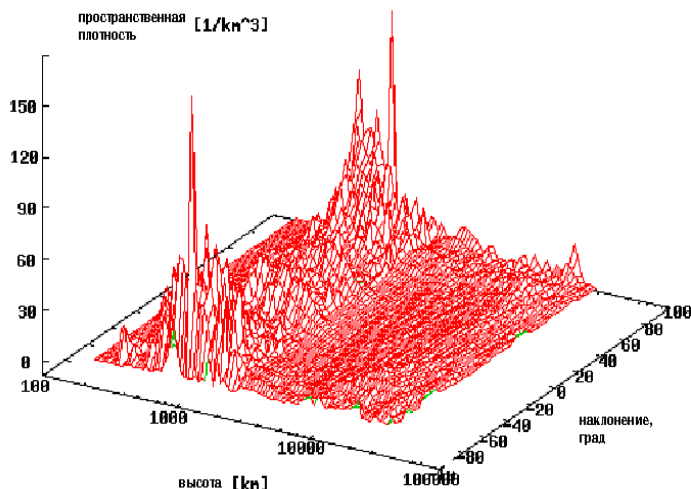


Рисунок 1.4 – Распределение частиц космического мусора по орбитам с различным наклоном на 2012 год

На рисунке 1.5 показано распределение частиц по скоростям и углам удара для КА.

Кроме того, ряд авторов составили прогноз роста числа космических объектов на орбите Земли на более долгосрочный период. В частности, в [3] указывается, что число космических объектов размером от 10 до 20 см увеличится в 3,2 раза, а увеличение числа более мелких фрагментов будет очень существенным: их количество увеличится в 13–20 раз (рисунок 1.6).

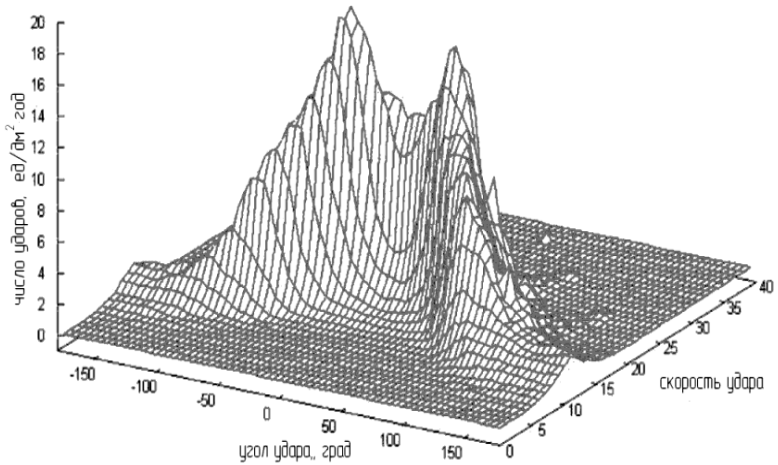


Рисунок 1.5 – Распределение частиц по скоростям и углам удара для КА на орбите 340 км / 51,6°. Моделирование с помощью MASTER на 2012 год

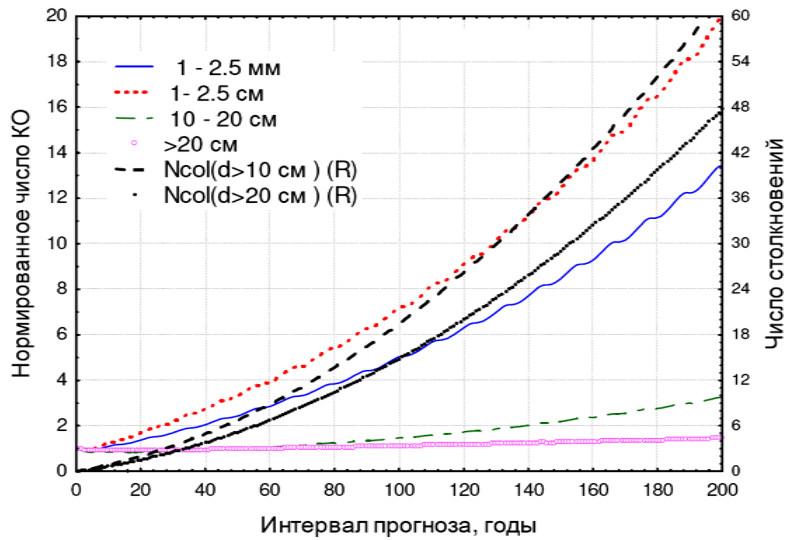


Рисунок 1.6 – Прогноз роста числа космических объектов

Характерной особенностью данных, показанных на рисунке 1.6, является экспоненциальный рост числа столкновений и числа мелких фрагментов космического мусора на интервале прогноза. При этом рост количества более мелких частиц (микронных размеров) предполагается еще более высоким, и в настоящее время не поддается прогнозированию. Таким образом, при сохранении интенсивности прироста числа каталогизированных КО на пережном уровне число мелких некаталогизированных объектов будет экспоненциально расти. Это означает, что лавинообразный рост техногенного загрязнения ОКП из гипотезы (синдром Кесслера) [4] превратился в реальность: он уже начался. Возможность предотвращения экспоненциального роста числа мелких фрагментов может быть достигнута при обнулении прироста числа новых КО крупного размера.

Однако в реальных условиях данная мера может оказаться недостаточной, так как методика оценки последствий столкновений, применяемая в настоящее время, не учитывает «вклад» столкновений объектов размером менее 1 см.

1.3 Анализ дефектов поверхности, возникающих при высокоскоростном ударе

Известно, что в результате высокоскоростного удара возможно образование дефектов различных типов. Параметры кратера, образуемого в мишени ударом частицы, зависят в первую очередь от скорости частицы и, соответственно, от совокупности процессов, протекающих при заданной скорости. Кинетическая энергия бомбардирующей частицы становится достаточной для преодоления предела упругости материалов при скоростях $\sim 0,1-0,3$ км/с. В этом случае при ударе частица заметно деформируется, а на поверхности мишени из пластичного материала (металла) образуется вмятина с отношением глубины к диаметру $H / D \leq 0,1$.

По мере увеличения скорости частицы последовательно достигаются пороговые скорости для процессов плавления (2–3 км/с), парообразования (10–15 км/с) и интенсивной термической ионизации паров (20–25 км/с). В соответствии с этим изменяется конфигурация кратера. Расплавленный материал выдавливается из кратера и при застывании образует вокруг него валик (бруствер). Глубина кратера увеличивается до $H / D \sim 1$, а дно кратера приобретает полусферическую форму. Испарение вещества из области удара носит взрывной характер, при котором растет диаметр кратера D , а глубина H изменяется незначительно. В общем случае, при достаточно высокой скорости бомбардирующей частицы в области удара, вещество присутствует одновременно в твердом, жидком и газообразном состояниях, причем пар может быть сильно ионизован. Схематически образование кратера в пластичной мишени изображено на рисунке 1.7 [4].

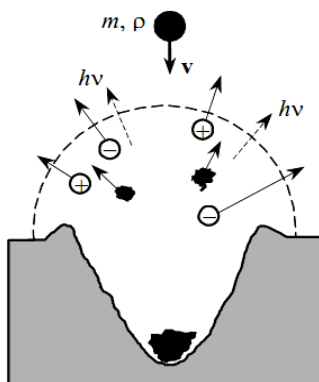


Рисунок 1.7 – Механизм образования кратера

На этом рисунке обозначены процессы выброса фрагментов вещества, эмиссии заряженных частиц и квантов электромагнитного излучения, а также показаны остатки бомбардирующей частицы на дне кратера. Основные виды механических повреждений пластич-

ной мишени, возникающих при высокоскоростном ударе, представлены на рисунке 1.8 [5].

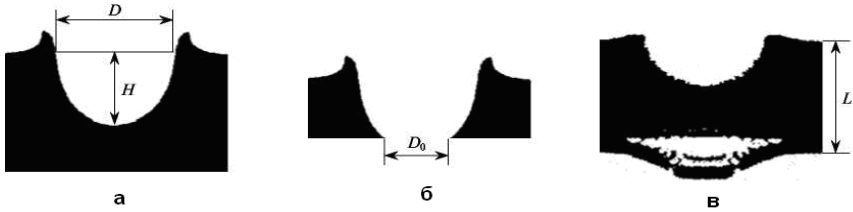


Рисунок 1.8 – Основные виды ударных кратеров

Получено много эмпирических и теоретических соотношений для описания связи параметров, характеризующих повреждение мишени, с параметрами бомбардирующей частицы. Здесь приведем лишь наиболее простые и часто используемые выражения. Отношение глубины кратера H к диаметру частицы d , плотность материала которой ρ , а скорость v , определяется следующим образом:

$$\frac{H}{d} = k\rho^\alpha v^\beta,$$

где $k=0,3-0,6$; $\alpha=1/3-1/2$; $\beta \approx 2/3$. Значения параметров k , α , β зависят от свойств материала мишени и рассматриваемого диапазона скоростей удара. Подобное выражение может быть использовано и для определения отношения D/d . На рисунке 1.9 показана область значений D/d для разных скоростей удара v , полученная при варьировании параметров в расчетном выражении. Диаметр отверстия в тонкой ($L/d < 0,5$) мишени (рисунок 1.9, б) определяется с помощью выражения

$$\frac{D_0}{d} = 2,4 \frac{v}{a} \left(\frac{L}{d} \right)^{\frac{2}{3}} + 0,9,$$

где a – скорость звука в материале мишени.

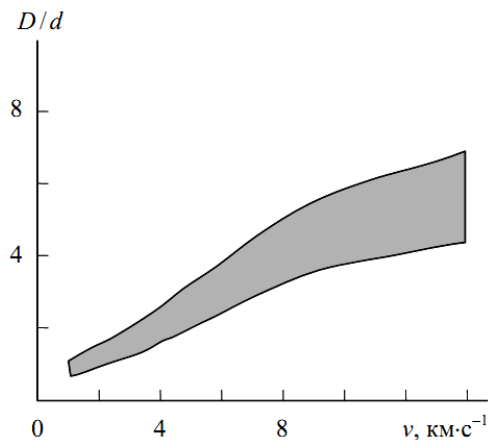


Рисунок 1.9 – Зависимость отношения диаметра кратера D к диаметру частицы d от скорости частицы v

Откольную пластину, отделяющуюся от задней поверхности мишени, принято характеризовать диаметром, который обычно составляет $(2-3)L$, и толщиной, лежащей в интервале $(0,1-0,5)L$. Процесс образования кратеров в хрупких материалах, в значительном количестве присутствующих на поверхности КА (защитные стекла солнечных батарей (СБ), линзы оптических устройств, иллюминаторы и т. п.), более сложен.

Для описания кратера, образованного ударом быстрой частицы о хрупкую мишень, обычно используются два значения диаметра кратера:

- диаметр центральной впадины D_p ;
- диаметр D_c , определяемый по максимальному размеру кольцевых трещин, которые образуются в хрупкой мишени вокруг центральной впадины. В некоторых случаях для описания поперечных размеров кратера используются и другие параметры, например, диаметр D_s , определяемый по максимальному разлету осколков, выброшенных из кратера.

Однако этот параметр обычно мало отличается от значения D_c , измерение которого, как правило, производится более надежно. Для определения диаметров кратера D_p и D_c используются следующие эмпирические выражения:

$$D_p = 0,1d \rho_{\text{ч}}^{2/3} \rho_{\text{М}}^{-1/2} v^{2/3}, \quad D_c = (2 - 5) D_p,$$

а для определения глубины кратера H – выражение:

$$H = 0,6d \left(\frac{\rho_{\text{ч}}}{\rho_{\text{М}}} \right)^{1/2} v^{2/3},$$

где d – диаметр бомбардирующей частицы; $\rho_{\text{ч}}$, $\rho_{\text{М}}$ – плотность вещества частицы и мишени; v – скорость соударения.

На рисунке 1.10 представлены схематические изображения кратеров, полученных в лабораторных экспериментах при бомбардировке различных материалов микрочастицами [5].

Кроме того, в ряде работ [6] исследовано влияние угла удара на форму образующегося дефекта. На рисунке 1.11 показана фотография типового кратера для удара под углами 0, 30, 45, 60, 70 и 80 градусов к нормали. На фотографиях видно, что при увеличении угла удара вплоть до 60 градусов не происходит существенного изменения формы кратера.

При этом характерный диаметр кратера D_c определяется следующим уравнением [6]:

$$D_c = 5 \cdot 10^{-4} d_p^{1,076} \rho_m^{-0,5} \rho_p^{0,743} V^{0,727} \cos^{0,601} \Theta,$$

где d_p – диаметр частицы; ρ_m – плотность материала; ρ_p – плотность частицы; V – скорость удара (см/с); Θ – угол удара.

На рисунке 1.12 показаны результаты численного моделирования удара частицы из стали диаметром 5 мкм о стекло со скоростями 2,5 км/с (*a*) и 6 км/с (*b*), предложенные в [7].

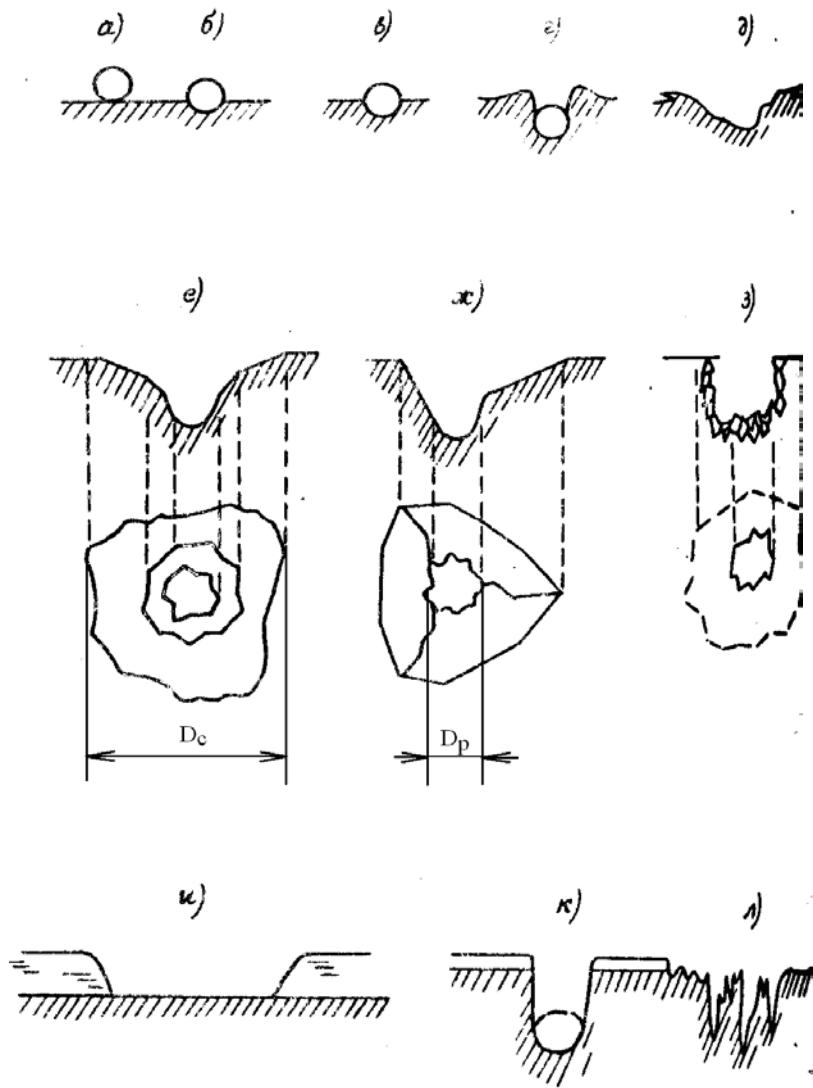


Рисунок 1.10 – Схемы дефектов: *a-d* – платинные материалы; *e* – стекло; *жс* – кремний; *з* – ситалл; *и* – многослойные структуры; *к, л* – стеклотекстолиты

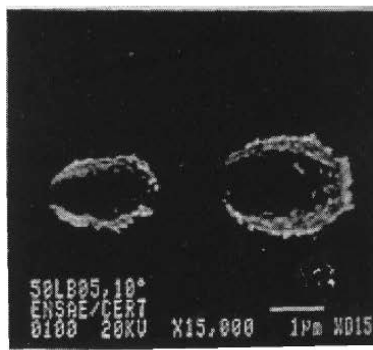
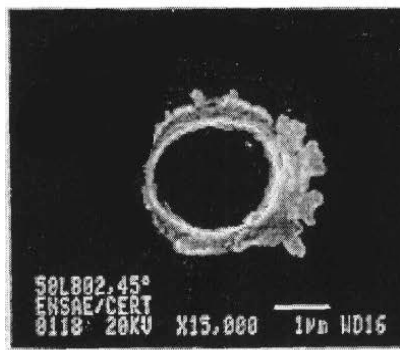
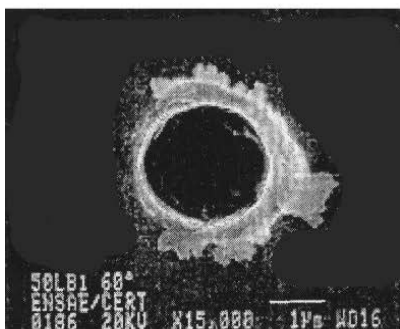
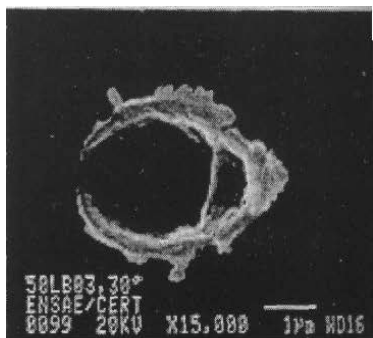
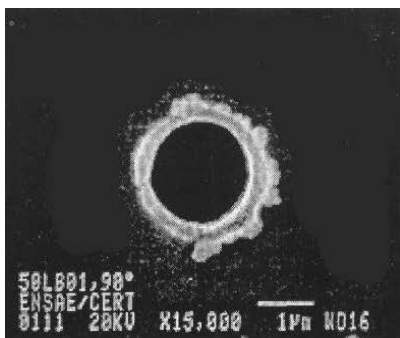


Рисунок 1.11 – Фотографии кратера при наклонном ударе

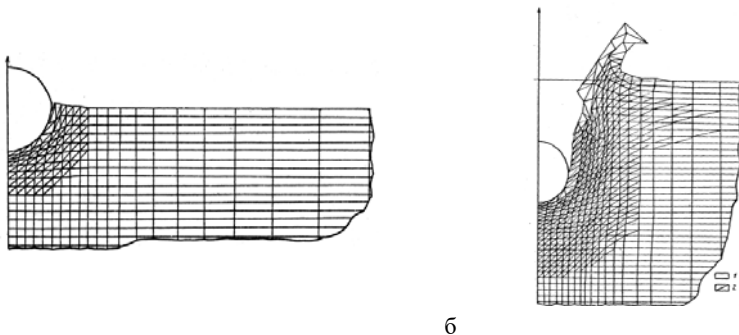


Рисунок 1.12 – Модель деформации преграды

Здесь моделирование проведено в предположении, что ударник абсолютно недеформируемый, в реальных условиях это не выполняется. Однако приведенные модели качественно иллюстрируют сложный характер процесса образования кратера при высокоскоростном ударе.

1.4 Методы и средства изучения деградации элементов конструкции космического аппарата в космических условиях

Лабораторные испытания с использованием ускорителей позволяют лишь косвенно судить о поведении материалов в условиях космической среды, вследствие сложности воспроизводства реальных характеристик потоков мелкодисперсных частиц (МДЧ) и космического мусора. Экспонирование образцов материалов на поверхности КА с последующим их исследованием является прямым методом изучения влияния потоков МДЧ. При этом возможны два подхода:

1) Экспонирование образцов с последующим их возвратом на Землю.

В настоящее время проводятся эксперименты по экспонированию образцов различных материалов на борту международной кос-

мической станции (МКС) с последующим их возвращением на Землю и исследованием (Эксперимент МРАС & SEED – изучение микрометеороидной обстановки на орбите МКС и получение экспериментальных данных о воздействии факторов космического пространства на образцы материалов, покрытий, элементов электронных и механических систем, планируемых к применению в перспективных космических разработках) [8]. Данный способ изучения деградации материалов является наиболее достоверным, но и самым дорогостоящим.

Экспериментальные исследования фрагментов солнечных батарей (СБ) ОКС «Мир», являвшейся в течение 10,5 лет своеобразным детектором метеорных и техногенных частиц, дают возможность провести уточнение существующих моделей пространственно-временного распределения частиц и их повреждающего воздействия [67, 68, 70].

Объектом исследования являлись СБ размером 40×45 мм. На одной из них обнаружено отверстие с диаметром поврежденной зоны ~5 мм и 20 кратеров. На других СБ обнаружено до 40 кратеров размером от 6 до 23 мкм. Площадь повреждений составляет около 30%.

Поверхность СБ имеет эрозионные повреждения в виде микрократеров на всей поверхности образца с равномерным распределением. Диаметр этих микрократеров составляет меньше 4-8 мкм. Подсчет эрозионных повреждений был проведен на участке 41,5×41,5 мкм, при этом было обнаружено, что суммарная площадь повреждений составляет ~ 34% площади поверхности.

Оценка плотности потока частиц с поперечными размерами ~1-5 мкм на основании результатов исследования СБ дает значения, близкие к данным используемых моделей. В то же время необходимо их постоянное уточнение в связи с ростом количества техногенных частиц в околоземном пространстве [20,25]. Из-за значительной площади поврежденной поверхности СБ, полученной в ходе экспериментов, может оказаться нецелесообразным применение покры-

тий типа $\text{SnO}_2\text{-I}_2\text{O}_3$ или MgF_2 на стеклах СБ низкоорбитальных КА с ресурсом 15-20 лет.

2) Экспонирование образцов в невозвращаемой аппаратуре со встроенными средствами диагностики свойств материалов [9].

При этом в средствах диагностики применяются два подхода:

– измерение деградации характеристик материалов, аналогичных используемым в штатных системах КА;

– прогнозирование измерения характеристик систем КА на основе данных об изменении физико-технических характеристик материалов.

Системы измерения оптических характеристик и шероховатостей, основанные на описанных выше методах, при достаточном быстродействии, соизмеримом с процессами воздействия, позволяют получать качественную и количественную информацию о параметрах воздействующего потока. В основном это относится к скорости и диаметру частиц. Так, метод измерения диаметров отверстия в тонких пленках (например, ЭВТИ) путем измерения их импеданса или пропускания светового потока, позволяет с помощью известных полуэмпирических соотношений получать данные о диаметре МДЧ.

Методы измерения коэффициентов направленного пропускания и отражения в оптическом и ИК-диапазоне хорошо известны и используются в классической оптике. Так, для измерения этих характеристик могут быть использованы методы измерения индикатрис направленного пропускания и отражения:

– пространственный гониометрический метод;

– метод циклической развертки пространственных индикатрис рассеяния;

– метод пространственного расположения приемников излучения.

На рисунке 1.13 показана классификация задач диагностики процессов взаимодействия потоков взаимодействия высокоскоростных частиц с элементами конструкции КА.

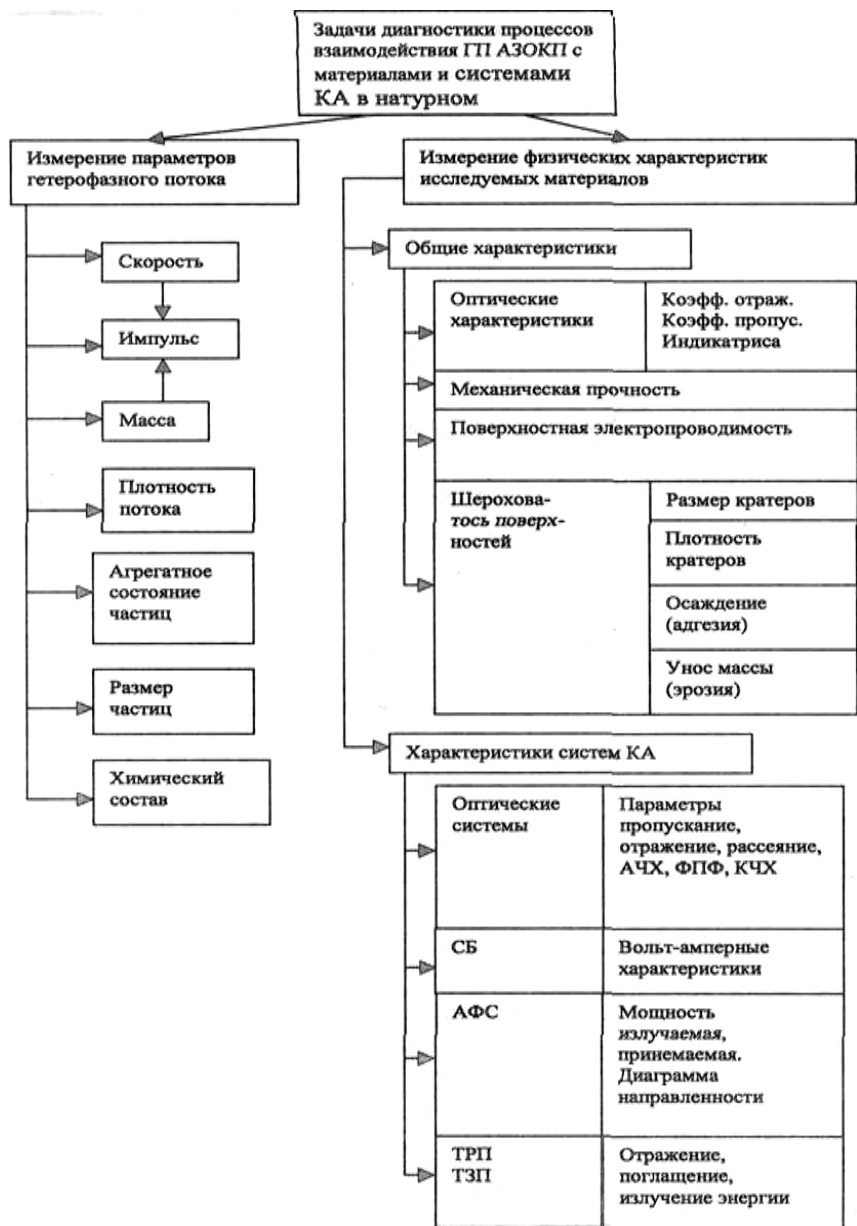


Рисунок 1.13 – Задачи диагностики процессов

В силу наличия у каждого из указанных методов определенных недостатков, целесообразно на практике использовать их сочетание. Так, например, энергетические характеристики солнечных батарей (СБ) можно прогнозировать на основе данных об эрозии или загрязнении поверхности кремния, стекла или отражателя-концентратора солнечного излучения, однако ввиду малогабаритности элементов СБ и простоты снятия вольтамперных характеристик (ВАХ) целесообразно исследовать в натуральных экспериментах изменение характеристик самих элементов СБ.

Оптические системы КА чрезвычайно разнообразны по своим характеристикам, назначению, конструкции, спектральным диапазонам. Использование штатных систем или их элементов на борту малого космического аппарата затруднено в силу ограничений габаритно-массовых характеристик, а также необходимости наведения системы на объект, о котором эта система должна получать информацию, или моделирование этого объекта. Так как оптические системы КА имеют в качестве входных элементов зеркала, линзы или плоскопараллельные защитные стекла, прогнозировать изменение их функциональных характеристик можно, исходя из измерений оптических характеристик материалов (коэффициенты направленного отражения и пропускания), дополнив их информацией об изменении контрастно-частотной характеристики (КЧХ), и функции передачи фазы (ФПФ), что особенно важно для систем, получающих изображение объекта. Однако измерение КЧХ и ФПФ неудобны для качественной экспериментальной экспресс-проверки оптических систем из-за своей сложности. Для оценки качества оптической системы можно использовать более простые методы измерения функции рассеивания с числовыми критериями в виде диаметра кружка рассеяния изображения точечного источника, коэффициента Штреля, ширины и угла наклона пограничной кривой [10].

Измерение характеристик элементов терморегулирования (ТРП, ТЗП, радиаторы) крайне затруднено в условиях натурального эксперимента на МКА в силу необходимости проведения измерений в области дальнего ИК-излучения, которые требуют больших габаритов, массы систем, стабильности внешних факторов и относительно большого времени измерения. В этих случаях наиболее удобным следует считать способ прогнозирования характеристик элементов терморегулирования на основе данных о шероховатости их поверхности.

Таким образом, по назначению приборы диагностики можно разделить на следующие группы:

- 1 Исследование оптики.
- 2 Исследование элементов солнечных батарей (ЭСБ).
- 3 Исследование ТРП.

1.5 Приборы для исследования деградации оптических элементов

При исследовании оптики невозможно создать единый сменный блок для исследования всех типов и материалов. Вероятно, для них важной характеристикой является изменение коэффициента пропускания под действием потока МДЧ. Коэффициент пропускания можно определить следующим выражением:

$$K_n = \frac{\Phi_1}{\Phi_2},$$

где Φ_1 – световой поток, падающий на оптический элемент, Φ_2 – световой поток, прошедший оптический элемент. K_n имеет для каждого типа материала свое спектральное распределение, следовательно, необходимо определять K_n для нескольких значений длины волны в рабочем диапазоне материала.

При исследовании кварцевой оптики диапазон исследования должен быть от 0,3 до 0,76 мкм, т.е. весь видимый и ультрафиолето-

вый участки спектра. При исследовании соляной и кремниевой оптики – инфракрасный диапазон. В случае, если достаточно иметь 5-6 точек измерения, можно предложить следующую схему фотометра (рисунок 1.14).

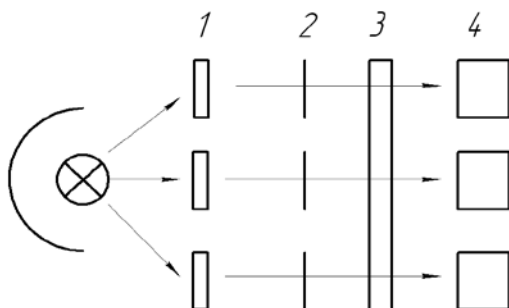


Рисунок 1.14 – Структурная схема оптического анализатора спектра:
 1 – светофильтры, 2 – фокусирующая оптика, 3 – исследуемый объект,
 4 – фотоприемники

Перед экспериментом снимается спектральная характеристика коэффициента пропускания, затем, после эксперимента, снимаются те же самые характеристики, таким образом можно компенсировать неравномерность спектра излучения. С помощью оптических фильтров можно получить разделение в диапазоне не более 30 дБ. С учетом неточности конструкции, фокусировки, спектра излучения, малогабаритного исполнения оптики погрешность измерения может достигать 60%.

Другим вариантом оптического анализатора спектра является конструкция, представленная на рисунке 1.15.

Рассмотрим оптическую схему фотометра, содержащего матрицу светоизлучающих диодов с длиной волны $\lambda_1 - \lambda_n$ (СИД) и фотоприёмник (рисунок 1.15).

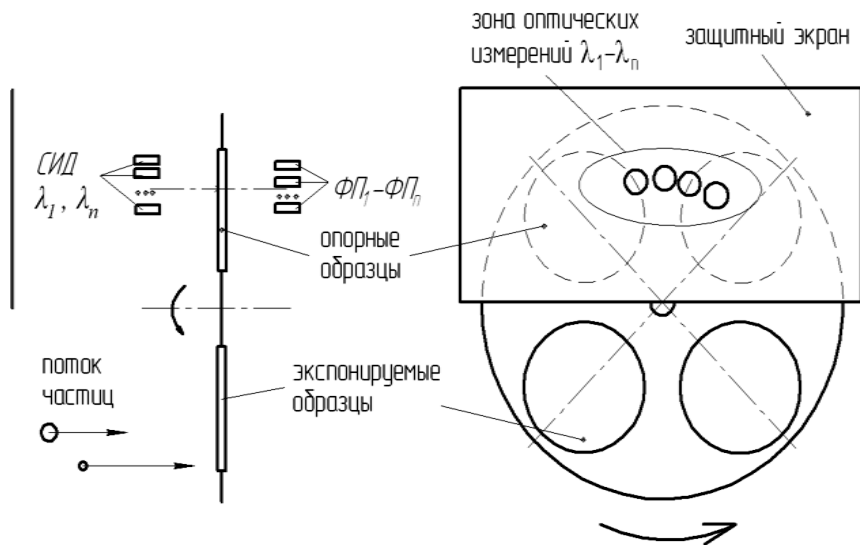


Рисунок 1.15 – Оптическая схема прибора

В зазоре между ними на подвижной (вращающейся) пластине расположены образцы исследуемых материалов. При этом часть образцов (экспонируемые) находится под воздействием ФКП, а часть смещена в сторону и закрыта защитным экраном.

По прошествии некоторого времени, необходимого для изменения характеристик открытых образцов, пластина приводится во вращение, и в фотоприёмнике поочередно возникают импульсы тока, соответствующие прохождению света через экспонированный и контрольный образец. С использованием современных схмотехнических средств, данный метод позволяет фиксировать относительное изменение коэффициента пропускания с точностью 0,1% и выше в нескольких точках спектрального диапазона (зависит от количества СИД).

1.6 Приборы для оценки изменения характеристик солнечных батарей

Снижение $\tau_{эл}$ приводит к уменьшению количества генерируемых носителей заряда и соответственно к уменьшению тока короткого замыкания $J_{кз}$. Для измерения характеристик солнечной батареи используется экспериментальная установка, показанная на рисунке 1.16 (слева). В вакуумной камере ускорителя установлены две солнечных батареи. Первая батарея ВАТ1 находится в зоне воздействия частиц, вторая ВАТ2 смещена в сторону. Выходы обеих солнечных батарей подключены ко входам дифференциального усилителя, а также к резисторам, имитирующим режим нагрузки, близкий к короткому замыканию (КЗ). На некотором расстоянии от батарей расположена мощная галогеновая лампа, которая включается во время измерения тока и напряжения. Результат измерений передаётся в ЭВМ.

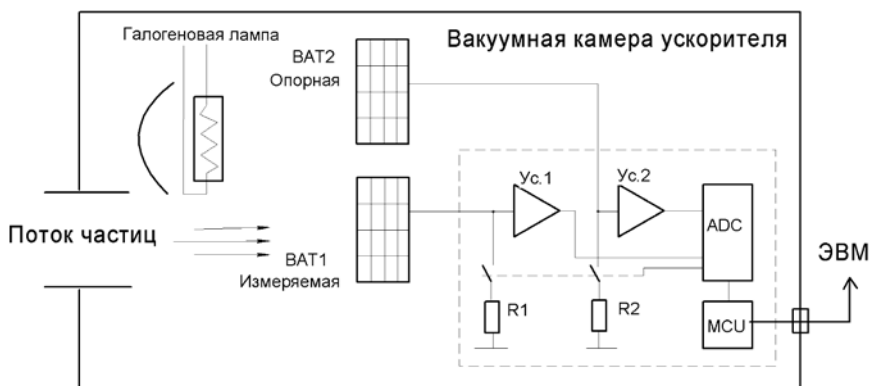


Рисунок 1.16 – Схема экспериментального исследования деградации солнечных батарей

Такая схема включения позволяет получить высокую точность измерения и уменьшить влияние температуры, так как поверхность обеих солнечных батарей находится в одинаковых условиях.

Описанная методика позволяет производить испытания солнечных батарей и делать прогноз относительно их ресурса на орбите при воздействии потоков микрометеоритов и частиц космического мусора (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Оценка деградации СБ под действием твердых частиц

Высота орбиты, км	Количество разрушающих ударов, $\text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$	Эрозия поверхности в год, %	Уменьшение тока в год, %
350-750 (экваториальная)	0,06	2-3	0,25
750-1000 (полярная)	0,1	3-4	0,3
36000 (геостационарная)	0,015	1-1,5	0,15-0,2

Результаты натуральных экспериментов до настоящего времени показывали уменьшение тока солнечных батарей порядка 0,2-0,3% в год, поэтому система регистрации изменения параметров должна иметь соответствующую чувствительность [11].

1.7 Приборы для оценки изменения характеристик терморегулирующих покрытий

Характеристиками ТРП являются два коэффициента: коэффициент поглощения A_g и коэффициент черноты. В принципе, оба коэффициента связаны законом Кирхгофа, поэтому достаточно определить один из них. Коэффициент поглощения можно определить фотометрическим способом, однако здесь существуют определенные трудности с выбором источника освещения, а также конструктивные сложности в проведении эксперимента. Для определения коэффициента черноты можно измерить излучательную способность ТРП, т.е. измерить температуру нагрева поверхности ТРП при из-

вестной подводимой мощности. Структурная схема бортового фотометра представлена на рисунке 1.17, где 1, 2, 3 – источники излучения, различной длиной волны, 4 – исследуемый образец, 5 – фотоприемник, 6 – усилитель, 7 – схема согласования, 8 – схема управления. Структурная схема для определения излучательной способности приведена на рисунке 1.18, где 1 – фотоприемники, 2 – оптические фильтры для различных длин волн, 3 – исследуемый объект, 4 – нагреватель, 5 – термодатчик, 6 – управляемый источник напряжения для нагревателя, 7 – блок усилителя, 8 – схема согласования, 9 – схема управления. Погрешность измерения достигает ~ 60%.

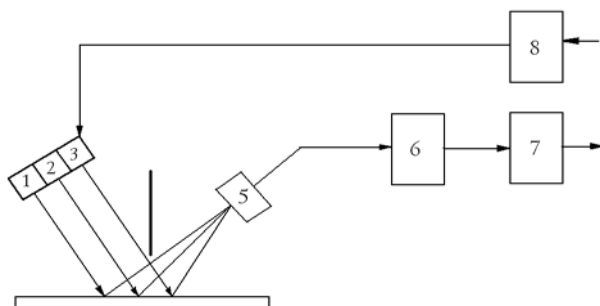


Рисунок 1.17 – Структурная схема бортового фотометра для ТРП

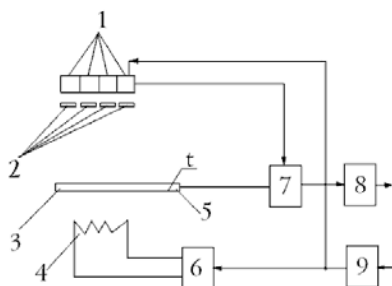


Рисунок 1.18 – Структурная схема измерителя для определения ϵ

В ходе космического эксперимента представляется возможным контролировать только коэффициент поглощения A_s .

1.8 Основные проблемы и требования к прибору для оценки деградации оптических материалов

1 Наиболее важным и необходимым требованием к преобразователю системы контроля деградации материалов является наличие математической модели соответствующего физического явления последствий взаимодействия частицы с контролируемым образцом (ударного кратера), а также импульса тока преобразователя как функции параметров ударносжатой поверхности.

В широком диапазоне размеров ударных дефектов (1-10 мкм и более) методы регистрации не могут быть проанализированы в рамках единой физической модели, кроме того, предпочтительным является получение аналитических выражений, описывающих корреляционные связи измеряемых параметров выходных сигналов и конструктивных параметров. Такие выражения могут быть получены из приближённых моделей ряда физических явлений.

Такой подход может иметь право на своё существование, хотя при этом ухудшается точность определения параметров ударных дефектов. Следует отметить, что точность измерения параметров частицы в ударных экспериментах, определяемая в значительной степени статистической природой того или иного исследуемого явления (процессов кратерообразования, ионизации, фотоэмиссии и т.д.) довольно низкая и может находиться в пределах точности расчётной модели.

Существование большого числа физических явлений, используемых в аппаратурных методах измерений (АМИ) – свидетельство сложности объекта исследования. Ни один из методов не может претендовать на универсальность при измерении состояния объекта исследования. Для ряда физических явлений известны лишь экспериментальные зависимости параметров сигнала от параметров объекта исследования. Как правило, при использовании одного метода часть

параметров задаётся априори, что существенно снижает точность измеренных параметров объекта исследования и ценность получаемой информации. Отказ от априорных данных предполагает необходимость совмещения АМИ при построении информационно-измерительной системы.

2 Учитывая сложный характер высокоскоростного взаимодействия частицы с преградой не менее важным требованием является обеспечение выбранного метода регистрации надёжной тарировкой, что само по себе представляет серьёзную проблему. Наиболее часто в качестве устройства для ускорения частиц используется электростатический ускоритель. В таком методе ускорения частицы размерами $0,05 \div 5$ мкм и скоростями $5 - 20$ км/с контролируются в процессе полёта, а их частота следования составляет в среднем 3-5 в секунду. Метод ускорения является наиболее удобным при проведении исследований процессов высокоскоростного взаимодействия частицы с преградой. К настоящему времени не представляется возможным создание ускорителя пылевых частиц в широком диапазоне масс и скоростей, подобно тому, как невозможно создать преобразователь пылевых частиц в диапазоне скоростей и масс соответственно $0,01 \div 70$ км/с и $10^{-16} \div 10^{-1}$ г.

3 Для существенного изменения характеристик образцов (единицы процента и более) в ходе натурального эксперимента требуется длительное время экспонирования (несколько лет), что не всегда является возможным. По этой причине необходима регистрация предельно малых изменений, при воздействии в то же время большого количества внешних дестабилизирующих факторов. Повышения точности можно достичь, используя метод сравнения экспонируемых образцов с опорными, защищенными от воздействующего потока.

4 Условия эксплуатации бортовой измерительной системы предъявляют жесткие требования к высокой надёжности функцио-

нирования и достоверности результатов измерений. Требования обеспечения высокой надёжности аппаратуры для регистрации частиц существенно влияет на выбор метода регистрации и конструкции прибора. Кроме того, например, способ совмещения датчиков, основанных на различных физических принципах, в единой конструкции преобразователя не только повышает достоверность результатов измерений, но и в ряде случаев – информативность устройства регистрации в целом.

5 Противоречивым требованием является соблюдение минимальных габаритно-весовых характеристик при значительных площадях чувствительной поверхности образцов исследуемых материалов. Площадь экспонируемой поверхности должна быть большой с целью получения информации, достаточной для статистической обработки и более точного построения распределения дефектов от микрометеороидов или техногенных частиц. Однако при этом снижается возможность постановки такой системы регистрации на космическом аппарате. Как показали космические эксперименты, применение датчиков с малыми чувствительными поверхностями не позволяет получить достаточное количество информации, необходимой для построения модели повреждения элементов конструкции КА.

6 Ряд методов и устройств, требуют высокой помехозащищённости преобразователя от воздействия факторов космической среды, вызывающих шум на входе приемной части системы анализа сигнала с преобразователя.

Требование защиты преобразователя от воздействия факторов космической среды, вызывающих шум на входе приёмной части системы анализа сигнала с преобразователя, является весьма важным, так как его невыполнение понижает чувствительность преобразователей в некоторых случаях на несколько порядков.

7 Высокоскоростные частицы в космосе имеют большой разброс по массам и скоростям ($10^{-6} \div 10^{-16}$ г, 5–20 км/с). Сущест-

вуют частицы, массы и скорости которых значительно больше, чем 10^{-6} г и 40 км/с. Такая особенность объекта исследования накладывает на систему регистрации скорости (в случае ее наличия в приборе) требование обеспечения широкого динамического диапазона измерения.

Требование быстродействия устройств для регистрации пылевых частиц в ряде случаев выполняется в полной мере, так как процесс взаимодействия частиц с прибором является случайным и редким.

Удовлетворение всех вышеуказанных требований в полной мере означало бы создание некоей идеальной системы регистрации.

Список использованной литературы

1 Калаев М.П. Многофункциональный прибор для исследования показателей деградации оптических элементов конструкции космического аппарата в условиях воздействия потоков микрометеороидов и космического мусора: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.01. 2012 г.

2 Stabroth, S. Wegener, P.; Klinkrad, H. MASTER 2005, Software User Manual, M05/MAS-SUM, 2006.

3 Smirnov N.N., Nazarenko A.I. Kiselev A.B. Continuum model for space debris evolution with account of collisions and orbital breakups // Space Debris Journ. No 2 (2000), 249-271, 2004. p. 102-114.

4 Kessler D.J., Johnson N.L., Liou J.-C., Matney M. The Kessler Syndrome: Implications to Future Space Operations / 33rd Annual American Astronautical Society, Rocky Mountain Section, Guidance and Control Conference 6-10 February 2010, Breckinridge, Colorado.

5 Новиков Л.С. Воздействие твёрдых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты. Учебное пособие. М.: Университетская книга, 2009. 104 с.

6 Hauptmann S., Drolshagen G. Second European conference on space debris. ESOC, Darmstadt, Germany, 17–19 March 1997, 798 p.

7 Романченков В.П. Расчет размеров повреждений элементов КА // в кн.: Моделирование влияния факторов антропогенного загрязнения околоземного космического пространства на элементы конструкций и систем космических аппаратов. //М.: Гидрометеоиздат, 1992 г. С. 48.

8 Proc. on «International Space Station Russian Service Module (SM) / МРАС & SEED 1st Post – Retrieval conference (in Japanese), 2004.

9 Портнягин Ю.И., Клюев О.Ф., Семкин Н.Д. [и др.]. Ракетные эксперименты по моделированию воздействия компонентов антропогенного загрязнения околоземного космического пространства на материалы и системы космических аппаратов // Труды Всесоюзной научно-практической конференции (Ленинград, апрель 1990). М.: Гидрометеоиздат. 1992. 263 с.

10 Буздыгар Т.В., Клюев О.Ф., Семкин Н.Д. [и др.]. Методы и средства диагностики гетерофазных потоков и эффектов их взаимодействия с материалами и системами космических аппаратов в ракетном эксперименте // Труды Всесоюзной научно-практической конференции (Ленинград, апрель 1990). М.: Гидрометеоиздат. 1992. 263 с.

11 Семкин Н.Д., Телегин А.М., Изюмов М.В. Использование открытых элементов космического аппарата в качестве датчиков микрометеоритов и космического мусора.// Прикладная Физика, №4, 2010. С. 131-136.

12 Семкин Н.Д., Изюмов М.В. Калаев М.П. Взаимодействие высокоскоростных частиц с терморегулирующими элементами космического аппарата// Вестник СГАУ, 2009, №4(20). С. 43-56.

Глава 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИБОРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕГРАДАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

2.1 Методы моделирования потоков высокоскоростных пылевых частиц в лабораторных условиях

Для проведения ударных экспериментов используются различные типы ускорителей [1], однако наиболее «чистыми» являются электростатические и линейные ускорители, в которых ускорение частиц осуществляется энергией электрического поля. В ходе каждого эксперимента в камере ускорителя располагался прототип прибора с установленными образцами исследуемых оптических элементов, что позволило производить оценку деградации оптических материалов в процессе реального времени без развакуумирования камеры ускорителя. После эксперимента образцы вынимались и исследовались с помощью лабораторных приборов – спектрофотометров, электронных микроскопов.

Кроме того, в серии экспериментов в камере ускорителя перед образцами был собран селектор скоростей, позволяющий вырезать из потока низкоскоростные частицы, повысив тем самым качество эксперимента.

Исследование ТРП проводилось с использованием ускорителей двух типов – взрывного и электростатического. Применение взрывного ускорителя необходимо для получения более «плотных» потоков частиц, недоступных при использовании электростатического ускорителя.

Высокоскоростные частицы даже в лабораторных условиях представляют собой сложный динамический объект исследования [55]. В процессе их ускорения необходима информация об их параметрах (скорость, масса, агрегатное состояние). Тип и конструкция ускорителя определяется поставленной задачей и зависит от диапазона исследуемых масс и скоростей ускоряемых частиц.

Параметры высокоскоростных частиц, достигнутые к настоящему времени в экспериментах [1-3] приведены в виде графика на рисунке 2.1, из которого можно видеть распределение частиц по скоростям и массам, полученное с помощью ускорителей на основе газокумулятивных зарядов, легкогазовых пушек, рельсотронных, электродинамических, электрооплазменных и электростатических ускорителей.

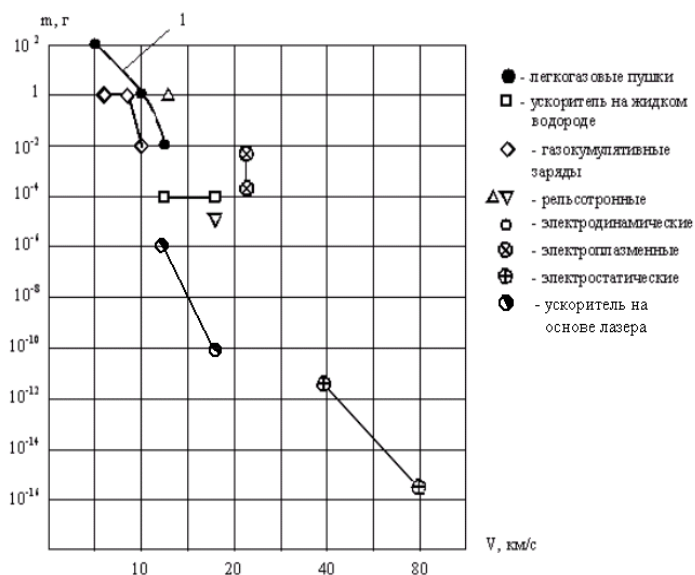


Рисунок 2.1 – Распределения частиц по скоростям и массам, полученные с помощью различных типов ускорителей

Для моделирования микрометеоритной пыли и техногенных частиц успешно применяются электростатические и электроплазменные ускорители, с помощью которых возможно получить скорости 10–40 км/с для масс частиц $10^{-12} - 10^{-14}$ г.

Для разгона ударников значительных масс до высоких скоростей чаще всего используются двухступенчатые легкогазовые пушки [1]. Схематическое устройство такого ускорителя показано на рисунке 2.2. К настоящему времени легкогазовые пушки позволяют получать следующие предельные величины разгоняемых масс и скоростей от 0,04 г и 11 км/с до 2,5 кг и 4,7 км/с. Несмотря на ограничения по скорости, размерам, весу, материалу и форме разгоняемых ударников, главное преимущество легкогазовых пушек состоит в том, что вес и размеры ударника можно точно определить, а скорость метания поддается точному прогнозу.

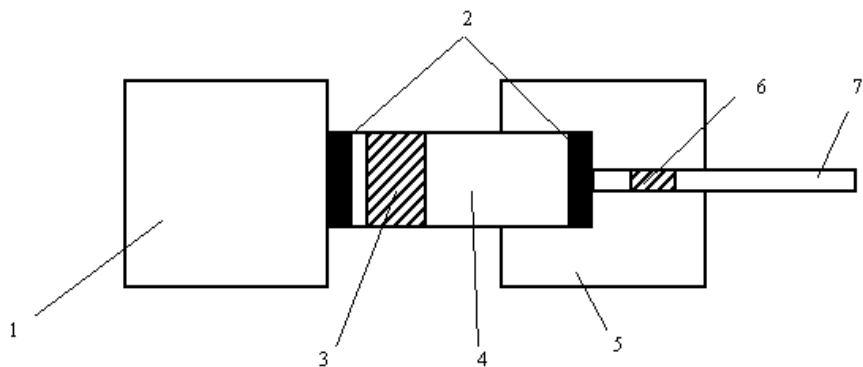


Рисунок 2.2 – Схема двухступенчатой легкогазовой пушки:
 1 – пороховая камера, 2 – диафрагмы, 3 – поршень, 4 – нагнетательная труба,
 5 – секция высокого давления, 6 – ударник, 7 – труба разгона

Для ускорения макрочастиц широко используются электромагнитные ускорители различных типов. Существуют электромагнитные пушки рельсового типа, в которых ускорение ударника осуществляется за счет взаимодействия индуцируемых в нем вихревых токов с движущимся магнитным потоком (рисунок 2.3). При дополнительном использовании взрывного сжатия магнитного слоя для значительного повышения его напряженности появляется возможность довести скорость ударника массой 0,01 г до 10 км/с. Недостатки такой конструкции связаны с возникновением дугового разряда на контактах, частым разрушением ускоряющих катушек и ударника в процессе ускорения.

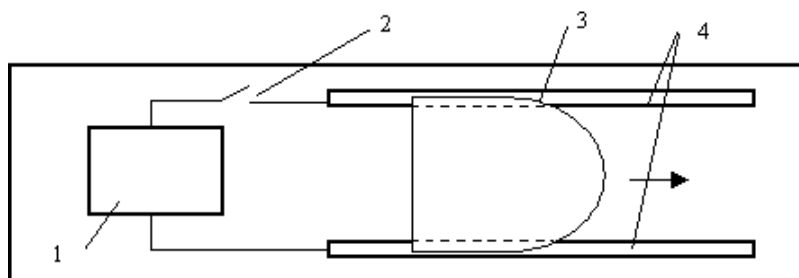


Рисунок 2.3 – Электрическая пушка постоянного тока с параллельными рельсами:
1 – источник энергии, 2 – выключатель, 3 – ударник, 4 – рельсы

Разгонять ударники до больших скоростей можно посредством их увлечения высокоскоростным потоком плазмы [4]. При разряде большой высоковольтной батареи конденсаторов через литиевую проволоку образуется высокоскоростная плазма, разрывающая диафрагму с расположенными на ней моделями и ускоряющая их в трубе разгона до большой скорости. Одним выстрелом можно разогнать 10000 мелких (диаметром 50 мкм) стеклянных шариков. Экраны и электромагнитный затвор отсекают уклоняющиеся от

осевого направления и более медленные частицы до того, как первые несколько шариков ударят по мишени. Максимальная скорость шариков массой 10^{-7} г составляет 20 км/с. Недостатком электроплазменного ускорителя является прежде всего процесс абляции частиц в момент ускорения, когда они находятся в области высокотемпературной плазмы. Другим недостатком является наличие электромагнитных помех, затрудняющих изучение процессов высокоскоростного взаимодействия.

В электростатическом ускорителе, описанном в [1-3] электростатическим напряжением 200 кВ частицы, диаметром 1-1,5 мкм из алюминия разгоняются до скоростей порядка 2-10 км/с. При более высоком ускоряющем напряжении 1-2 мВ метод электростатического ускорения позволяет ускорять частицы размером 0,05-1 мкм соответственно до скоростей 50-20 км/с. При электростатическом ускорении можно осуществить определение размера и скорости индивидуальной частицы. Таким образом, метод электростатического ускорения является лучшим, удобным в эксплуатации, наиболее эффективным для моделирования микрометеоритной пыли. Недостатком электростатического ускорителя является, прежде всего, его сложность, наличие высоких напряжений. В [5] рассмотрен метод ускорения частиц посредством переключения нескольких трубок синхронно с параметрами движения частицы, ускоритель, использующий данный метод представлен на рисунке 2.4.

Напряжения на электродах составляют 100 кВ, так что при количестве трубок, равном 100, можно получить в эквиваленте 10 мВ. При таких напряжениях частица массой 10^{-16} - 10^{-17} г может быть ускорена до 100-120 км/с. Программируемая система селекции выделяет частицы с нужным зарядом и скоростью, и генерирует последовательность импульсов, разряжающих ускоряющие электроды в тот момент, когда частица находится в его окрестно-

сти. Ускорение частицы является стабильным, когда сфазированы разрядка электродов и выход частиц из них.

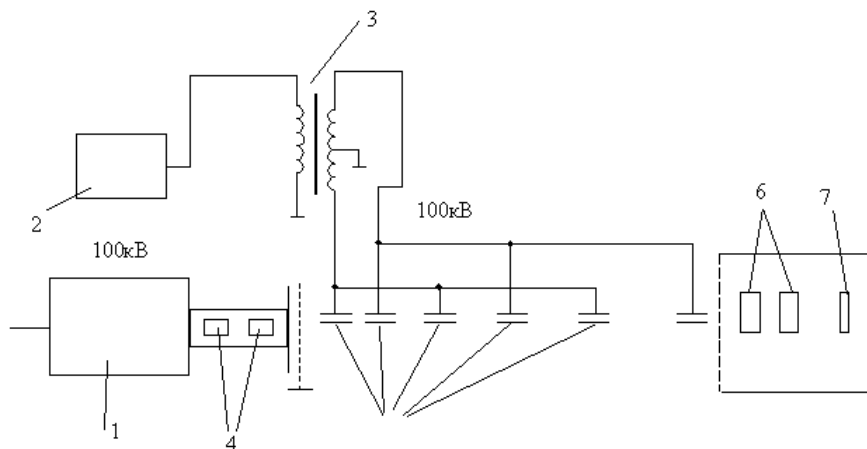


Рисунок 2.4 – Ускоритель с переключающимися электродами:

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

Для решения задачи ускорения плотных потоков частиц наиболее целесообразным, с точки зрения простоты, является использование таблеток с взрывчатым веществом (ВВ), в котором замешаны частицы. При взрыве продукты ВВ, как показывает практика, сгорают почти полностью, а частицы остаются целостными и имеют скорости 1-5 км/с. На рисунке 2.5 изображена блок-схема взрывного ускорителя. Ускорение происходит в вакууме. Ускоритель прост по своей сути. Процессы ускорения определяются характеристиками таблетки ВВ.

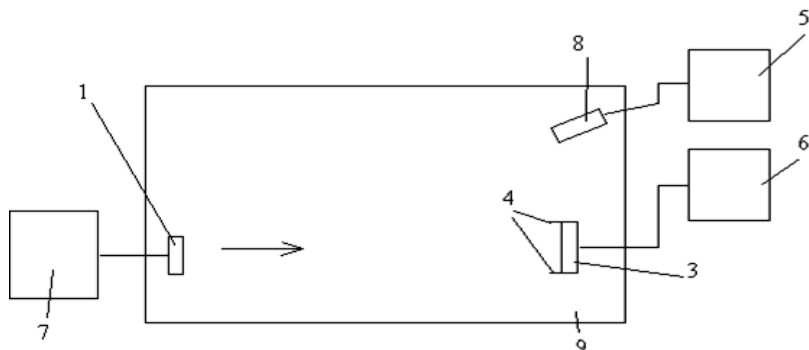


Рисунок 2.5 – Взрывной ускоритель:

1 – таблетка ВВ, 2 – регистратор, 3 – мишень, 4 – датчик суммарного ионного тока, 5,6 – осциллографы, 7 – устройство поджига, 8 – ФЭУ начала процесса, 9 – вакуумная камера.

При выборе метода создания высокоскоростных частиц, основываясь на знании моделей распределения микрометеоритной пыли в различных районах космического пространства, можно утверждать, что в процессе эксплуатации космического аппарата основным воздействием на его поверхность является воздействие множества мелких частиц размерами 0,1-1 мкм в диапазоне скоростей 5-30 км/с.

Поэтому основным требованием при выборе типа ускорителя является требование получения потока твердых частиц массой 10^{-9} - 10^{-15} г и скоростями 1-40 км/с. Рассматривая все вышеуказанные устройства для ускорения частиц, можно выделить три метода, в сумме перекрывающие требуемые диапазоны по скоростям и массам. Это методы электромагнитного, электроплазменного, электростатического ускорения.

Для моделирования техногенных частиц с размерами более 10-15 мкм эффективно используется ускоритель электроплазменного

типа, при этом скорости частиц лежат в диапазоне 2-20 км/с. Ускорение более крупных частиц с успехом достигается с помощью электромагнитного ускорителя, однако детальное изучение явлений при высокоскоростных соударениях с помощью электроплазменного и электромагнитного ускорителей осложняется значительными электромагнитными помехами и влиянием плазмы на систему регистрации и исследуемые мишени (тем более, если мишени выполнены в виде различного рода датчиков). В этом случае меньшими недостатками обладает метод с использованием мощного импульсного лазера, как вариант электроплазменного ускорителя, для создания облака ускоряющей высокоскоростной плазмы.

Для более глубокого изучения физических явлений, имеющих место при высокоскоростном соударении твердых тел, наилучшим инструментом является электростатический ускоритель. Контролируемость параметров ударника, чистота эксперимента, высокие скорости соударения (для малых размеров частиц) выгодно отличают электростатический ускоритель от других устройств разгона.

2.2 Исследование деградации характеристик оптических материалов

В вакуумной камере расположен прототип прибора, с установленными в него образцами оптических элементов. В качестве объекта исследования использовано оптическое стекло марки К-8. При этом один образец (измеряемый) находится под воздействием потока микрометеороидов, а второй смещен в сторону и защищен от потока. Измеряемый образец был подвергнут воздействию потока из 5×10^4 частиц алюминия [6]. После эксперимента измеряется разница спектрального коэффициента пропускания между чистым и облученным образцом с помощью прототипа прибора, показанного на рисунке 1.15 (см. стр. 31) и состоящего из системы перемещения образцов, платы управления, источников света и фотоприёмников.

Кроме того, образец исследовался с помощью спектрофотометра UV-1800 перед проведением экспериментов, и после (рисунок 2.6).

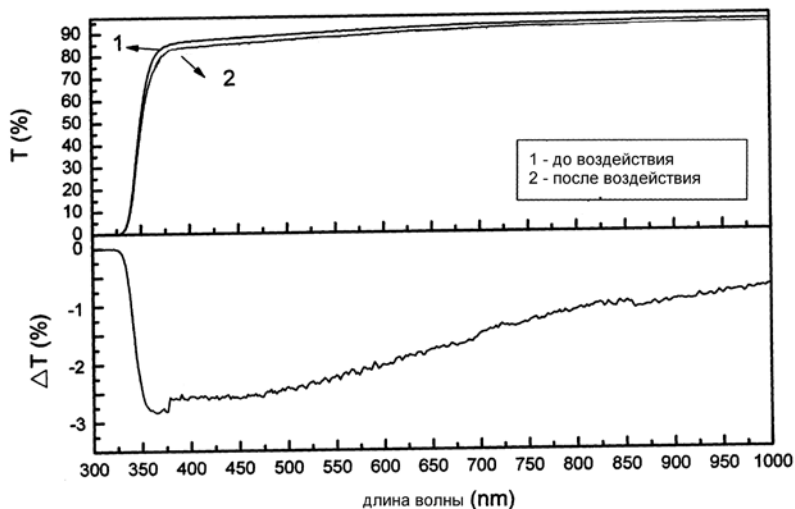


Рисунок 2.6 – изменение спектрального коэффициента пропускания стекла после воздействия потока МДЧ

Источниками света в данном эксперименте служили 4 светодиода: 405 нм, 525 нм, 650 нм; 850 нм.

Изменение коэффициента пропускания определялось как

$$\Delta T(\lambda_n) = \frac{T_k(\lambda_n)}{T_0(\lambda_n)} = 1 - \frac{I_k(\lambda_n)}{I_0(\lambda_n)},$$

где $I_k(\lambda_n)$ – интенсивность светового пучка, прошедшего через экспонируемый образец; $I_0(\lambda_n)$ – интенсивность светового пучка, прошедшего через опорный образец.

Сравнение результатов, полученных с помощью спектрофотометра и прототипа прибора показано на рисунке 2.7.

Пунктирной линией на рисунке показан график функции ΔT , соответствующей кратерам со средним диаметром 4 мкм.

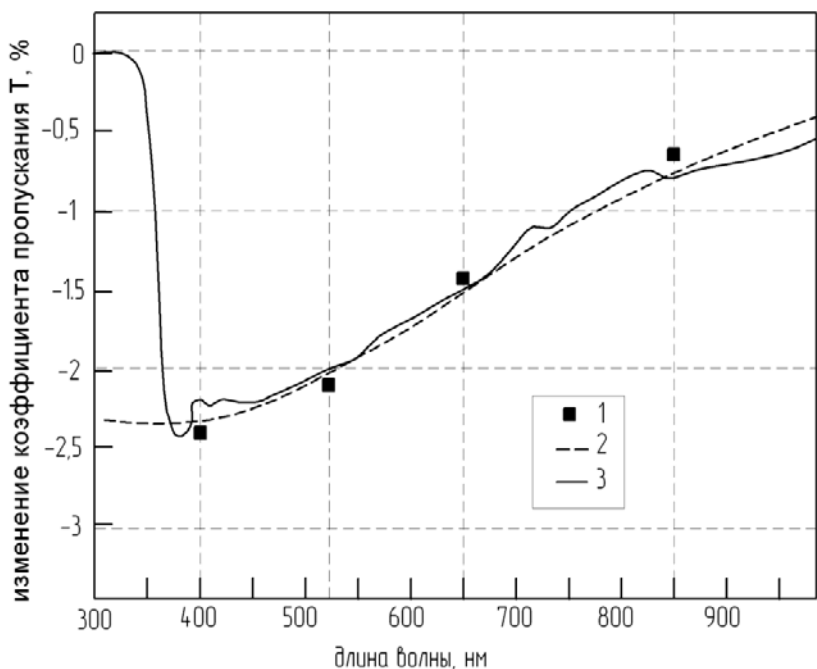


Рисунок 2.7 – Изменение спектрального коэффициента пропускания стекла:
1 – эксперимент; 2 – расчетный; 3 – измерение с помощью спектрофотометра

Пропускание увеличивается при увеличении длины волны проходящего излучения. Рост пропускания образца с ростом длины волны обусловлен спецификой поглощения и рассеивания излучения частицами и дифракции излучения на их краях. Чем выше длина волны излучения, тем меньше влияние частиц и дефектов на изменение спектрального пропускания оптического элемента.

2.3 Исследование индикатрисы рассеяния с помощью установки с поворотным фотоприёмником

Цель эксперимента – анализ основных особенностей формирования индикатрисы рассеяния оптических материалов с ударными дефектами на поверхности, определение порога чувствительности устройства [7].

Для измерения индикатрисы собрано устройство, функциональная схема которого приведена на рисунке 2.8. На вращающемся предметном столике устройства установлены исследуемые стёкла (до 8 штук).

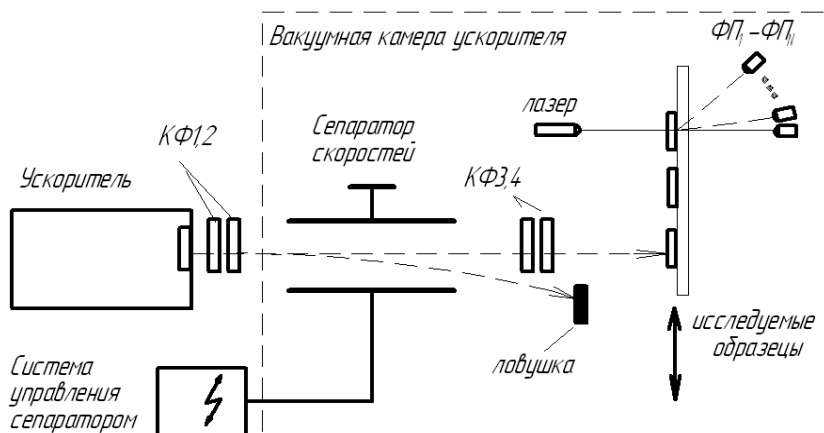


Рисунок 2.8 – Функциональная схема прибора для измерения индикатрисы с поворотным фотоприёмником: КФ1-КФ6 – кольца Фарадея, ФП₁-ФП_N – фотоприёмники

В начальный момент времени производится измерение индикатрисы рассеяния для каждого из стекол. Кроме того, при помощи фототранзистора ФТ1 измеряется и записывается в память текущая мощность лазерного диода ЛД. Это необходимо, поскольку выходная мощность лазера подвержена деградации, а также множеству

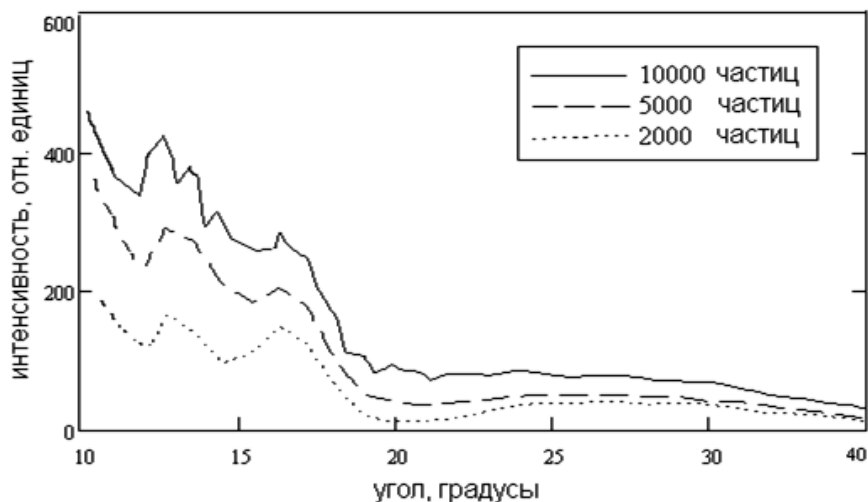
других дестабилизирующих факторов. Перед фототранзистором ФТ1 располагается поглощающая диафрагма, снижающая интенсивность лазерного луча до уровня, позволяющего фототранзистору работать на линейном участке характеристики.

Затем одно из стёкол вводится в пространство воздействия потока частиц, и остается там до накопления на поверхности нужного количества частиц, о чем свидетельствуют кольца Фарадея КФ1 и КФ2, установленные непосредственно в близости от поверхности исследуемого стекла. После этого стекло переводится в пространство измерения индикатрисы рассеяния. Включается лазерный диод ЛД, а фототранзистор ФТ1 с коллиматором приводится в движение вокруг образца при помощи шагового двигателя М1, с шагом 0,09 градуса. Фототранзистор при этом регистрирует амплитуду рассеянного света в зависимости от угла (индикатрису). Блок стабилизации тока (БСЛ) при этом поддерживает постоянную мощность лазера. Инструментальные усилители ИУ1 и ИУ2 имеют перестраиваемый коэффициент усиления от 1 до 128, что позволяет расширить динамический диапазон измерения.

Недостатком данной компоновки является невозможность измерения индикатрисы при угле рассеяния, близком к нулю, из-за паразитной засветки от луча лазера. Однако поскольку ожидаемый диапазон размеров кратеров заранее известен, и находится в диапазоне 2-5 мкм, можно ограничиться измерением индикатрисы для углов 10-40 градусов.

В ходе эксперимента поверхность оптического стекла марки К-8 площадью 5см^2 была облучена потоком из 10^4 частиц алюминия. Предварительно на стекло была напылена плёнка золота толщиной 50 нм. Это необходимо для получения в дальнейшем более контрастных снимков при исследовании образцов с помощью электронного микроскопа.

Диаметр частиц составлял 1-3 мкм. Измерение индикатрисы проводилось после облучения поверхности образца частицами в количестве $2 \cdot 10^3$, $5 \cdot 10^3$, и $10 \cdot 10^3$. Закон распределения частиц по поверхности образца для данного ускорителя близок к нормальному. Поэтому к концу эксперимента на площадке диаметром 1 мм^2 в центре образца (пятно засветки лазером) находится около 100 кратеров, которые наблюдались после эксперимента с помощью электронного микроскопа. На рисунке 2.9 показана индикатриса рассеяния для разного количества частиц. Как видно из графика, с повышением количества кратеров на поверхности стекла, амплитуда максимумов функции $I(\theta)$ возрастает практически линейно, при этом положение максимумов остается неизменным, что говорит о постоянстве значения среднего размера кратеров за время эксперимента.



Рисунке 2.9 – Индикатриса рассеяния при различном количестве кратеров на поверхности образца

Фотография участка поверхности размером 0,12×0,12 мм, полученная с помощью электронного микроскопа, показана на рисунке 2.10. На фотографии видно, что участок содержит около 12 крупных кратеров размером 2-5 мкм, и 20-30 мелких, размером 0,5-1 мкм и менее. Следует отметить, что количество кратеров несколько превышает полученное с помощью системы регистрации ускорителя. Это обусловлено трудностями, связанными со счётом частиц с малым отношением q/m .

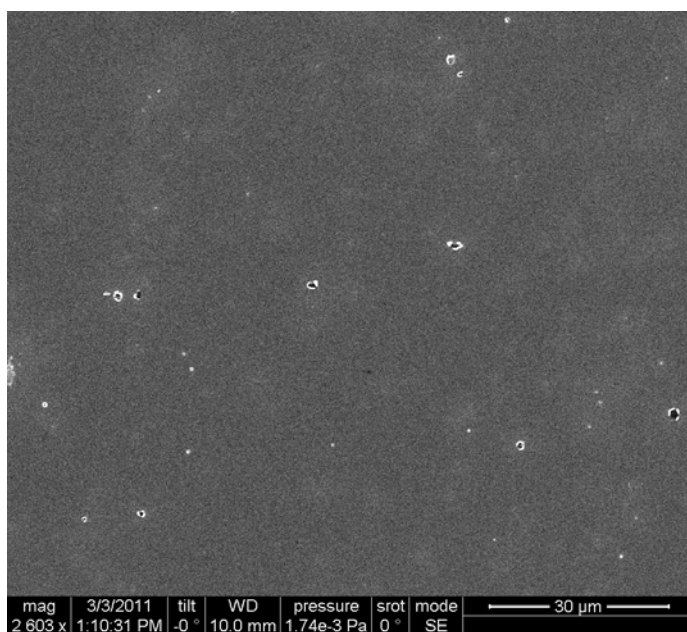


Рисунок 2.10 – Фотография участка поверхности 0,12х0,12мм
(стекло К-8 с напылением золота 50нм)

На рисунке 2.11 показаны фотографии кратеров с данного образца.

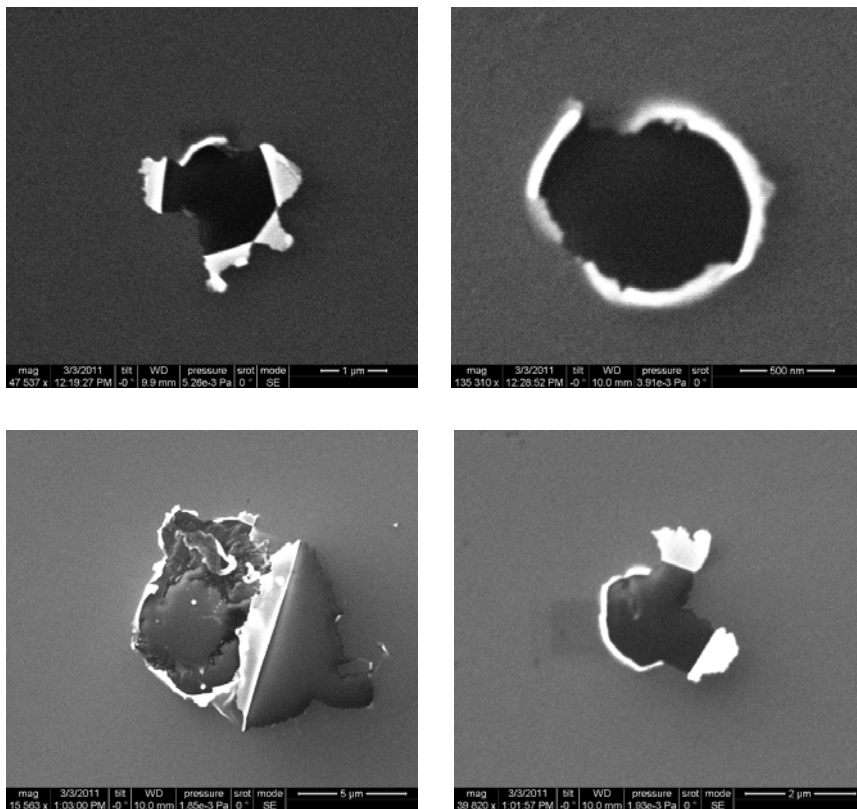


Рисунок 2.11 – фотографии кратеров на поверхности стекла с напылением золота (50 нм)

Как видно на фотографиях, кратеры имеют разнообразную форму и размер, во всех случаях вокруг кратера наблюдается отслаивание материала напыления от основания, в некоторых случаях на дне кратера наблюдаются остатки материала частицы (Al).

На рисунке 2.12 показан элементный состав материалов мишени и частицы одного из таких кратеров.

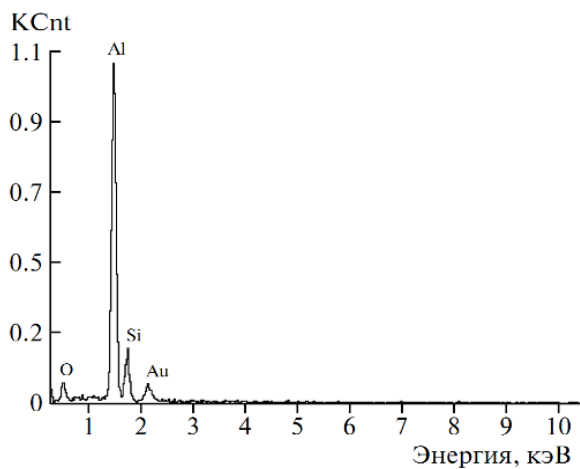


Рисунок 2.12 – элементный состав поверхности в центре кратера.
 KCnt – концентрация вещества

Фотографии типовых кратеров с данных образцов показаны на рисунке 2.13.

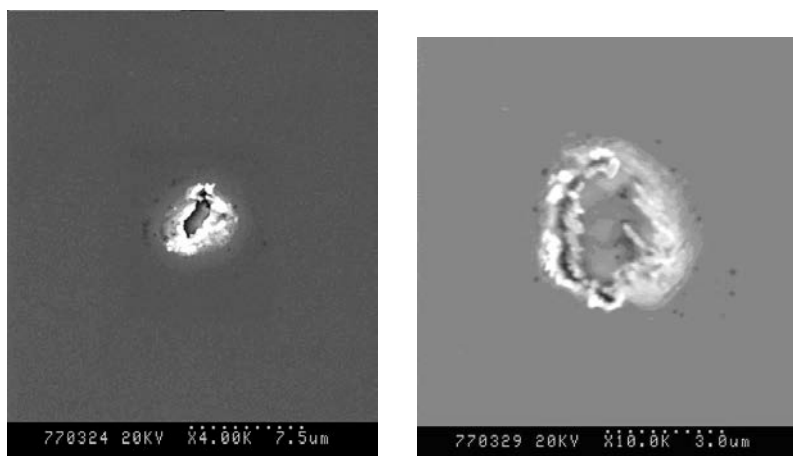


Рисунок 2.13 – фотографии типовых кратеров: мишень – стекло К8,
 частицы – Al диаметром 2-3 мкм, наиболее вероятная скорость удара – 5км/с

2.4 Исследование деградации характеристик солнечных батарей

В вакуумной камере ускорителя установлены две солнечных батареи. Первая батарея ВАТ1 находится в зоне воздействия частиц, вторая ВАТ2 смещена в сторону [8]. Выходы обеих солнечных батарей подключены ко входам дифференциального усилителя, а также к управляемым резисторам, задающим режим нагрузки. На некотором расстоянии от батарей расположена мощная галогеновая лампа, которая включается во время измерения тока и напряжения. Результат измерений передаётся в ЭВМ.

Такая схема включения позволяет получить высокую точность измерения и уменьшить влияние температуры, так как поверхность обеих солнечных батарей находится в одинаковых условиях.

Вольтамперная характеристика (ВАХ) солнечной батареи, до и после воздействия потока частиц размером $0,5 \div 3$ мкм и скоростями $1 \div 8$ км/с показано на рисунке 2.14.

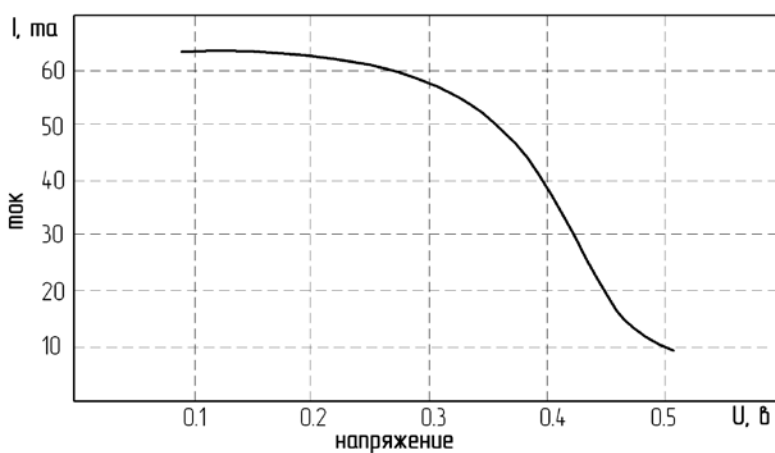


Рисунок 2.14 – ВАХ СБ после эксперимента
(поток 5×10^4 частиц на площадь 8 см^2)

На графике видно, что ток короткого замыкания подвержен гораздо большей деградации, чем напряжение холостого хода.

Изменение ВАХ происходит преимущественно в режиме больших токов. В режиме, близком к холостому ходу, изменения практически не происходит. Однако это верно только для случая, когда не имеет место пробой защитного покрытия солнечной батареи и закорачивания слоя полупроводника [71].

На рисунке 2.15 показано изменение тока короткого замыкания (КЗ) и напряжения холостого хода (ХХ) в зависимости от количества частиц, попавших в образец.

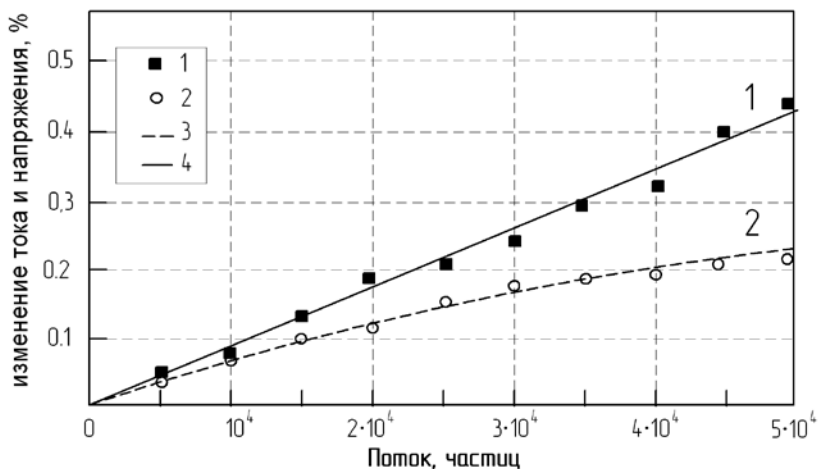


Рисунок 2.15 – Изменение характеристик СБ в зависимости от количества частиц:

1 – зависимость изменения тока КЗ солнечной батареи от количества частиц;

2 – зависимость изменения напряжения ХХ солнечной батареи от количества частиц

После эксперимента образцы СБ исследовались с помощью электронного микроскопа. Общая картина повреждений складывается из совокупности следующих дефектов: отпечаток от внедрения частицы соответствующей формы и размера, радиальные и концен-

трические трещины, образующие зону, в десятки раз превышающую по площади отпечаток, зоны механического разрушения, обрамляющий его в 4-5 раз больший по размеру, но подобный ему по форме отпечаток; отслоение желатиново-клеевой оболочки, образуемое от границы концентрических трещин и имеющее форму кольцевой «кляксы»; оголения желатиново-клеевой подложки за счёт уноса измельчённого, разрушенного покрытия. Каждый из этих эффектов оказывает различное влияние на изменение функциональных параметров СБ в большей или меньшей степени. Так отпечаток или сама частица, экранирует поверхность почти полностью поглощая приходящее излучение. Зона механического разрушения, состоящая из неправильной формы осколков покрытия, частично поглощает и отражает. Отслоение же подложки от желатинового подслоя и трещины эффектов поглощения или отражения (при нормальном падении излучения) практически не создают.

2.5 Исследование деградации характеристик ТРП

Для исследования изменения свойств ТРП требуется воздействие более плотных потоков, по сравнению с описанными выше экспериментами, поэтому источником частиц служит взрывной ускоритель.

Параметр, который представляется возможным контролировать в малогабаритной бортовой аппаратуре, это коэффициент поглощения солнечного излучения A_s . Для этих целей использовалась модификация прибора, показанного на рисунке 1.15 (см. стр. 31).

Кроме того, измерение оптических характеристик образцов ТРП осуществлялось до и после ударных экспериментов с использованием фотометров. Для определения интегральных значений A_s использовались фотометры, для ϵ – терморациометры с диапазонами спектральной чувствительности от 0,3 до 2,4 мкм и от 4 до 40 мкм соответственно. Основными задачами экспериментов являлось оп-

ределение характера взаимодействия частиц с ТРП и оценка изменений As и ϵ в зависимости от параметров потока частиц и их материалов, а также параметров деградации.

Ниже приведены эксперименты по облучению частицами ТРП с помощью ускорителя взрывного типа. С помощью взрывного ускорителя получены скорости $0,1 \dots 7 \text{ км} \cdot \text{с}^{-1}$ с массами $10^{-8} \div 10^{-12} \text{ г}$.

Блок-схема экспериментальной установки взрывного типа изображена на рисунке 2.16. Она содержит вакуумную камеру, в которой устанавливается источник частиц 1 , датчик для регистрации и измерения параметров потока пылевых частиц 2 ; на фиксированном расстоянии от источника 1 установлены исследуемые покрытия 3 и 3^1 (покрытие 3^1 находится под углом 80° к потоку частиц с целью изучения «косого удара»).

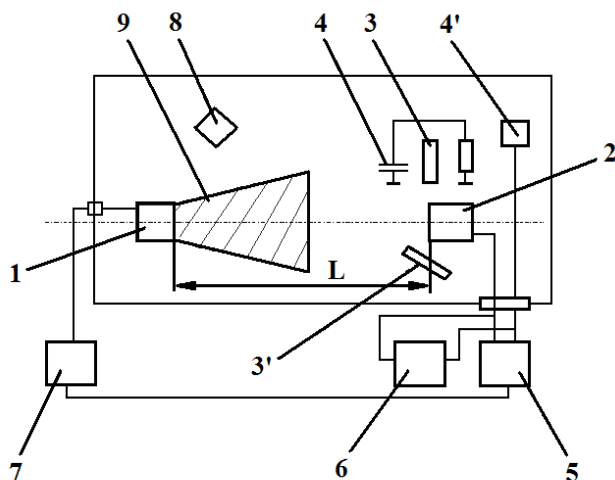


Рисунок 2.16 – Ускоритель взрывного типа:

- 1 – таблетка; 2 – регистратор частиц; 3 и 3^1 – мишень; 4 – ионизационный датчик, 4^1 – интегратор; $5, 6$ – осциллограф; 7 – устройство поджига; 8 – ФЭУ, 9 – зона разлета частиц

В непосредственной близости от поверхности исследуемого покрытия установлены два электрода ионизационного датчика 4 в виде плоских пластин параллельно друг другу, на которые подано постоянное напряжение 200 В. Пластины соединены с интегратором 4', выход которого соединен с запоминающим осциллографом 5 типа С8-17 и шлейфовым осциллографом 6.

Поджиг источника частиц осуществляется от устройства 7, генерирующего импульс напряжения. Источник частиц 1 представляет собой взрывчатое вещество (ВВ) – гексоген, тетрил, октоген в котором замешаны исследуемые частицы определенного материала (Al, W, Al₂O₃, C, Ti и т.д.), причем соотношение массы взрывчатого вещества и массы частиц составляет 5 : 1. Размеры частиц составляли 1-30 мкм. Результаты экспериментов помещены в таблицу 3.1.

Таблица 2.1 – Оптические характеристики ТРП

образец	Анодноокисное покрытие				чёрное		ЭМ - 40		МСН - 7	
ϵ_0	0,86	0,84	0,85	0,85	0,94	0,94				
ϵ_1	0,877	0,862	0,843	0,84	0,94	0,94	0,92	0,90	0,87	0,85
AS ₀	0,2	0,19	0,19	0,19			0,15	0,15		
AS ₁	0,717	0,73	0,717	0,73	0,038	0,038	0,43	0,43	0,65	0,69
Sb %	0,8	0,2	0,26	0,28	0,26	-	0,33	0,45	0,7	0,4
S _H %	0,13	0,4	0,26	0,26	0,22	-	0,17	0,16	1,9	1,1
Sn %	9	7	9	9	9	-	9	9	9	9
S _C %	1	1	1	1	1	-	1	1	1	1

Масса таблетки из гексогена составляла 9 граммов. Количество частиц на 1 см² лежало в пределах $10^2 \div 5 \cdot 10^3$, в зависимости от их размеров. Количество частиц определялось с помощью алюминиевой фольги толщиной 20 – 30 мкм, установленной на одной линии с исследуемыми покрытиями, в непосредственной близости от них. Количество частиц на 1 см² (с учетом, их распределения по скоростям) пересчитывалось на поток $n \cdot \vec{V}$. Начало процесса (взрыв ис-

точника частиц 1) фиксируется с помощью фотодиода 8, соединенным со входом запуска осциллографа 5.

Получение потока частиц с помощью взрывного метода ускорения довольно прост, хотя требует специальной вакуумной камеры и осторожности при работе с взрывчатыми веществами. Недостатком является возможность осаждения тончайшей пленки материала взрывчатого вещества. Чистый ударный эксперимент можно реализовать с помощью тонкой (5... 10 мкм) алюминиевой фольги, загромождающей исследуемые покрытия. При этом скорость частиц при пробое ими фольги практически не уменьшается, если их размеры больше в 2-3 раза толщины фольги.

Заряд: 9 гр. тетрил + 0,5 гр. вольфрамовых частиц, вакуум: $1,2 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст., скорость начала фронта частиц: 1,2 км/с, база: 1,8 м, плотность потока частиц: $0,7 \cdot 10^6$ част/см²·с.

Заряд: 9 гр. тетрил + 0,5 гр. вольфрамовых частиц, вакуум: $5 \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст.; экран: 5 мкм; скорость начала фронта частиц: 2,2 км/с; база: 1 м; плотность потока частиц: $1,3 \cdot 10^6$ част/см²·с.

С помощью электронного микроскопа исследовались анодно-окисные покрытия, покрытия типа МСН-7. На черной анодноокисной поверхности не просматриваются кратеры, частички грязи ни в косых, ни в поляризованных лучах из-за высоких значений коэффициента черноты.

Покрытия типа ЭМ-40, МСН-7 обладают высоким поверхностным сопротивлением, поэтому для анализа на них напылялись пленки серебра толщиной 0,5-1 мкм.

Проведенные оптические исследования позволили оценить площадь кратеров от высокоскоростных и низкоскоростных частиц. Увеличение для анодноокисных покрытий и МСН-7 составляло 320.

Производилось фотографирование 6-10 произвольно выбранных участков поверхности ТРП с общей площадью $(7-9) \cdot 10^{-3}$ см², затем подсчитывалось общая площадь низкоскоростных и высоко-

скоростных кратеров отдельно. Все кратеры, размеры которых меньше минимального размера частицы, являются продуктом сгорания взрывчатого вещества, то есть кратерами от частиц сажи. При исследовании покрытия ЭМ-40 увеличение устанавливалось равным 60, и по всей площади образца вычислялась площадь кратеров.

С помощью электронного микроскопа оценивалась площадь, занимаемая пылью. Для этого проводилось фотографирование 5-8 участков поверхности образца с увеличением 500-550 и находилось отношение площади, закрытой пылью, к общей площади образца.

Обозначения в таблице следующие: ε – исходный коэффициент черноты; ε_1 – коэффициент черноты после воздействия на образец частицами; A_{S0} – исходный коэффициент поглощения; A_{S1} – коэффициент поглощения после воздействия; S_B (%) – площадь кратеров от высокоскоростных частиц; S_H (%) – площадь кратеров от низкоскоростных частиц; S_n (%) – площадь, занятая пылью по отношению к площади образца; S_C (%) – площадь кратеров от сажи.

Как видно из таблицы на светлых покрытиях после их облучения заданным потоком частиц коэффициент черноты возрастает.

У черных покрытий коэффициент черноты практически не меняется независимо от потока частиц.

Для анодноокисных покрытий коэффициент поглощения при общей площади кратеров, составляющей 0,2 % от общей площади образца, а площади пыли 2%, увеличивается с 0,2 до 0,6... 0,7.

Черные покрытия практически не меняют своих начальных значений коэффициентов ε и A_S после воздействия потока частиц. Для МСН-7 наблюдается уменьшение коэффициента черноты с увеличением общей площади кратеров.

Площадь кратеров у толстых покрытий значительно больше, чем у тонких за счет скола кромки кратера.

Для покрытий ЭМ-40 и МСН-7 площадь кратеров возрастает на порядок при увеличении скорости фронта частиц примерно в два

раза. Но при этом возрастает и количество крупных частиц, вызывающих увеличение кратеров. На рисунках 2.17, 2.18 показаны кратеры, образованные соударением вольфрамовых частиц размером 5 мкм и скоростью $2,2 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$ ($\times 1500$, покрытие МСН-7 и черное).

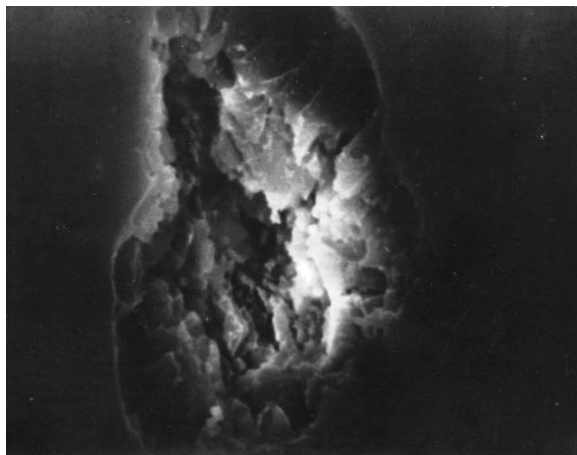


Рисунок 2.17 – Кратер от соударения вольфрамовой частицы размером 5 мкм и скоростью $2,2 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$ ($\times 1500$, покрытие МСН-7)

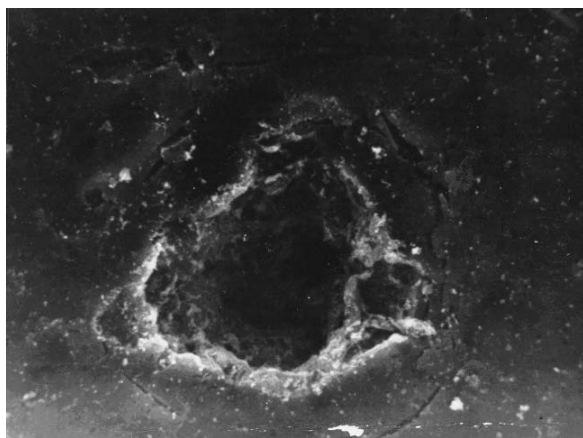


Рисунок 2.18 – Кратер от соударения вольфрамовой частицы размером 5 мкм и скоростью $2,2 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$ ($\times 1500$, покрытие черное)

Таким образом, если иметь в виду эксперимент с источником взрывного типа, то можно говорить о воздействии очень мелких высокоскоростных и низкоскоростных частиц как основного объекта воздействия и пыли, оседающей на образцы покрытий после взрыва. Другими словами воздействие на исследуемые образцы покрытий в случае взрывного источника является сложным, так что выделение из общего потока только нужных нам частиц является сложной задачей. Необходимо отметить, что исследование характеристик A_S и ϵ образцов покрытий как функций трех составляющих является само по себе интересной с практической точки зрения задачей. Получение «чистого» потока частиц (без сопутствующих загрязняющих веществ) требует другого ускорителя, на что и направлены в настоящее время основные усилия.

Другим источником пылевых частиц является электростатический ускоритель, который совместно с инжектором успешно используется в экспериментах по моделированию микрометеоритной пыли. Такой ускоритель является сложным устройством. Однако такой ускоритель является самым «чистым» из всех существующих типов и самым удобным инструментом. Контроль параметров частиц может осуществляться индивидуально, при высокой степени разрежения.

Эксперименты с ТРП выполнены с помощью каскадного ускорителя с ускоряющим напряжением 200 кВ и ускорителя Ван де Граафа с ускоряющим напряжением 1,5 МВ. При этом частицы с массами 10^{-13} – 10^{-11} грамма ускорялись до скоростей $10 \div 12$ км·с⁻¹ [45, 46]. Материал частиц – Fe, Al, Al₂O₃ и SiO₂.

Результаты экспериментов приведены в таблице 2.2. Общее количество частиц, взаимодействующее с ТРП, составило $\sim 10^4 \div 5 \cdot 10^4$.

Таблица 2.2 – Результаты экспериментов с электростатическим ускорителем частиц

Ориентация образца	Расстояние до образца	Вакуум, мм.рт.ст.	Материал частиц	Скорость частицы, км/ч	As		ε			
					до облучения	после облучения	до облучения	после облучения	после облучения, в зависимости от места измерения	
1	⊥	6	10 ⁻⁵	Fe (0,1 мкм)	~5...6	0,15	0,37	0,9	0,91	0,90 0,89 0,90
2	⊥	7	10 ⁻⁵	Al (0,5...1 мкм)	~3...4	0,15	0,31	0,9	0,9	0,89 0,89 0,91

Материал покрытия ТРП – ZrO₂. Эксперименты показали, что коэффициент поглощения возрастает с 0,15 до 0,37÷0,41, а коэффициент черноты ε изменяется незначительно.

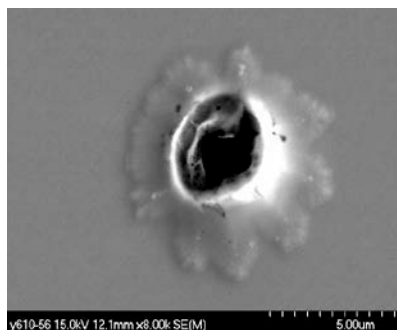
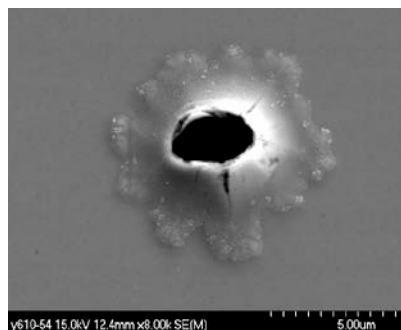


Рисунок 2.19 – изображения кратеров на ТРП

Недостатком электростатического ускорителя при проведении экспериментов с ТРП является невозможность экспонирования одновременно нескольких образцов в связи с тем, что максимальная

облучаемая площадь мишени не превышает 1 см^2 . Достоинством взрывного ускорителя является возможность облучения частицами большой площади образцов ($\geq 1 \text{ м}^2$), а также высокая эффективность проведения экспериментов. Результаты таких экспериментов позволяют прогнозировать состояние ТРП, облучаемых в течение длительного времени в космических условиях. При этом необходимо использовать экспериментальные данные о параметрах кратеров при высокоскоростном взаимодействии (зависимости размеров от скорости и массы частицы) и распределении величин потоков микрометеороидных и техногенных частиц в околоземном космическом пространстве.

Таким образом, можно получить приближенную картину эволюции коэффициентов A_s и ε ТРП в условиях эксплуатации КА.

Список использованной литературы

1 Семкин Н.Д., Пияков А.В., Погодин А.П. Эволюция и перспективы развития устройств для моделирования микрометеоритов в лабораторных условиях / Прикладная физика. №4, 2008, с. 153-163.

2 Семкин Н.Д., Пияков А.В., Воронов К.Е., Богоявленский Н.Л., Горюнов Д.В. Линейный ускоритель для моделирования микрометеоритов // Приборы и техника эксперимента. 2007, №2, с. 140-147.

3 Новиков С.А., Петров В.А. Установки взрывного типа для механических испытаний материалов и конструкций (обзор) // М.: ЦНИИ атоминформ, 1989, 37 с.

4 Осташов В.Е., Лебедев Е.Ф., Фортов В.Е. Причины ограничения скорости разгона макротел в магнитноплазменном ускорителе // ТВТ. 1993, т. 31, №2, с. 313-320.

5 Семкин Н.Д., Воронов К.Е., Пияков А.В., Пияков И.В. Имитация микрометеоритов с помощью электродинамического ускорителя // Приборы и техника эксперимента. №4, 2009, с.11-17.

6 Семкин Н.Д, Калаев М.П. Деградация оптического стекла в условиях воздействия микрометеоритов и частиц космического мусора // Приборы и техника эксперимента. № 1, 2011. с.136-140.

7 Семкин Н.Д, Калаев М.П. Определение параметров кратеров на поверхности стекла методом малоугловой индикатрисы // Приборы и техника эксперимента. № 3 2011. с.119-125.

8 Козлова А.А., Калаев М.П. Исследование воздействия микрометеоритов на солнечные батареи космического аппарата // Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций». 2018. С. 137-138.

9 Семкин Н.Д. Взаимодействие высокоскоростных частиц с терморегулирующими покрытиями // ФХОМ, 2002, №6, с. 42-48.

10 Семкин Н.Д., Изюмов М.В., Калаев М.П. Взаимодействие высокоскоростных частиц с терморегулирующими элементами космического аппарата // Вестник СГАУ, 2009, №4(20), с. 43-56.

11 Семкин Н.Д. Эрозионные процессы на поверхности терморегулирующих покрытий, облученных потоками высокоскоростных частиц. Научно-практический семинар // Космонавтика и экология: концепции и технические решения: Сборник тезисов докладов. Туапсе. 1990. С.42.

Глава 3 ЭФФЕКТЫ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ С МАТЕРИАЛАМИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ КОМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В околоземном космическом пространстве находятся множества частиц, различающиеся своим происхождением и параметрами. К ним относятся микрометеороиды и частицы космического мусора [1-3]. Скорости таких микрочастиц доходят до десятков км/с. При соударении таких частиц с поверхностью космического аппарата наблюдаются различные эффекты, оказывающие негативное влияние на функционирование космических аппаратов [4-9]:

- поверхностная эрозия и деградация приводит к изменению тепловых, оптических или электрических свойств;
- пробивание космических стенок приводит к структурным повреждениям внутренних подсистем;
- разрыв кабелей или тросов;
- короткие замыкания;
- повреждение ССD-матриц;
- полное разрушение космического аппарата;
- электромагнитные помехи;
- зарядка космического аппарата, приводящая к электроразрядам;
- световое излучение.

Все это приводит к тому, что необходимо проводить наземные исследования по исследованию влияния высокоскоростных микрочастиц на элементы конструкции космического аппарата. Такие исследования проводятся на ускорителях микрочастиц.

3.1 Поляризация материалов мишени при высоком давлении, вызванном высокоскоростным ударом

Под действием высокого давления, создаваемого высокоскоростным соударением, в материале мишени наблюдаются эффект поляризации (эффект Степанова), вызванного [10]:

- 1) термо-ЭДС,
- 2) электрическими явлениями, вызванными динамическим сжатием вещества;
- 3) деформацией поверхностных двойных электрических слоев в ударной волне,
- 4) проскоком носителей тока по инерции на фронте ударной волны,
- 5) эффектом увлечения носителей тока деформируемой решеткой (эффектом типа акустоэлектрического),
- 6) ударной поляризации (разделением положительных и отрицательных зарядов в объеме вещества за фронтом ударной волны), диффузией носителей тока с фронта ударной волны.

Гудфеллоу, Новик, Урусовская и др. исследуя этот эффект в ионных кристаллах, показали, что потенциал возникает как при напряжениях ниже предела текучести, так и в процессе пластической деформации кристаллов и обусловлен движением заряженных дислокаций. Знаки амплитуда потенциала зависят, в частности, от концентрации сорта примесей, скорости деформирования и температуры образцов.

Состояние молекул не является термодинамически равновесным. Со временем тепловое движение этих молекул за фронтом ударной волны приведет к разрушению ориентированного состояния, и как следствие, к уменьшению (релаксации) поляризации. Особенность ударной поляризации состоит в том, что в случае, если диэлектрик за фронтом ударной волны становится проводником, то уменьшение поляризации за фронтом ударной вол-

ны может быть связано не только с процессом разориентации полярных молекул, но и с экранировкой поля поляризации полем носителей тока.

3.2 Вакуумный пробой промежутка «частица – преграда»

Для заряженных микрочастиц (микрометеороидов и частиц космического мусора) с зарядом $10^{-12} \div 5 \cdot 10^{-14}$ Кл, при взаимодействии их в вакууме с металлической преградой на расстоянии друг от друга равном одному или нескольким диаметрам частицы, наблюдается электрический пробой, в результате которого часть вещества частицы и преграды превращается в ионизированный газ. Если в области пробойного участка создать электрическое поле, то с преграды (мишени) можно снять заряд электронов или ионов. Величина заряда, образованного в результате пробоя, определенным образом связана с потенциалом на частице, определяется структурными дефектами поверхности частицы и мишени и рядом других факторов. Параметры плазмы, полученной в результате пробоя вакуумного промежутка, характеризуются температурой, которая оценивается через потенциальную энергию заряженной частицы [11, 12].

$$T = \frac{kM_a Q_r^2}{2CQ_r \mu} = \xi U_r,$$

где ξ -коэффициент пропорциональности; U_r – потенциал заряженной частицы; M_a – масса анодного пара; C – емкость частицы; Q_r – заряд частицы; μ – коэффициент электропереноса.

Температура катодного факела находится в пределах $5 \div 10$ эВ. Таким образом, высокотемпературная катодная плазма может оказаться достаточно мощным источником ионов, образованных при взаимодействии заряженной пылевой частицы с металлической мишенью. Причем основными параметрами процесса являются заряд частицы и её размер [11].

3.3 Внесение вещества частицы в преграду

При взаимодействии высокоскоростной пылевой частицы с мишенью часть вещества пылевой частицы остается на дне кратера и внедряется в вещество мишени за счет процессов диффузии [13]. Воздействуя на дно кратера рентгеновским (или лазерным) излучением, можно получать спектры рентгеновского излучения и, тем самым, определить химический состав высокоскоростной частицы. Внедренные атомы высокоскоростной частицы создают в заряженной зоне полупроводника локальные уровни. Анализ вольтамперных характеристик позволяет в некоторых случаях определить концентрацию и возможную природу примесных центров [11].

3.4 Кратеобразование

При высокоскоростном соударении частицы с полубесконечной средой образуется кратер, параметры которого являются функциями массы, скорости, плотности частицы [14-17] (рисунок 3.1).

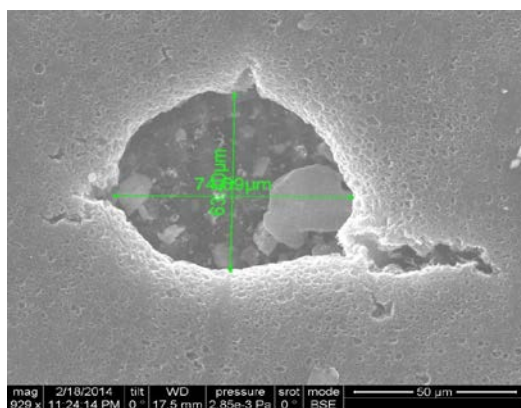


Рисунок 3.1 –Кратер от удара микрочастицы из Al диаметром 5-10 мкм по мишени из Cu

Существующие полуэмпирические выражения, связывающие диаметр, глубину кратера, образованного в полубесконечной преграде справедливы лишь в какой-либо части диапазона скоростей частиц. Например, для частиц размером более 50 мкм и в диапазоне скоростей 1–15 км/с для полубесконечной преграды справедливы следующие выражения:

$$\frac{h}{d_0} = 1,565 \left(\frac{\rho_0}{\rho_1} \right)^{3/5} \left(\frac{H_{B1}}{H_{B0}} \right)^{1/3} \left(\frac{V}{a} \right)^{3/4}$$

$$m_0 = \frac{\pi \rho_1^2}{6 \rho_0} \left[\frac{D}{1,565} \left(\frac{\rho_0}{\rho_1} \right)^{1/2} - \frac{h}{0,785} \right]^3,$$

где m_0, V, ρ_0 – соответственно масса, скорость, плотность частицы; D, h, d_0 – соответственно диаметр, глубина кратера, диаметр частицы; ρ_1 – плотность преграды; H_{B0}, H_{B1} – соответственно твердости материалов частицы и преграды.

Метод измерения, использующий явление кратерообразования основан на определении глубины и диаметра кратера (или диаметра отверстия в тонкой преграде) путем нанесения на поверхности преграды диэлектрических, резистивных, металлических тонких пленок или их различных композиций, причем их толщины должны быть меньше диаметра частицы. Определяя с помощью таких тонкопленочных структур глубину и диаметр кратера, можно перейти к параметрам микрочастицы согласно имеющимся полуэмпирическим соотношениям. Использование тонких пленок позволяет определить глубину кратера, полученного частицами микронных размеров.

Если частица насквозь пробивает мишень, тогда можно воспользоваться полуэмпирическим выражением, связывающим диаметр отверстия в преграде с параметрами частицы [14]:

$$\frac{D_H}{D_S} = 0,45V_0 \left(\frac{h_1}{D_S} \right)^{\frac{2}{3}} + 0,90,$$

где D_H , D_S – диаметр частицы и отверстия соответственно; V_0 – скорость частицы; h_1 – толщина преграды.

Также глубину проникновения и диаметр кратера можно вычислить согласно [18]:

$$p = k \cdot m^{0,352} \cdot \rho^{1,167} \cdot (V \cdot \cos \theta)^{0,667}$$

$$D_{C0} = 5 \cdot 10^{-4} \cdot d^{1,076} \cdot \rho_t^{-0,5} \cdot \rho^{0,784} \cdot V^{0,727} \cdot (\cos \theta)^{0,601},$$

где p – глубина проникновения [см]; D_{C0} – эквивалентный диаметр разрушения [см]; k – константа материала; ρ_t – плотность материала мишени [г/см³]; ρ – плотность материала ударника [г/см³]; V – скорость ударника [км/с]; θ – угол к нормали; m – масса снаряда [г].

3.5 Ионизация

В процессе высокоскоростного соударения микрочастицы с мишенью наблюдается процесс образования плазменного сгустка за счет скоротечного преобразования кинетической энергии частицы в тепловую энергию мишени и микрочастицы, которая разогревает вещества до температуры несколько тысяч градусов. Данный плазменный сгусток начинает распространяться в окружающее пространство и излучает электромагнитные волны в видимом (фотоэмиссия) и невидимом диапазонах. Этот плазменный сгусток можно зарегистрировать, если приложить внешнее электрическое поле, под действием которого ионы будут собираться на измерительном электроде.

В 1963 году Friichtenicht и Slattery обнаружили плазму, образовавшуюся при высокоскоростном ударе [19]. С тех пор, плазменные и связанные с ним электромагнитные эффекты, генерируемые высо-

коскоростные соударения привлекли большое количество исследователей.

В своей работе авторы [20] выяснили зависимости параметров измеряемого сигнала от параметров микрочастицы и конструкции прибора. Формулы, описывающие их, представлены ниже [21]:

$$t = C_t \cdot m^\varepsilon \cdot V^\eta,$$
$$Q = C_p \cdot m^\alpha \cdot V^\beta,$$

где t является временем нарастания сигнала заряда; Q – амплитуда заряда; m – масса микрочастиц и V – скорость удара микрочастицы. Параметры C_t , C_p , η , β должны быть определены с помощью калибровочного эксперимента. Значения ε and α устанавливаются в 0 и 1 соответственно. Тогда массу частицы и скорость удара может быть определена от времени нарастания и амплитуды сигнала.

При ударе микрочастиц об алюминиевую мишень McDonnell [22] получил эмпирическую формулу, которую используют многие исследователи:

$$Q = 10^{-0,88} \cdot m^{1,02} \cdot (V/5)^{3,48}.$$

Влияние угла удара высокоскоростной частицы о поверхность мишени исследовались в работах Hoffmann, Svedhem, Dietzel и др. [21, 23-25]. Влияние электрического поля на процесс ионизации рассмотрены Dalmann, Н.Д. Семкиным и др. [26, 27]. Harano провел эксперименты по воздействию высокоскоростных микрочастиц на солнечные батареи и обнаружил электронную температуру и плотность с помощью зонда Ленгмюра. Негативное влияние высокоскоростного воздействия на солнечные батареи исследовались также А.Б. Надирадзе [28]. Crawford and Schultz исследовали свойства плазмы и электромагнетизма экспериментально. Ratcliffet измерил ионные выходы и их характерные энергии в плазме, создаваемой соударений железных микрочастиц на родий в диапазоне от 1,2 до

87 км/с [19]. Подобными же исследованиями занимались авторы работ [29-31].

Willis et al. [32] провели исследование о влиянии ряда параметров (например, исходного заряда микрочастиц, угла падения) на распределение массы и скорости частиц космической пыли, обнаруженных в типичных детекторах ударной ионизации. Было показано, что исследованные параметры могут вызвать изменения в распределении массы по порядку величины, и в два или три раза в распределении скоростей.

В работе [27] указывается, что при высокоскоростном ударе микрочастицы в мишень сначала происходит образование ударной плазмы из материалов мишени и ударника, потом закалка плазмы и в дальнейшем ее разлет.

В работе [19] предложена теоретическая модель, описывающая стадии плазмы. На основании экспериментальных результатов, расширение плазмы под высокоскоростные соударения можно разделить на три этапа, определенных как образование, равновесия и затухания соответственно.

Распределение скорости ионов в многокомпонентной плазме (плазменный сгусток) в зависимости от температуры подчиняется распределению Максвелла [19]:

$$f(V) = \eta_j \cdot Q \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot m_j}{\pi \cdot k_B \cdot T_j}} \cdot \exp\left(-\frac{m_j \cdot V^2}{2 \cdot k_B \cdot T_j}\right),$$

где Q – общий заряд плазмы, m_j – масса ионов, k_B – постоянная Больцмана, T_j – температура, η_j – доля ионов j -сорта в общей плазме.

Данный метод исследования микрометеороидов и частиц является самым чувствительным и позволяет исследовать элементный состав микрометеороидов и частиц космического мусора при использовании масс-спектрометра.

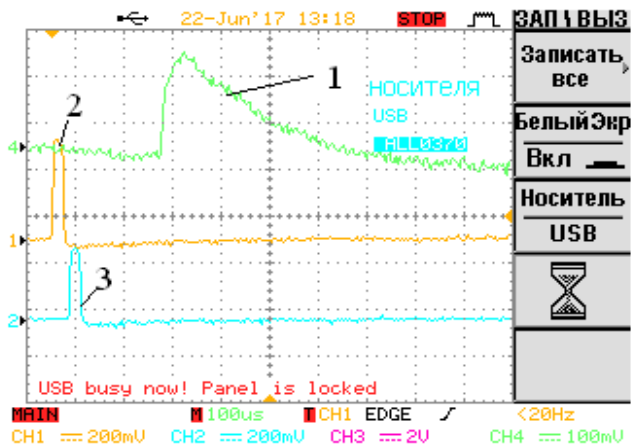


Рисунок 3.2 – Осциллограммы ионизационного импульса (1), и импульсов с колец Фарадея (2, 3), полученные на ускорителе микрочастиц с частицами из Al и мишенью из Cu [33]

3.6 Фотоэмиссия

Явление фотоэмиссии (световая вспышка) связывают с процессом свечения плазменного сгустка. В работе [34] отмечено, что световая вспышка может быть использована как запускающий триггер для другой аппаратуры по исследованию высокоскоростного соударения. Что еще более важно, свойства оптической вспышки могут быть использованы для оценки различных параметров воздействия, таких, как массы и скорости ударника, обеспечивая тем самым простой, но эффективный способ регистрации высокоскоростных микрочастиц в околоземном космическом пространстве, и частиц пыли в других местах в солнечной система.

Ударная вспышка была обнаружена в одних из первых тестов высокоскоростного соударения Atkins [35]. Впервые влияние параметров высокоскоростных микрочастиц на параметрах вспышки на-

блюдал Eichhorn. В своих работах Eichhorn отмечает, что энергия вспышки (E) связана с массой (m) и скоростью (V) ударника соотношением:

$$E = C \cdot m^\alpha \cdot V^\beta,$$

где E – энергия вспышки, образовавшейся при ударе; $\alpha = 1,25$, $\beta = 2,3\dots3$; C – постоянная, зависящая от свойств материала и от принципа измерения световой вспышки. В дальнейших работах упоминается, что $\alpha = 1$, $\beta = 2,3\dots8$ в зависимости от методики проведения эксперимента.

В работе [34] упоминаются, что зависимости, полученные при исследовании вспышки, являются в основном чисто эмпирическими и в первую очередь служат инженерной цели, чтобы получить оценку того, как уровень сигнала будет зависеть от массы и скорости ударника. Нецелые показатели степени, полученные таким образом, являются результатом упрощения сложных физических процессов, происходящих при ударе и выражающие его в виде простого степенного закона. Данные сильно отличаются в различном диапазоне скоростей и материалов.

Типовой вид сигнала представлен на рисунке 3.3 [36]. В работе [34] показано, что лучшая корреляция наблюдается при исследовании полной энергии, то есть необходимо произвести интегрирование приведенного сигнала.

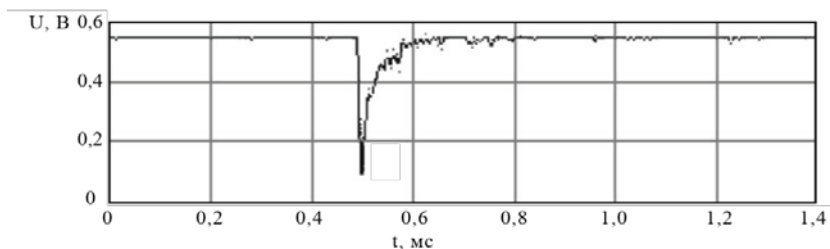


Рисунок 3.3 – Типовой сигнал вспышки

В работах Eichhorn упоминается, что время нарастание сигнала связано со скоростью и не связано с массой. Впоследствии многие исследователи обнаружили, что данная связь значительно слабее [34].

В работе [34] упоминается, что временная корреляция слабо наблюдается для скоростей до 8 км/с. Тем не менее, для скоростей за пределами 8 км/с, имеется слабая зависимость, показывающая, что время нарастания уменьшается с увеличением скорости. Такой переход Fletcher и др. связывают с переходом из состояния частичной ионизации к состоянию полной ионизации в ударной области.

В работе [37] для оценки интенсивности излучения используется закон Стефана-Больцмана. В работе приведено доказательство, что в случае если ударник и материал изготовлены из одного материала и использовать модель излучения черного тела, тогда:

$$E = \left(\frac{\sigma}{(24 \cdot N \cdot k_B)^4} \right) \cdot V^8,$$

где σ – постоянная; k_B – постоянная Больцмана; V – скорость ударника; N – число атомов на единицу массы.

В действительности спектр излучение плазмы имеет изрезанный характер [38, 39]. Если проводить исследования спектра вспышки, то можно получить более полную картину о материале ударника и мишени. При этом надо использовать спектрофотометр.

Как правило, измерение свечение плазмы от воздействия высокоскоростных микрочастиц проводится с помощью ФЭУ [40]. Но также возможно измерение и с помощью фотодиодов, но при этом сильно снижена чувствительность прибора.

Использование световой вспышки позволяет измерить температуру плазменного сгустка, образовавшегося при высокоскоростном ударе, для дальнейшего расчета его разлета.

Температуру T_0 плазмы в начальный момент времени можно вычислить согласно работе авторов [41], если использовать два ФЭУ, на входе которых расположены светофильтры с узкой полосой пропускания:

$$\lg T_0 = 3,87 - 0,65 \cdot \lg R + 0,22(\lg R)^2 - 0,03(\lg R)^3,$$

$$R = \frac{E_{550}}{E_{400}} = \left(\frac{400}{550} \right)^5 \cdot \frac{\int_{T_0}^{300K} (\exp(C_2 / 550T) - 1)^{-1} dT}{\int_{T_0}^{300K} (\exp(C_2 / 400T) - 1)^{-1} dT},$$

$$E(\lambda) = \int_{T_0}^{300K} I(\lambda, T) dT = \int_{T_0}^{300K} \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot (\exp(C_2 / \lambda T) - 1)} dT,$$

где $C_2 = 1,439 \cdot 10^7 \text{ нм} \cdot \text{К}$.

3.7 Электромагнитное излучение

Электромагнитное воздействие, наблюдаемое экспериментально при высокоскоростном соударении, связано с излучением плазменного сгустка и микропотоками, возникающим на мишени [42].

В работе [42] энергия радиоизлучения зависит от материала мишени и линейно связана со скоростью ударника в диапазоне скоростей 2-7 км/с, когда явно не выражены процессы образования плазмы. Для описания использовалось сопоставления с излучением диполя

В работе [43] отмечается, что радиоизлучение связано с колебанием электронов и ионов в плазме, образовавшейся при высокоскоростном соударении. По мере расширения плазмы в свободное пространство, плазменная частота излучения уменьшается. Это электростатическое колебание плазмы будет действовать как антен-

на и излучать электромагнитные волны, распространяющиеся внутри и вокруг космического корабля. Более подробное математическое описание моделей излучения можно найти в работах [44-46].

3.8 Тепловой эффект

Когда происходит удар по мишени, основная доля кинетической энергии частиц нагревает мишень до соответствующей температуры. В работе [47] рассмотрены микрокалориметры, предназначенные для измерения кинетической энергии частиц в космическом пространстве посредством измерения температуры.

Базовый принцип измерения энергии удара калориметром заключается в преобразовании кинетической энергии в тепловую. Тепловая энергия калориметра определяется по формуле :

$$E_{cal} = \eta \cdot E_{kin} ,$$

где η показывает эффективность преобразования энергии при высокоскоростном ударе, причем всегда некоторое количество энергии теряется на инжекцию, формирование плазмы и излучение, а энергия потерь не вносит вклада в нагрев мишени (рисунок 3.4)[47].

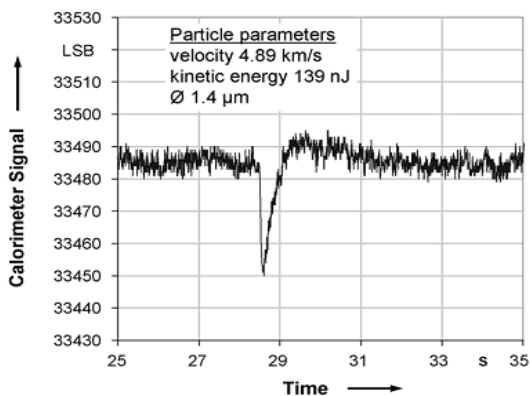


Рисунок 3.4 – Сигнал с калориметрического элемента при ударе частицы

3.9 Изменение электропроводности

Как отмечается в работе Я.Б. Зельдовича, Ю.П. Райзера [48], электропроводность органического стекла и парафина в ударной волне изменяется на $15 \div 20$ порядков, что свидетельствует о «металлизации» этих диэлектриков при сжатии до давления порядка миллионов атмосфер. Данное явление нельзя, по мнению авторов, объяснить термической ионизацией. Оно связано с изменением структуры электронных зон твердого тела при сжатии. При сжатии зоны сближаются, расстояния между ними уменьшается, тем самым облегчаются электронные переходы, приводящие к появлению свободных электронов и металлической проводимости в веществе, ранее бывшем диэлектриком [48].

Дальнейшие исследования [48-50] показали, что изменение электропроводности материалов можно оценить формулой:

$$\sigma(T) \sim e^{-E/kT},$$

где E – энергия активации, k – постоянная Больцмана, T – температура.

Изменение электропроводности позволили создать пленочный датчики высокоскоростных микрометеороидов и космического мусора. Для этих целей используется многослойная структура металл-диэлектрик-металл, представляющий собой конденсатор, который замыкается на время воздействия на него высокоскоростных микрочастиц. Недостатком такого метода измерения является то, что при повышении площади датчика происходит увеличение его емкости и снижение его чувствительности [51, 52]

Список использованной литературы

1 Райкунов Г.Г. Космический мусор. В 2 кн. Кн.1. Методы наблюдения и модели космического мусора. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. 248 с.

2 Novikov L.S., Baranov D.G., Gagarin Y.F., Dergachev V.A., Samokhina M.S., Voronina E.N. Measurements of microparticle fluxes on orbital space stations from 1978 until 2011(2017) // *Advances in Space Research*, 59 (12), pp. 3003-3010.

3 Телегин А.М. Детекторы микрометеороидов и частиц космического мусора // *Авиакосмическое приборостроение*. 2016. № 1. С. 32-42.

4 Белоус А.И., Солодуха В.А., Шведов С.В. Космическая электроника. В 2-х кн. Изд-во: Техносфера, 2015.

5 Вениаминов С.С., Червонов А.М., Космический мусор – угроза человечеству / М: ИКИ РАН, 2012, ISSN 2075-6836.

6 Назаренко А.И. Моделирование космического мусора. М.: ИКИ РАН, 2013. 216 с. (Серия «Механика, управление и информатика»).

7 Новиков Л.С. Основы экологии космического пространства: учебное пособие. М.: Университетская книга, 2006. 84 с.

8 Impact effects from small size meteoroids and space debris // Gerhard Drolshagen / *Advances in Space Research*. 41 (2008), p. 1123–1131.

9 Новиков, Л.С. Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты: учебное пособие. М.: Университетская книга, 2009. 104 с.

10 Минеев В.И., Иванов А.Г. ЭДС, возникающая при ударном сжатии вещества // *Успехи физических наук*, 1976 г. Май. Том 119. Вып.5. С. 75-109.

11 Семкин Н.Д., Воронов К.Е., Новиков Л.С. Регистрация пылевых и газовых частиц в лабораторных и космических условиях. Самара, 2005. 470 с.

12 Держиев В.И., Либих Ф., Рамендик Г.И., Васюта Ю.В. Роль материала анода в заполнении плазмой межэлектродного промежутка при инициировании пробоя в вакууме // ЖТФ. 1981. Т. 51. Вып.4. С. 719-725.

13 Nencum, G. Untersuchungen des projekttil materials iu mikrokratern / G. Nencum // Duplomarbeit uni Heidelberg, 1969. English Translation, NASA TT-F-12327.

14 Высокоскоростные ударные явления / под ред. В.Н. Николаевского. М: Мир, 1973. 533 с.

15 Леонтьев Л.В., Тарасов А.В., Терешкин И.А. Некоторые особенности формы кратеров, образованных высокоскоростными частицами в полубесконечной преграде // Космические исследования. 1971. Т.5. №9. 796 с.

16 Сагомоян А.Я. Проникание. М.: Изд-во МГУ, 1974. 289 с.

17 Crater Ejecta Scaling Laws' Fundamental Forms Based on Dimensional Analysis K.R. HOUSEN AND R. M. SCHMIDT // Journal of Geophysical Research. Vol. 88, No. B3, p. 2485-2499, MARCH 10, 1983.

18 Impact effects from small size meteoroids and space debris // Gerhard Drolshagen / Advances in Space Research. 41 (2008), pp. 1123–1131.

19 Theoretical model for plasma expansion generated by hypervelocity impact / Yuanyuan Ju, Qingming Zhang, Dongjiang Zhang, Renrong Long, Li Chen, Fenglei Huang, and Zizheng Gong/ physics of plasmas, 21, 092112 (2014).

20 Friichtenicht, J.F., Slattery, J.C. Ionisation associated with hypervelocity impact // NASA TN D-2091, 1963

21 Data Handling and Evaluation for Autonomous Experiments in Interplanetary Missions// Robert Senger/ genehmigten Dissertation/ 2007.

22 Hazard of Hypervelocity Impacts on Spacecraft / Shu T. Lai and Edmond Murad // Journal of spacecraft and rockets. 2002. Vol. 39. №1. pp. 106-114.

23 Hoffmann H.-J., Entwicklung eines Detektors zur Massen – und Geschwindigkeitsanalyse von kosmischen Staubteilchen, Dissertation, Ruprecht-Karls-Universität, Heidelberg, 1971.

24. Dietzel H., Neukum G., Rauser P., Micrometeoroid simulation studies on metal targets // J. Geophys. Res., Vol. 77, No. 8, p. 1375, 1972.

25. Svedhem H., Pedersen A., Behaviour of ejecta particles and generated plasma at hypervelocity impacts // Hypervelocity Impacts in Space (ed. J.A.M. McDonnell), University of Kent at Canterbury, 1992.

26. Dalmann B.K., Grün E., Kissel J., Dietzel H. The ion composition of the plasma produced by impacts of fast dust particles // Planet. Space Sci., Vol. 25, pp. 135-147, 1977.

27. Semkin N.D., Pomel'nikov R.A., Telegin A.M. Expansion of a shock plasma in the accelerating field of a parallel-plate capacitor in a time-of-flight mass spectrometer // Technical Physics. 2014. Vol. 59. Issue 5. Pp. 663-669.

28. Nadiradze A.B., Kalaev M.P., Semkin N.D. Meteoroid and technogenic particle impact on spacecraft solar panels // Cosmic Research (English translation of Kosmicheskie Issledovaniya). 2016. Vol. 54. Issue 5. Pp. 366-374.

29. DeLuca M., Munsat T., Thomas E., Sternovsky Z. The ionization efficiency of aluminum and iron at meteoric velocities // Planetary and Space Science. 2017.

30. Thomas E., Horányi M., Janches D., Munsat T., Simolka J., Sternovsky Z. Measurements of the ionization coefficient of simulated iron micrometeoroids // Geophysical Research Letters, 2016, 43 (8), pp. 3645-3652.

31. Micrometeoroid impact charge yield for common spacecraft materials/ A. Collette, E. Grün, D. Malaspina¹ and Z. Sternovsky // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2014. C. 6019-6026.

32 Willis, M.J., Burchell, M.J., Cole, M.J., McDonnell, J.A.M., «Influence of impact ionisation methods on determination of dust particle flux in space», Planet. Space Sci., 2004. Vol. 52, pp. 711-725.

33 Телегин А.М. Детектор высокоскоростных микрочастиц на основе ионизационного принципа измерения // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. №6. С. 618-625.

34 Goel A., Lee N., Close S. Estimation of hypervelocity impact parameters from measurements of optical flash / International Journal of Impact Engineering, 2015, №84, pp. 54-63.

35 Burchell M.J., Cole M.J. , Ratcliff ANDP. R. Light Flash and Ionization from Hypervelocity Impacts on Ice // ICARUS 122,359–365 (1996).

36 Semkin N.D., Telegin A.M. Impact experiments with a multiparameter detector of micrometeoroids // Instruments and Experimental Techniques. 2017. Vol. 60. Issue 1. Pp. 126-129.

37 BAIRD J.K., HOUGH G.R. and KING T.R. Velocity dependence of impact fluorescence // Int. J. Impact Engng. Vol. 19, No. 3, pp. 273 276, 1997.

38 Emission Spectroscopy of Hypervelocity Impacts on Aluminum, Organic and High-Explosive Targets//Jimmy Verreault, James P.R. Daya, Wouter H.C. Halswijkstra, Jason Loiseaub, Justin Huneault, Andrew J. Higgins, Adam D. Devir/Procedia Engineering 103 (2015) 618 – 627.

39 Spectral measurements of hypervelocity impact flash//R.J. Lawrence W.D. Reinhart, L.C. Chhabildas, T.F. Thornhill/International Journal of Impact Engineering 33 (2006) 353–363.

40 Data Report of Hypervelocity Micro-Particle Impact Light Flash Data and MOS Impact Detector Output/ Serna, Patrick J. // PHILLIPS LAB KIRTLAND AFB NM JUN 1995, 124 c.

41 Residual temperature measurements of light flash under hypervelocity impact / K. Tsembelis, M.J. Burchell, M.J. Cole, N. Margaritis // International Journal of Impact Engineering 35 (2008) 1368–1373.

42 Dependence of microwave emissions from hypervelocity impacts on the target material / K. Maki, E. Soma, T. Takano, A. Fujiwara, and A. Yamori // Journal of Applied Physics 97, 104911 (2005).

43 Analysis of electromagnetic and electrostatic effects of particle impacts on spacecraft // Michael C. Kelley a, Stephanie Pancoast, Sigrid Close, Zhenzhen Wang / Advances in Space Research, 49 (2012), pp. 1029–1033.

44 Lesceux J.M., Lrmaire J. and Meyer-Vernr N. Electric dipole antennae used as micrometeoroid detectors // Phet. Space Sci., Vol. 37, No. 10, pp. 1291-1302, 1989.

45 Martin Rudolph. Review of Radio Frequency Emission from Hypervelocity Impact Plasmas // Procedia Engineering, 58 (2013), 409 – 417.

46 Electromagnetic pulses generated by meteoroid impacts on spacecraft / S. Close, P. Colestock, L. Cox, M. Kelley, and N. Lee // Journal of geophysical research, V. 115, A12328.

47 Kobusch M., Sarge S., Bunte K.D., Fichna T. , Hagedorn D., Jäger F. Microcalorimeter array for the measurement of kinetic energies of small particles in space // Thermochemica Acta, 492, 89–94, 2009.

48 Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: «Наука», 1966. 605 с.

49 Фортон В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т. Физика неидеальной плазмы: учеб. пособие. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 528 с.

50 Телегин А.М., Калаев М.П., Семкин Н.Д. Обзор исследований проводимости диэлектриков и полупроводников под высоким давлением // Вестник Самарского государственного аэрокосмиче-

ского университета имени академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2011. №7(31). С.97-106.

51 Semkin, N.D., Telegin, A.M. Detectors of physicochemical characteristics of micrometeoroids based on film MDM structures 2011 Inorganic Materials: Applied Research, 2 (5), pp. 419-424.

52 Семкин Н.Д., Воронов К.Е. Проводимость ударносжатых МДМ-структур на основе полиметилметакрилата // ЖТФ. – 1998. – Т. 68. – Вып. 8. – С.63-66.

Глава 4 КОНСТРУКЦИЯ ПРИБОРОВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МИКРОМЕТЕОРОИДОВ И КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

В этом разделе рассмотрим детекторы, вырабатывающие электрический сигнал при взаимодействии с ними твердых микрочастиц. Сигнал детектора может нести информацию не только о факте попадания частицы, но и о ее параметрах, от которых зависят амплитуда и форма сигнала. Преимуществом таких детекторов является возможность изучения с их помощью пространственно-временных вариаций потоков частиц, а недостатком – относительно малая площадь чувствительной поверхности, что при низкой плотности измеряемых потоков требует проведения длительных измерений для набора необходимой статистики. Достаточно полные сведения о принципах построения и конструкциях детекторов твердых микрочастиц приведены в монографии [1].

Работа детектора может основываться на любом из рассмотренных выше физических явлений, возникающих при ударе твердой микрочастицы о мишень. Поскольку величина практически любого эффекта, вызываемого соударением микрочастицы с поверхностью твердого тела, зависит, как это было показано выше на примерах образования кратеров и эмиссии электронов и ионов из зоны соударения, от двух параметров воздействующей частицы – ее массы и скорости, при создании приборов следует стремиться к тому, чтобы их работа основывалась на двух-трех различных физических явлениях. В этом случае из экспериментальных данных возможно независимое определение массы и скорости частиц.

В соответствии со спецификой физических явлений, лежащих в основе работы детекторов, последние могут быть разделены на

группы. Так, пьезоэлектрические датчики реагируют на *механическое воздействие*. К детекторам этой группы относятся также твердотельные и газонаполненные ячейки. В первом случае удар частицы вызывает резкое изменение электрического сопротивления ячейки, а во втором – создает сквозной пробой в тонкой стенке ячейки, что влечет за собой выход газа из ячейки и замыкание связанных с ней электрических контактов.

Наиболее совершенными детекторами, реагирующими на механическое воздействие, являются тонкопленочные конденсаторы. Такие детекторы вырабатывают сигналы на нагрузочном сопротивлении как при ударах, не приводящих к сквозному пробое пленки, так и при сквозных пробоях. В отсутствие пробоя импульс тока в электрической цепи возникает за счет резкого увеличения проводимости диэлектрика при его ударном сжатии, а при пробое – за счет замыкания обкладок конденсатора через сквозной проводящий канал. Важно, что даже при сквозных пробоях датчик срабатывает многократно, так как при прохождении импульса тока металлизация вокруг отверстия оплавляется и отходит от него, предотвращая тем самым стационарное замыкание обкладок.

Существует достаточно много разновидностей детекторов, в которых используется *эффект преобразования кинетической энергии* частицы во внутреннюю энергию вещества. К этой группе относятся детекторы, работающие на основе возникновения при ударе эмиссии электронов и ионов, световых вспышек, радиоизлучения, и некоторые другие.

При регистрации световых вспышек, вызываемых ударами твердых частиц, для повышения их интенсивности можно использовать сцинтилляторы CsI(Tl) или ZnS(Ag), применяемые в ядерно-физических исследованиях. Методы и технические средства регистрации световых вспышек (фотоэлектронные умножители, фотодиоды), используемые в обоих случаях, во многом схожи. Продолжая

эту аналогию, укажем, что полупроводниковые детекторы, являющиеся в настоящее время одним из главных инструментов при исследовании ионизирующих излучений, также могут быть использованы для регистрации твердых микрочастиц, поскольку при интенсивном ударном сжатии полупроводника в зоне проводимости образуется достаточное количество неравновесных носителей заряда.

Наибольший интерес в числе детекторов данной группы представляют эмиссионные детекторы, использовавшиеся в ряде космических экспериментов [1]. В эмиссионных детекторах производится измерение полного электронного или ионного заряда, эмитируемого из области соударения твердой частицы с мишенью. Заряд собирается на расположенный вблизи мишени коллектор, подключенный к измерительной цепи. В качестве коллектора часто используется металлическая сетка.

Для измерения очень малых эмитируемых зарядов (менее 10^{-14} – 10^{-15} Кл) можно использовать вторично-электронные умножители (ВЭУ). При этом масса регистрируемых частиц может быть снижена до $\sim 10^{-18}$ кг. При использовании ВЭУ между металлической мишенью, о которую ударяются твердые микрочастицы, и первым динодом или экранирующей сеткой, часто устанавливаемой на входе ВЭУ, прикладывается некоторое ускоряющее напряжение, полярность которого определяется знаком заряда собираемых на динод частиц: электронов или положительных ионов. Коэффициент усиления ВЭУ составляет $\sim 10^4$ – 10^5 .

Важной разновидностью эмиссионных детекторов являются времяпролетные масс-спектрометрические преобразователи. Некоторые конструкции таких преобразователей, разработанные специально для использования в космических экспериментах, и результаты их лабораторных испытаний описаны в [1].

Рассмотренные выше детекторы твердых микрочастиц являются детекторами контактного типа, т. е. они вырабатывают сигнал

только при ударах частиц о чувствительную поверхность. Существуют также и бесконтактные детекторы: *индукционные и оптические*. Применение первых возможно только при наличии у регистрируемых частиц электрического заряда. Оптические детекторы достаточно громоздки и даже в случае искусственной подсветки регистрируемых частиц уступают по чувствительности ионизационным детекторам [1].

4.1 Методы и средства регистрации частиц естественного и искусственного происхождения на основе тонких пленок

Методы и устройства для регистрации высокоскоростных пылевых частиц можно классифицировать с учетом ряда их особенностей следующим образом [1-7]:

1 По способу взаимодействия частиц с прибором методы разделяются на контактные и бесконтактные.

2 По информативности преобразователи характеризуются одной выходной зависимостью или несколькими.

3 По быстродействию методы и устройства регистрации различаются длительностью процесса формирования выходных импульсных сигналов.

Современное состояние физических и технологических аспектов в изучении свойств тонких пленок, а также новых материалов позволяет использовать их в качестве чувствительных элементов преобразователей пылевых частиц. Эксперименты, проводимые с преобразователями пылевых частиц на основе тонких пленок, обнаруживают перспективы их использования в реальных условиях. Пленочные МДМ – структуры могут быть не только регистраторами частиц, но и запоминающими устройствами, а также служить для повышения чувствительности к некоторым характеристикам пылевых частиц.

Геометрия тонких пленок может быть очень малых размеров, выполнена различными технологическими методами (фотолитография, эмиссионная технология, лазерная технология). В связи с некоторой спецификой преобразователей пылевых частиц, например, их больших площадей, широкого диапазона геометрических размеров пленок, существует и определенная трудность изготовления датчиков, особенно, когда необходима регистрация и измерение характеристик частиц микронных и субмикронных размеров. Эти проблемы связаны с технологической сложностью изготовления полосок длиной 10-20 см и шириной несколько микрометров. В случае регистрации частиц с диаметром порядка десятков микрон технологические трудности резко снижаются, то есть пленки можно изготовить обычными методами фотолитографии.

Преобразователи на основе тонких пленок можно разделить на три класса [1]:

- 1 Преобразователи, основанные на использовании металлических, резистивных, полупроводниковых пленок в виде полосковых структур.

- 2 Преобразователи, основанные на использовании структур металл-диэлектрик-металл (МДМ) и металл-диэлектрик-полупроводник (МДП).

- 3 Преобразователи совмещенного типа.

По способу преобразования энергии частицы пленочные преобразователи разделяются на три класса:

- 1 Преобразователи с частичным механическим разрушением площади чувствительной поверхности (преобразователи с запоминанием ударного воздействия).

- 2 Преобразователи неразрушающего контроля ударных воздействий, основанные на взаимодействии ударных, звуковых волн с МДМ-МДП – структурами.

- 3 Преобразователи с пленками, реализующими различные явления.

4.2 Комбинированные датчики

В качестве примера построения комбинированного детектора рассмотрим прибор, использовавшийся в первых измерениях потоков твердых микрочастиц естественного и искусственного происхождения в области геостационарной орбиты [1, 8].

Схема прибора, построенного на основе двух тонкопленочных конденсаторных датчиков MDM1 и MDM2, приведена на рисунке 4.1.

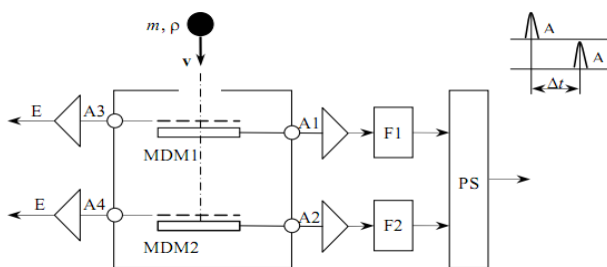


Рисунок 4.1 – Схема прибора с двумя тонкопленочными конденсаторными датчиками

В данном приборе имеется возможность измерения скорости частицы времяпролетным методом, если она пробивает верхний тонкопленочный датчик. Если параметры частицы таковы, что сквозного пробоя верхнего датчика не происходит, частица регистрируется по параметрам импульса верхнего датчика. Импульсы от верхнего и нижнего конденсаторных датчиков регистрируются соответственно в каналах A1 и A2.

Сетки, установленные вблизи поверхности конденсаторных датчиков, позволяют измерять величины зарядов, эмитируемых при ударе (каналы A3 и A4), что, как уже указывалось, позволяет получить необходимый набор исходных данных для независимого определения скорости и массы регистрируемой частицы.

4.3 Пленочные конструкции на основе резистивных проводников

Рассмотрим конструкцию, относящуюся к первому классу.

В одной из конструкций [1] пленочных детекторов пылевых частиц, чувствительная поверхность состоит из m конденсаторов (МДМ – структур) и нескольких резистивных каналов, каждый из которых содержит n полосков с соответствующими шириной b и толщиной h каждый (рисунок 4.2).

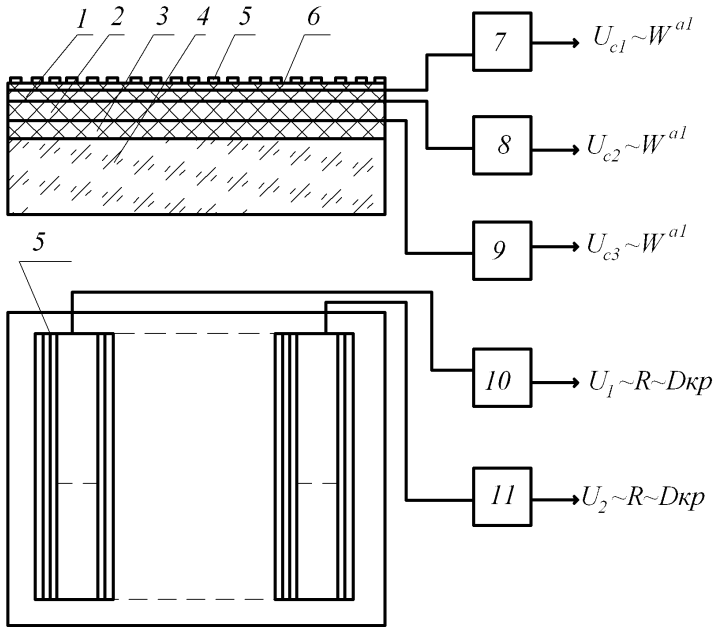


Рисунок 4.2 – Блок-схема конденсаторно-резистивного датчика:
 1, 2, 3, 6 – диэлектрик; 4 – подложка; 5 – металлические полоски;
 7-11 – блоки обработки

Толщины диэлектрических, металлических пленок конденсаторов, размеры полосков выбираются исходя из размеров, скорости исследуемых частиц, а точнее из размеров образованных кратеров в полубесконечной преграде, состоящей из m конденсаторов. При ударе частицы в резистивный канал, часть полосков рвется, в результате чего сопротивление канала меняется.

Как известно, при высокоскоростном соударении частицы с полубесконечной средой образуется кратер, параметры которого являются функциями массы, скорости, плотности частицы [9, 10].

Метод измерения, использующий явление кратерообразования основан на определении глубины и диаметра кратера (или диаметра отверстия в тонкой преграде) путем нанесения на поверхности преграды диэлектрических, резистивных, металлических тонких пленок или их различных композиций, причем их толщины могут быть меньше диаметра частицы. Определяя с помощью таких тонкопленочных структур глубину и диаметр кратера, можно перейти к параметрам частицы согласно имеющимся полуэмпирическим соотношениям. Использование тонких пленок позволяет определить глубину кратера, полученного частицами микронных размеров.

Другим примером является датчик на основе проводящих полосков (рисунки 4.3-4.4) [11].

Данный датчик космического мусора разработан в Технологическом институте Кюсю. Датчик был запущен в околоземное пространство 18 мая 2012 года, были успешно получены данные, показывающий, что он не обнаружил ни одного удара космического мусора.

Тем не менее, в лабораторных условиях датчик продемонстрировал способность обнаружения воздействия космической пыли диаметром от 100 мкм до 600 мкм.

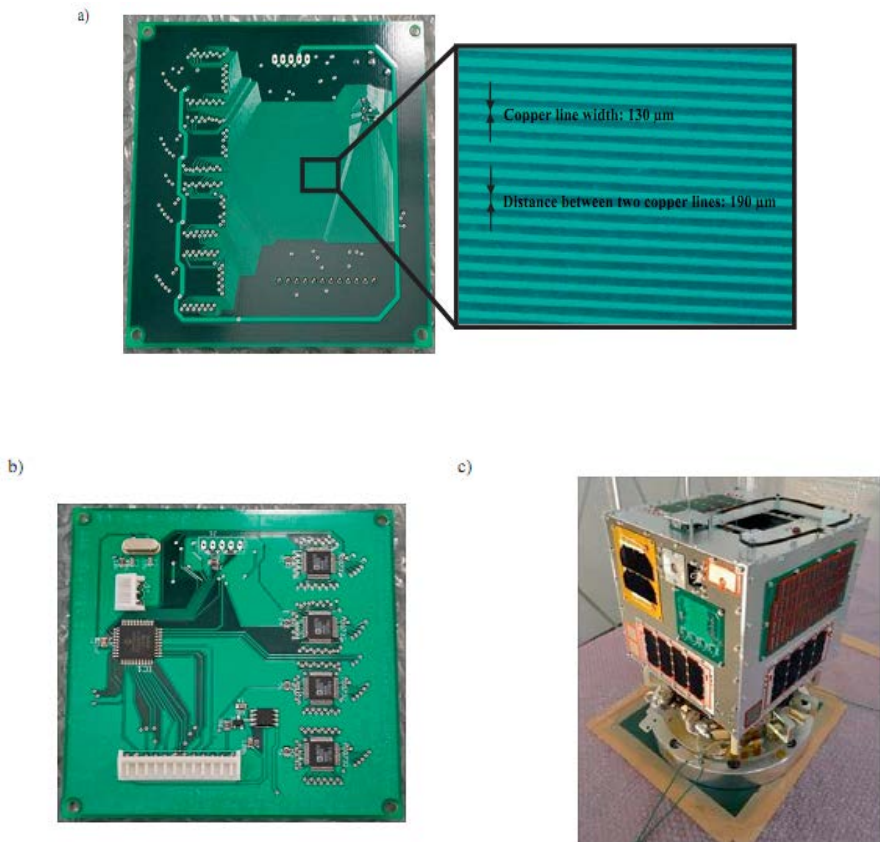
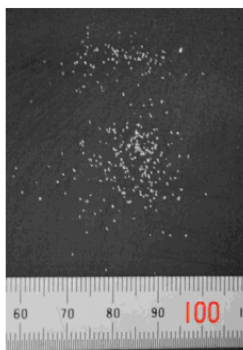


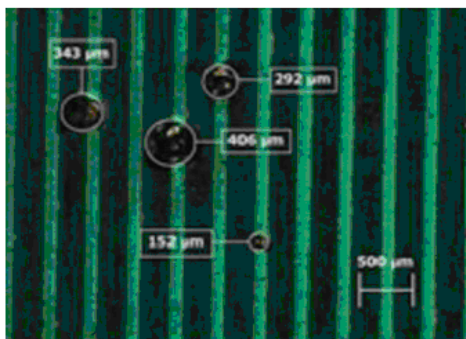
Рисунок 4.3 – Детектор пылевых частиц:

a – передняя панель с 128 медными линиями, подвергшимися воздействию космической среды; *b* – задняя сторона детектора с электронными компонентами для контроля состояния каждой линии; *c* – фотография спутника с установленным на него детектором

a)



b)



c)

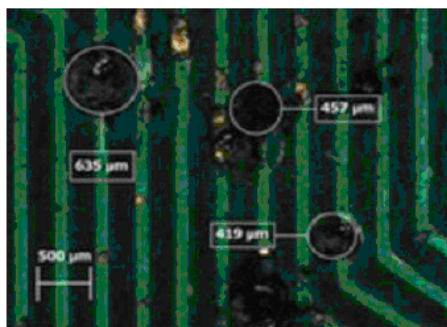


Рисунок 4.4 - Результаты экспериментов:

- a* – эксперимент на ускорителе с частицами Al_2O_3 размерами от 212 до 300 мкм и скоростью около 4,7 км/с;
- b* – разрыв одного проводника;
- c* – разрыв нескольких проводников

Интерес представляет также датчик орбитального мусора на основе солнечных панелей (рисунки 4.5-4.9) [12].

Датчик представляет собой многослойную конструкцию, выполненную на базе солнечных батарей. И позволяет оценивать размер частиц и место их столкновения путем измерения данных с матрицы проводников, нанесенных на солнечные батареи.

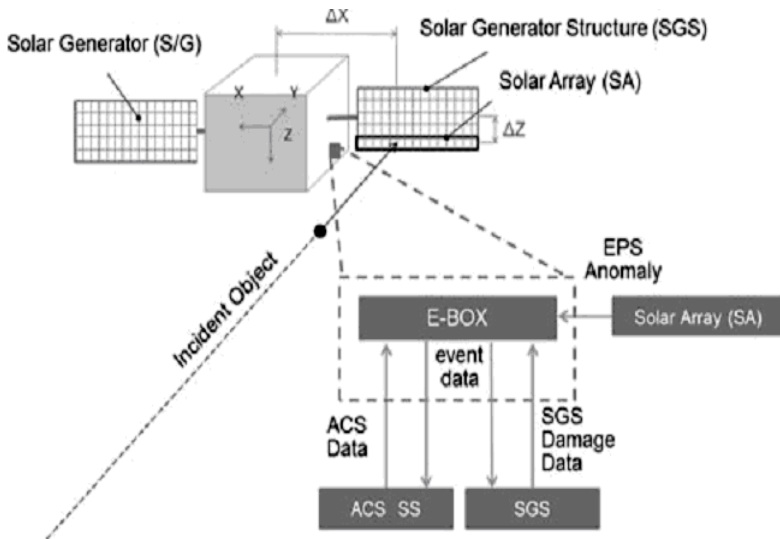


Рисунок 4.5 – Концепция датчика на основе солнечных батарей

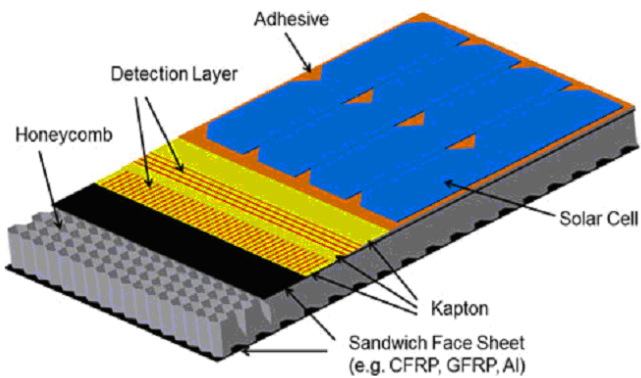


Рисунок 4.6 – Конструкция датчика

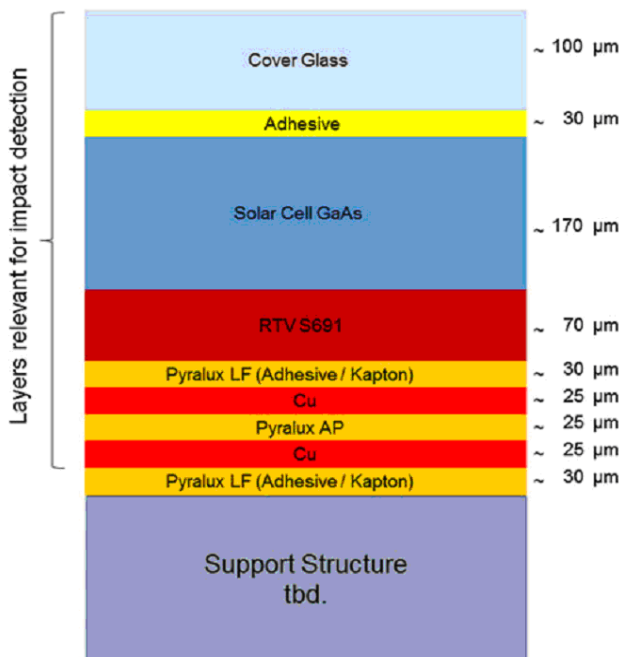


Рисунок 4.7 –Торцевой разрез датчика

Согласно данным авторов статьи [12] получены данные, характеризующие частоту срабатывания датчика (таблица 4.1).

Таблица 4.1 - Параметры мусора

Object diameter	LEO		GEO	
	Impacts (1/m ² /year)	Time between two impacts	Impacts (1/m ² /year)	Time between two impacts
>100μm	0,4220E+03	1,2D	0,1013E+01	2,2D
>1mm	0,1445E-01	6,9E+01Y	0,9462E-01	1,06E+04Y
>1cm	0,2844E-03	3,5E+03Y	0,2935E-03	3,4+06Y

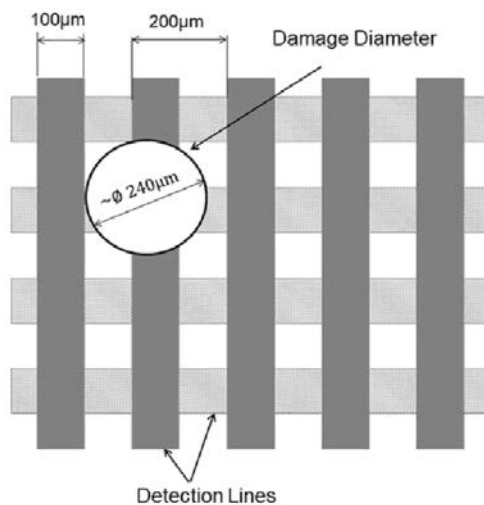


Рисунок 4.8 – Кратер при ударе частицы

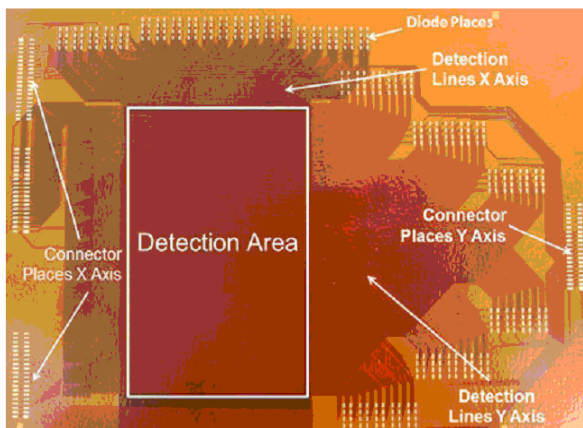


Рисунок 4.9 – Фотография области детектирования

Датчик космического мусора на основе чувствительной сетки сопротивлений (рисунок 4.10) [13].

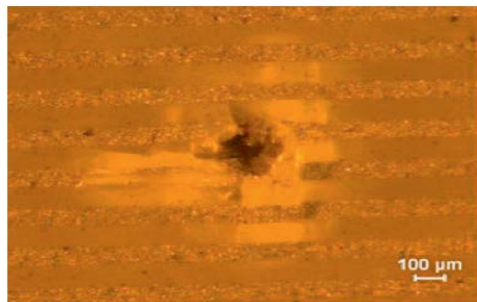


Рисунок 4.10 – Фотография разорванных полосков

Датчик служит для обнаружения воздействия высокоскоростных частиц в реальном времени и для определения размера частиц. Он использует резистивную сетку на тонкой подложке. Частицы разрушают линии на сетке, тем самым изменяя общее сопротивление сетки. Изменение сопротивления пропорционально ширине поврежденной области (т.е. количество резистивной линии, которые разбиты), которая, в свою очередь пропорциональна размерам ударяющей частицы. Этот метод обеспечивает большую площадь контроля, малую массу датчика, низкую мощность потребления для измерения потока мелких частиц пыли в пространстве. На основе экспериментов на легкогазовой пушке было доказано, что данный метод применим для частиц размерами порядка 50 мкм.

4.4 Датчик на основе пьезоэффекта

Другим типом датчиков является датчик на основе пьезоэффекта. В этих датчиках используется эффект преобразования механических колебаний, возникающих при ударе микрометеороида, в пульсирующий электрический сигнал с помощью пьезоэлектрических кристаллов. Такие типы датчиков можно реализовать с помощью тонких пленок окиси цинка. При нанесении пленок на мишень в ви-

де матрицы появляется возможность совмещения их с другими пленками (люминофором, диэлектриком) и получения многоинформативного преобразователя.

Американские исследователи использовали в качестве пластины изолированные элементы обшивки, к которым крепились пьезоэлектрические преобразователи. Последние типы пьезоэлектрических преобразователей имели чувствительность по массе в пределах $10^{-9} \div 6,5 \cdot 10^{-11}$ г.

Данный метод может быть использован при совмещении с другими. Однако данный метод регистрации нуждается в тщательной защите от различного рода внешних воздействий (вибраций, ударов, термических шумов).

Примером такого типа детекторов является пылевой датчик миссии ВеріColombo [14]. Данный датчик предназначен для контроля пылевой обстановки вокруг Меркурия и состоит из четырех пьезосенсоров, при ударе по которым возникает импульс напряжения, по параметрам которого можно судить о скорости и импульсе ударяющей частицы согласно выражениям:

$$U_p = a \cdot p + b, \quad U = c \cdot \Delta t + d,$$

где U_p – выходное напряжение с датчика; p – импульс ударника; Δt – длительность переднего фронта импульса с пьезодатчика a, b, c, d – экспериментально определяемые параметры.

На рисунке 4.11 представлена структура датчика, характеристики которого приведены на рисунках 4.12 – 4.18.

Площадь чувствительной поверхности датчика 64 см^2 . Резонансная частота порядка $1,1 \text{ МГц}$. Диапазон температур от -160 до 200 град Цельсия. Чувствительность $1 \text{ пкг} \cdot \text{км/с}$. Масса датчика 220 г , масса блока электроники 381 г . Мощность потребления – 3 Вт максимум.

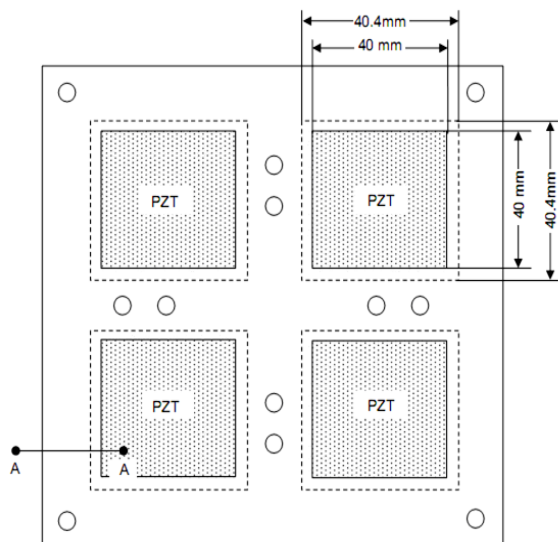


Рисунок 4.11 – Пылевой датчик миссии VeriColombo [14]

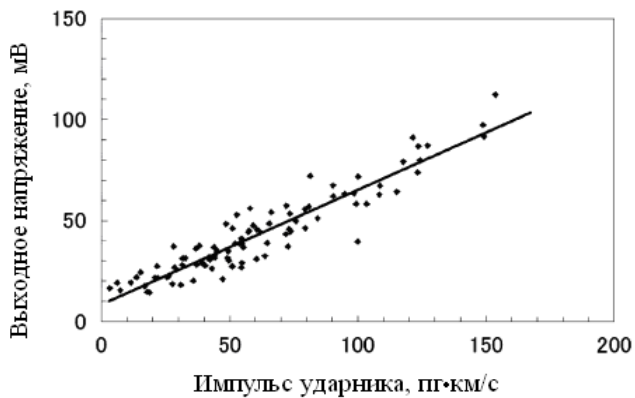


Рисунок 4.12 – Зависимость выходной амплитуды сигнала с датчика от импульса ударника [14]

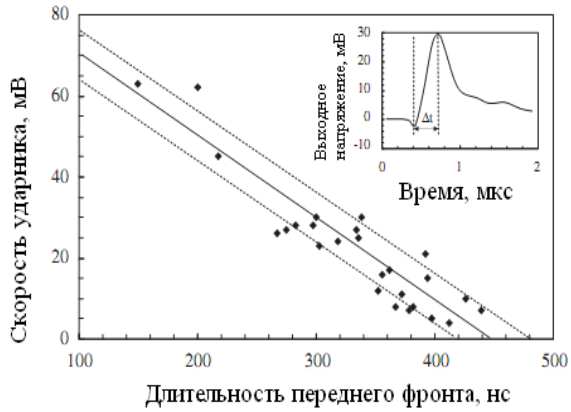


Рисунок 4.13 – Зависимость скорости частицы и длительности переднего фронта сигнала на выходе датчика [14]

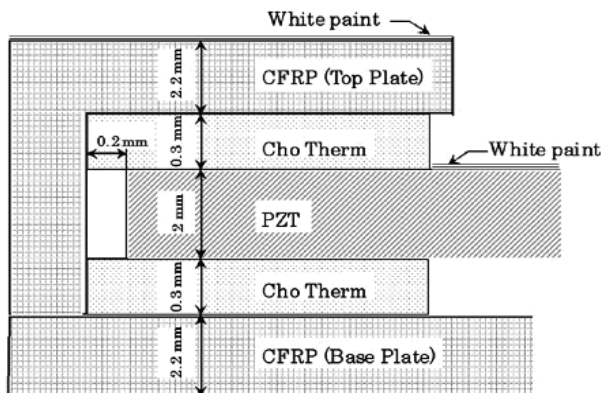


Рисунок 4.14 – Конструкция крепления PZT

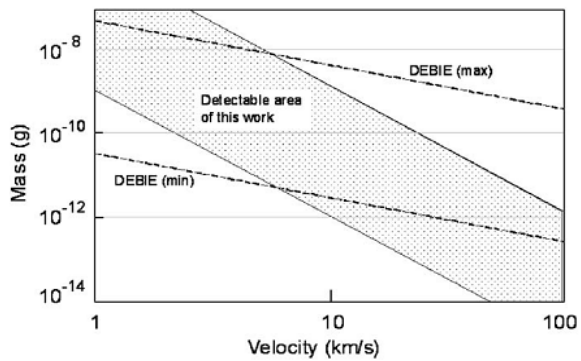


Рисунок 4.15 – Диапазон работы приборы

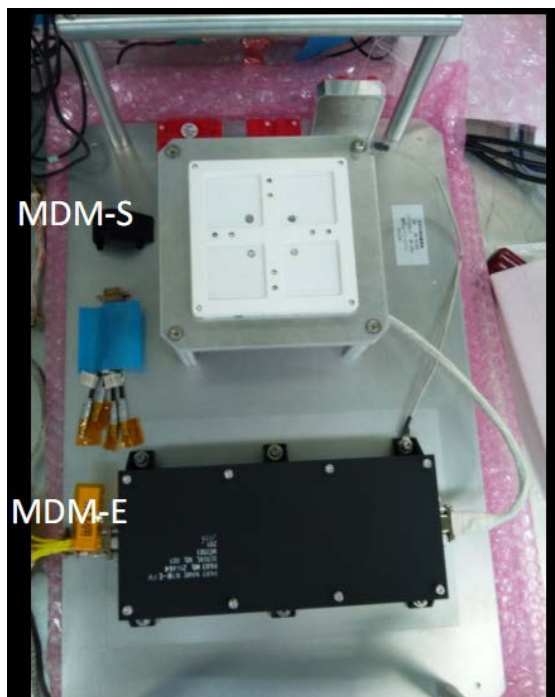


Рисунок 4.16 – Фотография MDM [15]

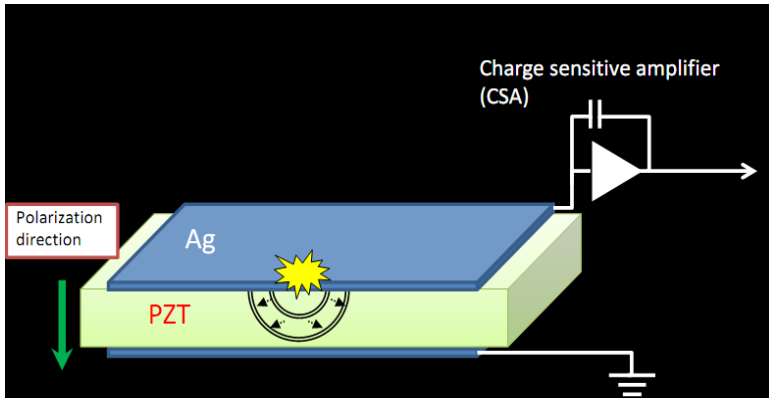


Рисунок 4.17 – Схема подключения усилителя к пьезодатчику

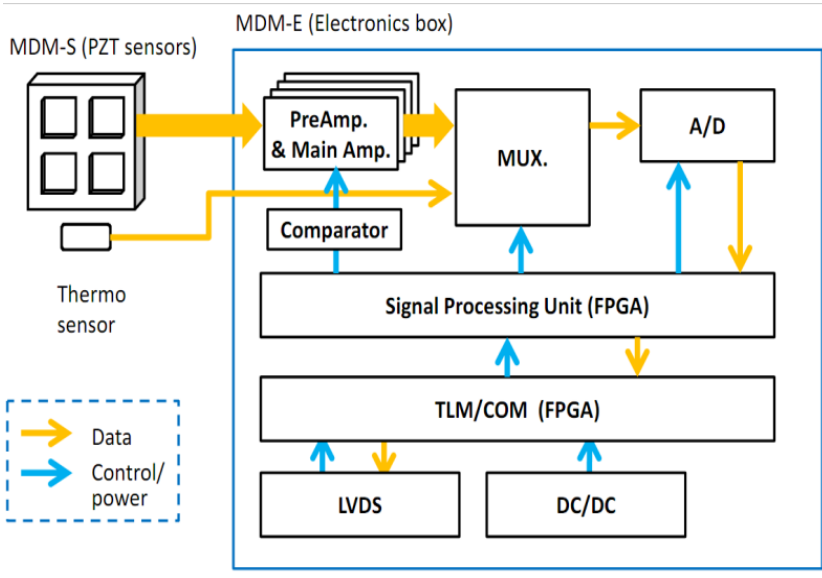


Рисунок 4.18 – Структурная схема датчика MDM

4.5 Матрица тонкопленочных конденсаторов

Другим примером датчиков является матрица тонкопленочных конденсаторов [16, 17], которая может служить преобразователем как потока частиц, так и параметров индивидуальной частицы (рисунки 4.19, 4.20).

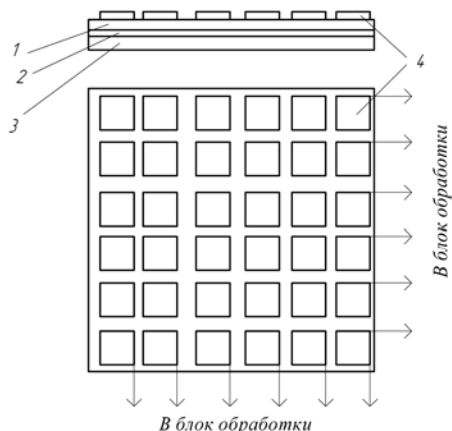


Рисунок 4.19 – Схематическое изображение пленочного датчика:
1 – диэлектрик, 2 – нижняя обкладка, 3 – подложка, 4 – верхняя обкладка

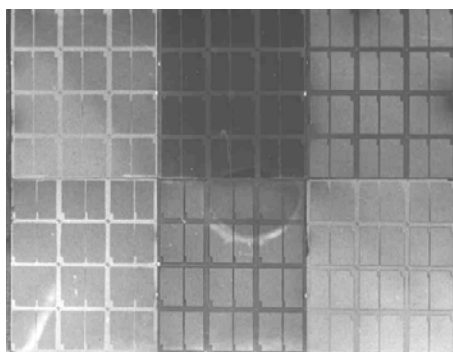


Рисунок 4.20 – Матрица тонкопленочных конденсаторов [18]

Измеряется диаметр кратера по величине потери площади верхней обкладки конденсатора, если последний включить в генератор высокочастотных колебаний, частота которого увеличивается пропорционально объему кратера (по величине площади, удаляемой с верхней обкладки за счет высокотемпературных эффектов при ударе).

Для регистрации частиц размерами менее 100 мкм необходимо уменьшать размеры конденсаторов, составляющих матрицу, что предполагает технологические трудности при изготовлении матрицы. Кроме того, необходимо повышать в связи с этим частоту генератора.

Обработку информации с экспонированных МДМ-структурах можно проводить с помощью устройства, состоящего из масс-спектрометра, вакуумной камеры и устройства пробоя. Производится пробой того или иного замкнутого частицей конденсатора ранее экспонированной матрицы. Образованные ионы анализируют в специально модифицированной конструкции масс-спектрометра.

4.6 Датчик на основе регистрации ударной вспышки

Как известно при высокоскоростном соударении твердых тел возникает световая вспышка, параметры которой являются функциями параметров частицы. Общая световая энергия и интенсивность вспышки является функциями массы и скорости частицы. Кроме того, проведенные эксперименты показали, что световая энергия и интенсивность света зависят от формы частицы. На выходной сигнал влияют также и конструктивные параметры.

На рисунке 4.21 изображена конструкция люминесцентно-конденсаторного датчика *1-5*, которая является совмещенной. Здесь люминофор *4* является чувствительной к энергии частицы пленкой, а конденсатор *1-3* разрушается в месте удара и по истечении времени взаимодействия, восстанавливается с помощью источника постоянного тока.

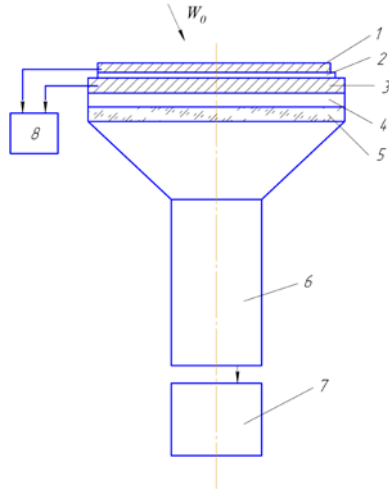


Рисунок 4.21 – Блок-схема люминесцентно-конденсаторного датчика:

1, 2, 3 – МДМ – структура; 4 – люминофор; 5 – стекло; 6 – ФЭУ;
7, 8 – блоки обработки

Площадь разрушенной верхней обкладки от одной частицы на 7-9 порядков меньше всей ее площади. Как указывалось выше, конденсатор может функционировать в режимах пробоя-восстановления, изменения электропроводности ударносжатого диэлектрика и запоминания ударного воздействия.

Площадь разрушенной верхней обкладки от одной частицы на 7-9 порядков меньше всей ее площади. Как указывалось выше, конденсатор может функционировать в режимах пробоя-восстановления, изменения электропроводности ударносжатого диэлектрика и запоминания ударного воздействия.

Люминесцентно-конденсаторный преобразователь (рисунок 4.22) использовался для регистрации параметров микрометеоритов и техногенных частиц микронных и субмикронных размеров на космических аппаратах серии «Космос».

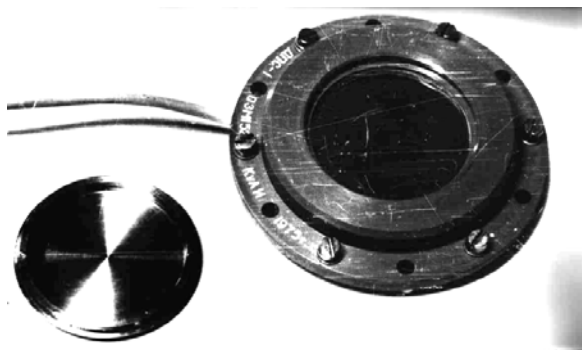


Рисунок 4.22 – Люминесцентно-конденсаторный преобразователь

4.7 Полупроводниковые датчики

Полупроводниковые датчики. Принцип действия таких датчиков основан на эффекте исчезновения запрещенных зон ΔE при критических давлениях, при которых электроны из валентной зоны переходят в зону проводимости. Детектор такого типа описан в [19]. Конструктивно он состоит из круглого металлического коллектора, соединенного с зарядочувствительным усилителем. Коллектор поддерживает тонкую пластину p -кремния (толщиной $< 0,1$ мм), на которую нанесен слой селена Se (толщиной $< 0,1$ мм). Для защиты чувствительной поверхности от света, механического воздействия и радиоизлучений наружная сторона селенового слоя покрыта тонким слоем эпоксидного слоя и затем тонким слоем золота, соединенного с землей посредством металлического экрана с круглым входным отверстием. Принцип измерения основан на кратковременном переходе материала Se в металлическую фазу под действием кратковременного давления – динамического воздействия, вызванного ударом частицы. Чувствительная поверхность датчика $S = 2 \text{ см}^2$.

Рассмотрим конденсаторные датчики, которые широко использовались в межпланетном пылевом эксперименте, проводимом на базе космической лаборатории LDEF, и используются в современных исследованиях. Конструкция используемого датчика показана на рисунке 4.23.

Конденсаторный датчик состоит из кремниевой полупроводниковой основы 3 толщиной 250 мкм, на верхнюю поверхность которого наносится слой диэлектрика SiO_2 толщиной 0,4 или 1 мкм, а затем напыленная верхняя обкладка конденсатора из Al толщиной 0,1 мкм. Чувствительная поверхность датчика составляет площадь $S = 19 \text{ см}^2$, пороговая чувствительность по массе составляла – $3,5 \cdot 10^{-12} \text{ г}$. Сигнал с преобразователя, соответствующий случаю разряда (пробоя) конденсатора, фиксируется схемой измерения. Всего на поверхности станции размещалось 459 датчиков такого типа.

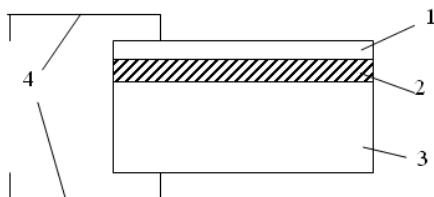


Рисунок 4.23 – Конденсаторный датчик, используемый в экспериментах LDEF:

- 1 – верхняя Al обкладка; 2 – слой диэлектрика SiO_2 ($h=0,4\div 1 \text{ мкм}$);
- 3 – полупроводниковая подложка; 4 – сигнальные электроды.

Широко использовалось и продолжает использоваться экспонирование в космическом пространстве различных материалов и специальных высокочистых полированных пластинок из меди, алюминия, золота, нержавеющей стали, тонких пленок из меди, майлара, нитроцеллюлозы толщиной 0,02-1,66 мкм [1]. Эксперимент с экспонированием различных видов материалов на космической

станции LDEF охватывал десятки материалов и занимал суммарную площадь $S \approx 100 \text{ м}^2$.

Принцип измерения заключался в экспонировании различных высокочистых материалов в космическом пространстве в течение фиксированного времени и после возвращения на Землю обработки полученных кратеров в мишенях с помощью электронных и оптических микроскопов (определение размеров микрочастиц по размерам и форме кратеров) и дальнейшее исследование с помощью масс-спектрометров, методов химической диагностики для определения химического состава по остаточному материалу частиц в кратерах.

4.8 Датчик на основе теплового эффекта при ударе

При высокоскоростном соударении частицы с мишенью происходит выделение тепла. Примером датчиков, основанных на данном принципе, может служить микрокалориметрическая матрица для измерения кинетической энергии малых частиц в космосе [20, 21] (рисунок 4.24).

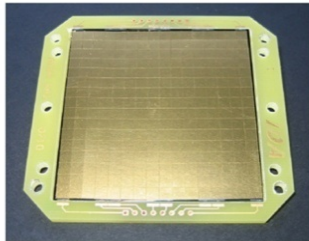


Рисунок 4.24 – Фотография микрокалориметрической матрицы [20]

Принцип работы основан на преобразовании кинетической энергии микрометеороида E_k в тепловую энергию согласно выражению:

$$\Delta T_{meas} = k \cdot \frac{\eta \cdot E_k}{C_a},$$

где ΔT_{meas} – изменение температуры на датчике, η – коэффициент, учитывающий эффективность преобразования кинетической энергии в тепловую, k – коэффициент связи измеренной температуры и истинной (приблизительно равен 1), C_a – теплоемкость детектора.

На рисунках 4.25-4.29 приведены характеристики данного датчика.

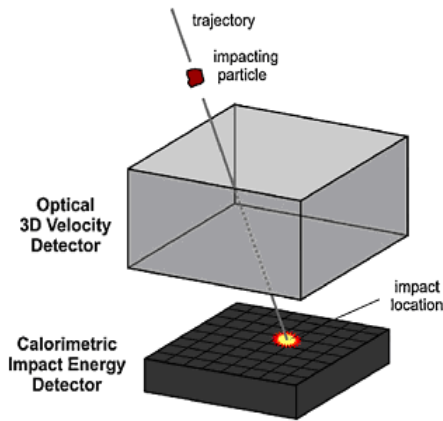


Рисунок 4.25 – Датчик AIDA, построенный на основе калориметрической матрицы

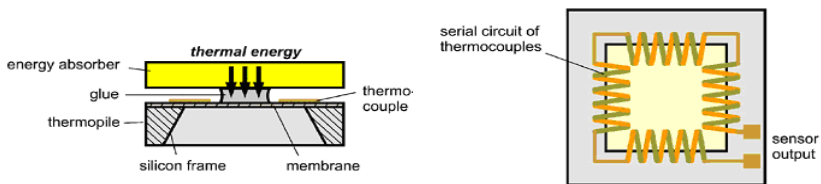


Рисунок 4.26 – Конструкция одного элемента калориметрической матрицы

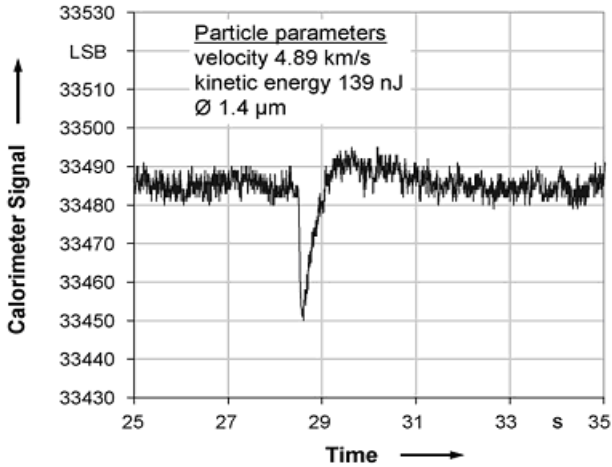


Рисунок 4.27 – Сигнал с калориметрического элемента при ударе частицы

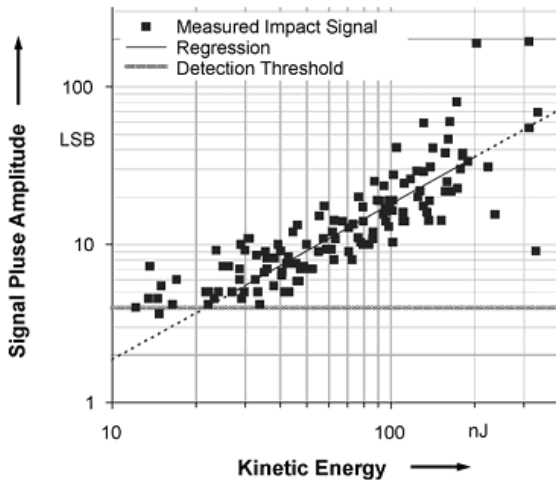


Рисунок 4.28 – Зависимость амплитуды сигнала с калориметрического элемента от кинетической энергии

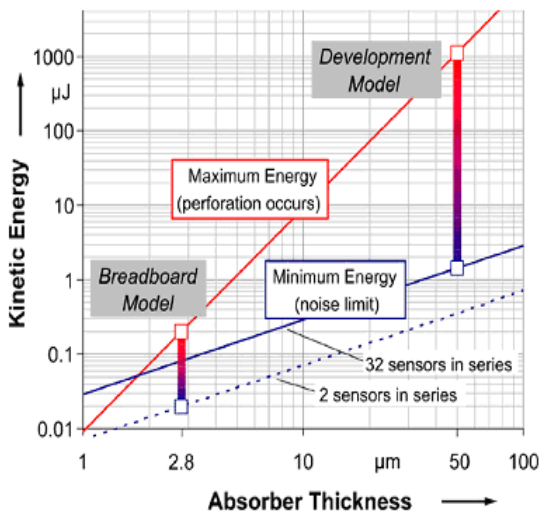


Рисунок 4.29 – Диапазон измерения датчика при различных толщинах пленки золота

4.9 Сферический пленочный датчик

Следующий датчик конструктивно представляет собой развертываемую сферическую конструкцию [22], выполненную из диэлектрической пленки толщиной 10-20 мкм с двусторонним металлическим покрытием. Таких сфер две. Они установлены одна в другую и соединяются между собой растяжками. Наружная сфера состоит из секций, представляющих собой конденсаторы. Внутренняя оболочка представляет собой приемник вторичных заряженных частиц (ионов), образующихся в результате пробоя внешней оболочки. Внешняя металлическая обкладка пленочного приемника ионов 2 (рисунок 4.30) соединена с усилителем 3, импульс тока с которого интегрируется интегратором (измеряется общий суммарный заряд ионов, пропорциональный массе и скорости частицы), одновременно сигнал подается на два сумматора 5 и 6, на другие входы которых поступает с интеграторов 4 и 7 проинтегрированные сигналы.

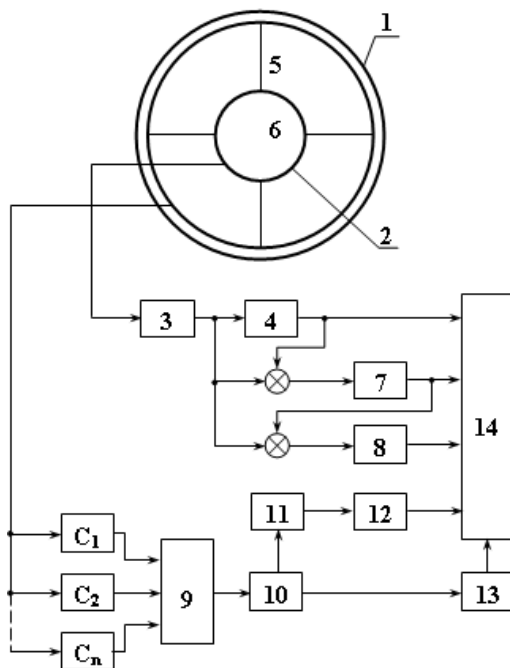


Рисунок 4.30 – Структурная схема преобразователя космических частиц сферического типа [22]

Выход сумматора 6 соединен с интегратором 8. Таким образом, на интеграторах 4, 7, 8 формируются напряжения, функционально связанные с размером, скоростью и плотностью частицы.

Выходные сигналы с пленочных конденсаторных структур внешней сферы детектора C_1 - C_n подаются на коммутатор 9, выход которого подается на усилитель 10. Далее, сигнал о пробое какого-либо из конденсаторов или изменении его электропроводности (в случае, если он замкнут) поступает соответственно на усилитель формирования 11, генератор 12 и амплитудно-временной преобразователь 13. Сигналы с интеграторов, генератора АЦП соединены с блоком обработки 14.

Частица пробивает одну или две структуры МДМ, при этом между двумя МДМ-структурами регистрируется ионный импульс, образованный в результате высокоскоростного соударения.

Таким образом, измеряется время пролета частицы между двумя МДМ – структурами, два параметра ионного импульса (заряд и время нарастания переднего фронта), импульс с конденсаторов, по которым производится обработка и определение скорости, массы, плотности частицы.

4.10 Несколько современных детекторов пылевых частиц

4.10.1 LDEX

LDEX – детектор пылевых частиц, спроектированный для миссии LADEE (контроль лунной атмосферы и окружающей пыли). Космический аппарат будет запущен в мае 2013 года (рисунок 4.31).

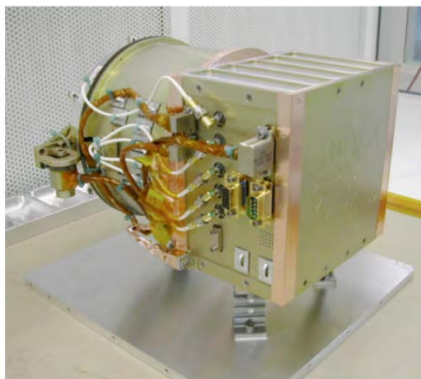


Рисунок 4.31 – Прибор LDEX для миссии LADEE

Планируемое время полета вокруг Луны 100 дней. LDEX способен определять отдельные соударения частиц, радиус которых более 0,25 мкм. Более мелкие частицы могут быть обнаружены, если

они присутствуют в достаточных количествах. LDEX является первым детектором пылевых частиц, оптимизированным для работы в условиях воздействия ультрафиолета над солнечной поверхностью Луны [23].

Прибор откалиброван на двух ускорителях: один в Институте Макса Планка в Гейдельберге и один в Колорадо Центр лунная пыль и атмосферных исследований (CCLDAS), Университет Колорадо. На поверхности Луны, есть два основных механизма, которые могут поднять частиц пыли на большие высоты. Первое связано с постоянной бомбардировкой микрометеоритов лунной поверхности, который генерирует постоянное присутствие облака пыли вокруг Луны. Похожие облака пыли были обнаружены недалеко от Галилея спутника Юпитера. Второй возможный механизм связан с электростатическим зарядом лунной поверхности [23].

4.10.2 DTS

DTS – прибор для измерения вектора скорости частиц космической пыли. Информация о траектории необходима при определении происхождения частиц пыли. Вектор скорости также показывает информацию об истории взаимодействия заряженных частиц пыли и магнитосферы или межпланетной космической среды. Принцип работы основан на измерении индуцированного заряда от пыли на матрице проволочных электродов [23].

Прототип прибора был протестирован с частицами в диапазоне скоростей 2-5 км /с. Численное и экспериментальное исследования показывают, что погрешность измерения прибора составляет около 1% по скорости и 1° по направлению направления.

Прибор DTS может использоваться в сочетании с анализатором химической массы пылевых частиц, чтобы получить полную информацию о происхождении и химическом составе (рисунок 4.32).

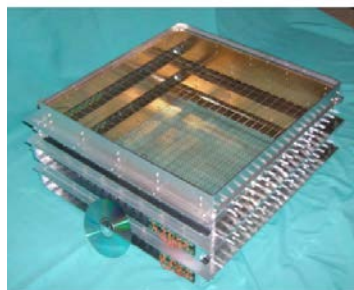


Рисунок 4.32 – Прибор DTS

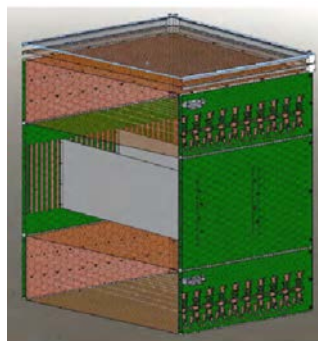


Рисунок 4.33 – Конструкция прибора ELDA

4.10.3 ELDA

ELDA – прибор для обнаружения медленно движущихся частиц пыли вокруг Земли или вблизи поверхности Луны или астероидов. Трудность заключается в том, что эти частицы не обладают достаточной кинетической энергией или импульса для того, чтобы применить стандартные методы. ELDA – прибор, построенный на основе концепции DTS. Так же, как DTS, ELDA состоит из массива проволочные электроды, но в сочетании с областью отклоняющего поля, где траектории частиц модифицируют путем сильного электростатического поля. Величина отклонения зависит от массы частиц. Первый прототип прибора ELDA была построен и испытан [23] (рисунок 4.33). Верхняя и нижняя секции являются областями с массивом проволочных электродов, где измеряется траектория частиц [23].

4.10.4 LAMA

LAMA (Large Area Mass Analyzer) – масс – анализатор для измерения частиц космической пыли (рисунок 3.34). Принцип работы прибора основан на анализе состава ионов, генерируемых при соударении пыли. Несколько опытных приборов LAMA были по-

строены и испытаны в лаборатории с чувствительной площадью от 0,2-0,02 м².

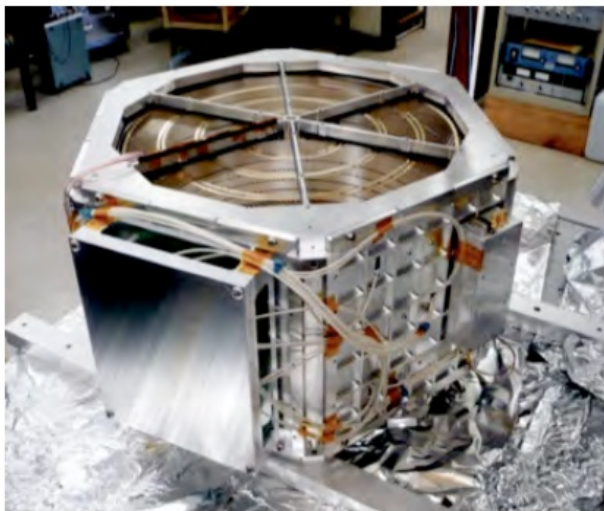


Рисунок 4.34 – Один из разработанных и испытанных приборов LAMA с полезной площадью мишени 0,06 м² [23]

Большие поверхности прибора необходимы для регистрации малых потоков межзвездной пыли. Маленькие размеры подходят для исследования планетарной пыли, где большие потоки пыли. Возможности инструментов LAMA были протестированы на ускорителе частиц [23].

4.10.5 NDA

Новый и высокочувствительный прибор Nanodust Analyzer (NDA) находится в стадии разработки (рисунок 4.35). Он предназначен для подтверждения наличия наноразмерных частиц пыли и измерения их параметров, а также оценки их химического состава.

Прибор является производным от анализатора пыли Кассини, приборов CDA и LDEX.

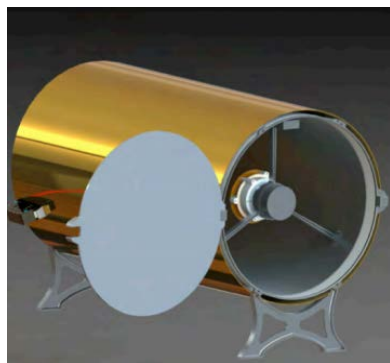


Рисунок 4.35 – Дизайн Nanodust Analyzer (NDA)

Измерения позволит идентифицировать источник пыли путем сравнения их химического состава с составом, измеренным из частиц кометных и астероидного происхождения, или с составом пыли Луны [23].

4.11 Датчик МЕТЕОР, установленный на малом космическом аппарате АИСТ

19 апреля 2013 года с космодрома Байконур стартовала ракета «Союз», которая вывела попутным грузом на КА «Бион – М» №1 на околоземную орбиту малый космический аппарат (МКА) АИСТ, являющийся совместной разработкой Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (национальный исследовательский университет) и ЦСКБ «ПРОГРЕСС» (г. Самара) (рисунок 4.36). Технические характеристики орбиты, на которой функционирует спутник, приведены в таблице 4.2 [24]:

Таблица 4.2 -Технические характеристики орбиты АИСТ

Перигей	569,8 км
Апогей	583,0 км
Наклонение	64,9°
Период обращения	96 мин
Длина главной полуоси	6947 км
Масса	39 кг

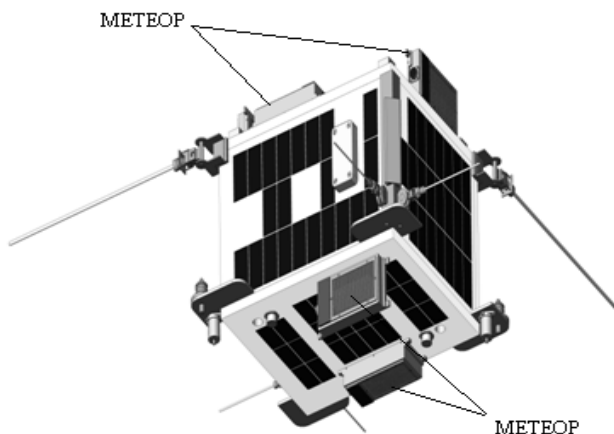


Рисунок 4.36 – Модель АИСТ

На малом космическом аппарате АИСТ была установлена аппаратура МЕТЕОР на его различные грани, состоящая из 6 многопараметрических датчиков (МТ) (рисунки 4.37, 4.38), предназначенных для решения следующих задач: измерение параметров высокоскоростных пылевых частиц естественного и искусственного происхождения; измерение уровня электризации элементов поверхности МКА; расчета углового положения Солнца относительно поверхности МКА по данным измерений солнечных датчиков.

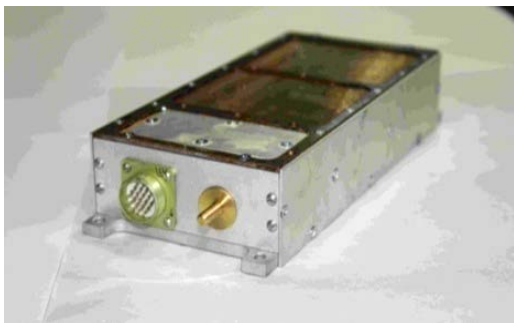


Рисунок 4.37 – Многопараметрический датчик МТ

Каждый из многопараметрических датчиков МТ аппаратуры МЕТЕОР содержит датчик температур, датчик высокоскоростных пылевых частиц, солнечный датчик и датчик электризации (рисунок 4.38).

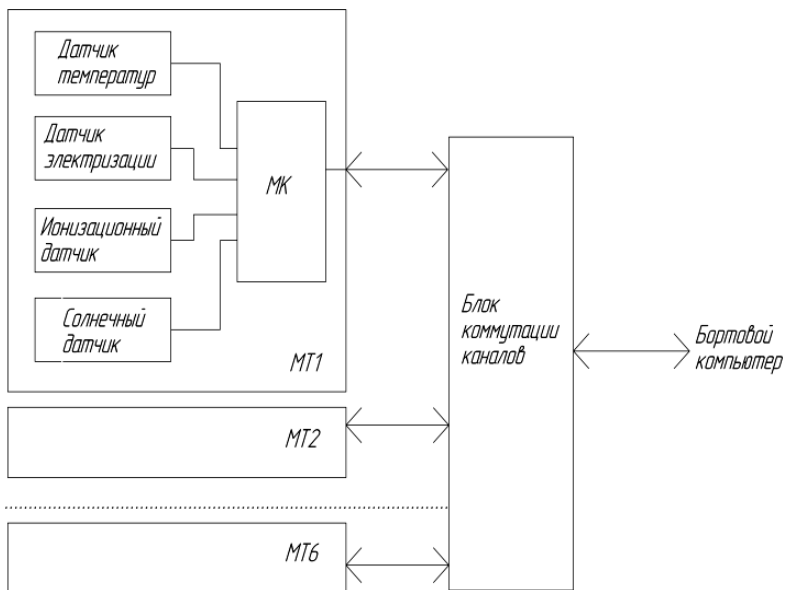


Рисунок 4.38 – Структурная схема аппаратуры МЕТЕОР

Датчик высокоскоростных пылевых частиц (микрометеороидов) использует эффект ионизации вещества частицы и мишени [25], площадь мишени составляет $\sim 84 \text{ см}^2$. Принцип работы такого типа датчиков поясняется на рисунке 4.39.

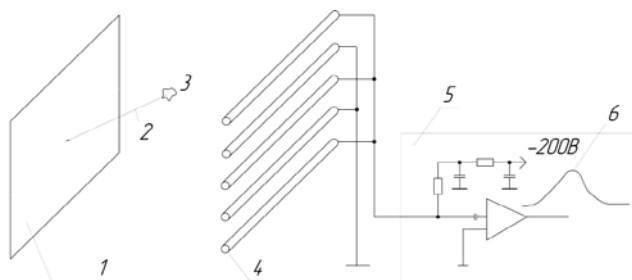


Рисунок 4.39 – Блок-схема ионизационного датчика:

1 – мишень, 2 – траектория движения высокоскоростной микрочастицы, 3 – высокоскоростная микрочастица, 4 – измерительные электроды (двухфазная штыревая решетка), 5 – схема входной части приема сигнала с измерительных электродов, 6 – форма импульса

Пылевая частица 3 с высокой скоростью ударяется в мишень 1, при этом происходит образование положительно заряженных ионов и электронов в зоне контакта микрочастицы и мишени [25]. Мишень подключена к нулевому потенциалу, а на измерительные электроды через фильтр подается напряжение -200 В . В результате влияния электрического поля положительно заряженные ионы летят в сторону измерительных электродов 4, с которых сигнал снимается с помощью зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ).

ЗЧУ имеет перестраиваемый коэффициент усиления (100 или 1000), переключение коэффициента усиления осуществляется микроконтроллером (МК) ATmega 325 (рисунок 4.40). При приходе сигнала на ЗЧУ происходит срабатывание компаратора, запускающего схему разрешения записи, что приводит к записи полученной информации в память FIFO (SN74V263).

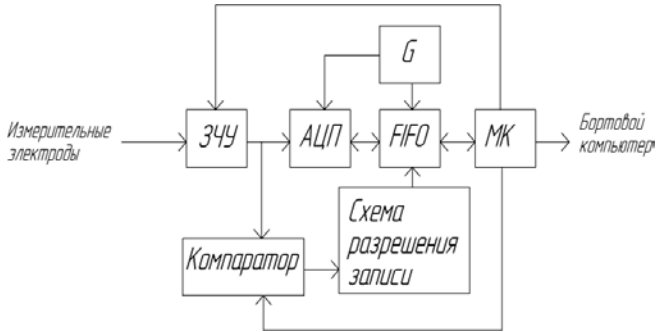


Рисунок 4.40 – Структурная схема датчика микрометеороидов и частиц космического мусора

В схеме использован АЦП параллельного типа с частотой тактирования от тактового генератора 8 МГц (G). При выходе МКА АИСТ на солнечную сторону повышается уровень входных шумов и с целью устранения ложного срабатывания компаратора производится перестройка коэффициента усиления ЗЧУ и порога срабатывания компаратора. При этом одновременно анализируется направление датчиков на Солнце (с помощью солнечного датчика) для того, чтобы оценить направление ударов высокоскоростных частиц.

Полученная информация передается с МК в бортовой компьютер, который непосредственно управляет сбором данных с аппаратуры МЕТЕОР и передачей телеметрии на Землю.

На рисунке 4.41 показаны способы крепления измерительных электродов и сетки заземления.

В процессе полета МКА АИСТ аппаратура МЕТЕОР из-за нехватки энергии каждый раз включали всего на 6 часов непрерывной работы. В процессе проведения эксперимента аппаратура МЕТЕОР периодически раз в 45 минут находилась на солнечной стороне Земли и в тени. Оценить положение датчика в каждый момент времени можно по данным температурных датчиков (рисунок 4.42), которые выполнены на микросхеме AD7415 с диапазоном рабочих температур $-40...+125^{\circ}\text{C}$ и типичной точностью $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ при $+40^{\circ}\text{C}$.

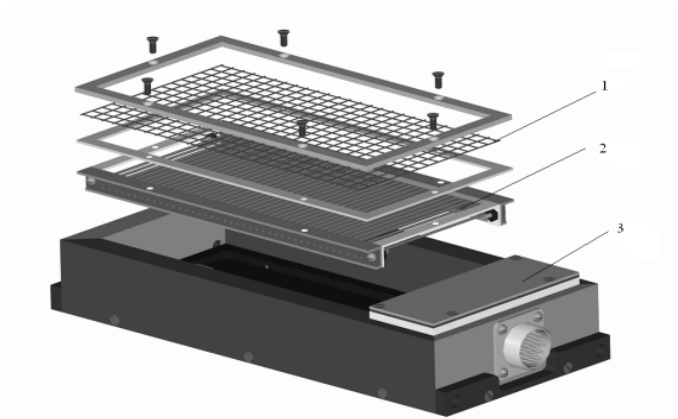


Рисунок 4.41 – Конструкция ионизационного датчика аппаратуры МЕТЕОР:
 1 – Сетка заземления, 2 – измерительные электроды,
 3 – верхняя обкладка датчика электризации

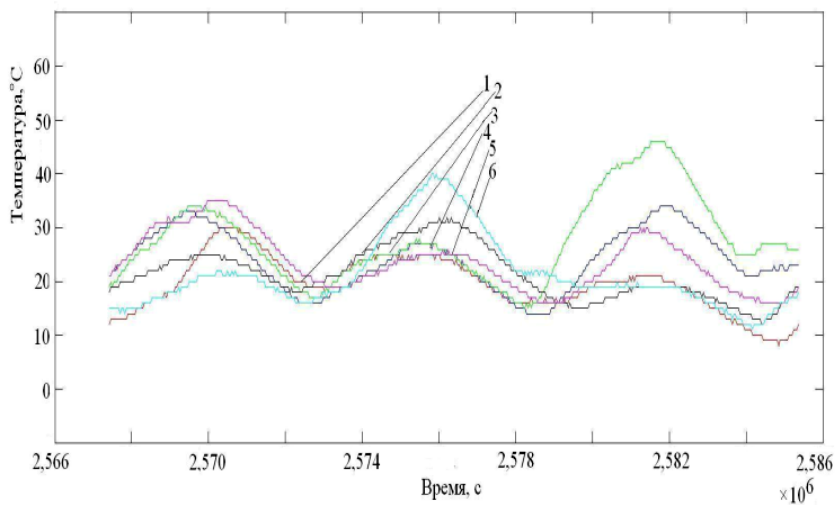


Рисунок 4.42 – Данные с температурного датчика
 в зависимости от времени

Согласно рисунку 4.42 максимальная температура составила 47°C, а минимальная температура 10°C. Функция температуры с датчиков имеет периодический характер («тень-свет») в зависимости от времени полета спутника. Локальные максимумы функций соответствуют освещению МКА АИСТ Солнцем.

Учитывая сложный характер высокоскоростного взаимодействия частицы с преградой, важным требованием является обеспечение выбранного метода регистрации надёжной тарировкой, что само по себе представляет серьёзную проблему. Наиболее часто в качестве устройства для ускорения частиц используется электростатический ускоритель [26]. Метод ускорения является наиболее удобным при проведении исследований процессов высокоскоростного взаимодействия частицы с преградой.

В связи с этим тарировка ионизационных датчиков аппаратуры МЕТЕОР проводилась в электродинамическом ускорителе, описанном в работе [26] (рисунок 4.43).

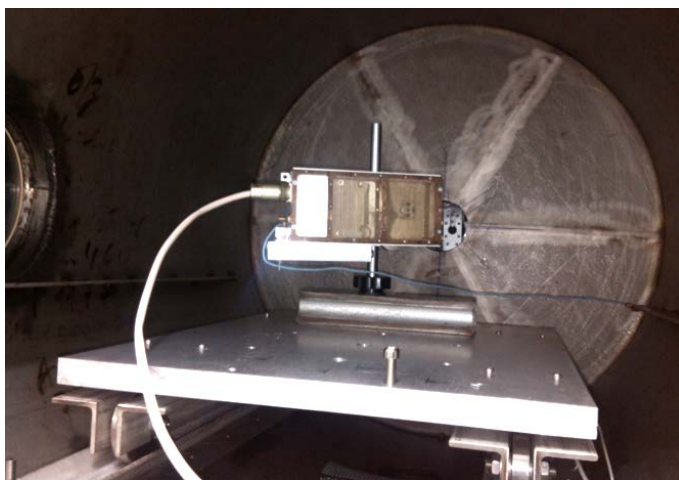


Рисунок 4.43 – Многопараметрический датчик аппаратуры МЕТЕОР в вакуумной камере

Были проведены серии экспериментов с ионизационным датчиком, результаты которых приведены на рисунках 4.44, 4.45.

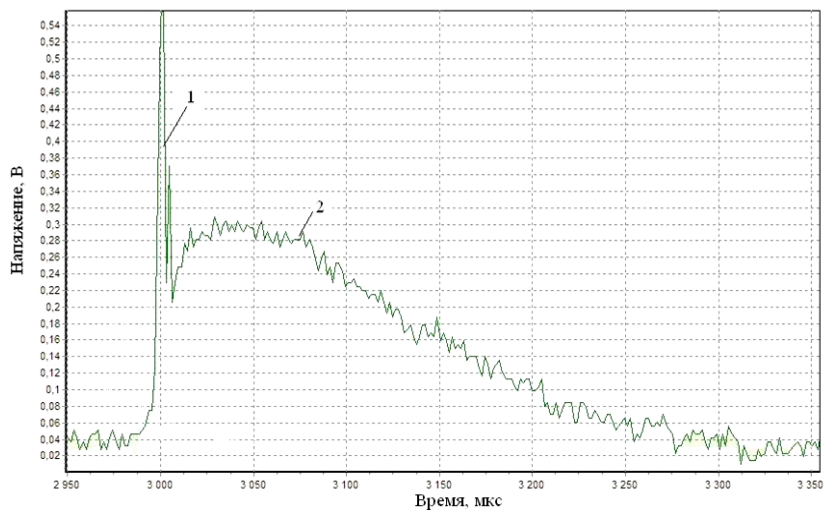


Рисунок 4.44 – Ионный импульс:
1 – зарядовая составляющая, 2 – ионная составляющая

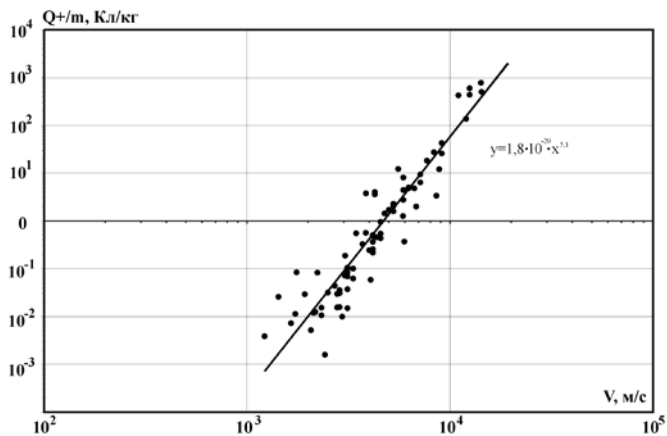


Рисунок 4.45 – Зависимость Q^+/m от скорости частицы

На рисунке 4.44 представлен ионизационный импульс с датчика. Выходной импульс состоит из двух частей: 1 – зарядовая составляющая, образующаяся при пролете высокоскоростной заряженной микрочастицы через измерительные электроды, 2 – ионная составляющая, образующаяся при сборе ионов на измерительных электродах [26].

Данные, полученные с датчика, представлены в цифровой форме. Для каждой частицы существует отдельный файл с записанными амплитудами и коэффициентом усиления. При обработке полученных данных сначала вычисляется скорость частицы согласно формуле:

$$V_0 = \frac{L}{k \cdot \tau_\phi},$$

где τ_ϕ – передний фронт импульса, $k = 0,8$ – коэффициент пропорциональности, $L = 1$ см – расстояние между измерительным электродом и мишенью.

Далее вычисляется масса частицы согласно формуле [26]:

$$m = \sqrt{\frac{\alpha \sum_{i=1}^{N_{\max}} U(T_i) \cdot T_\delta}{c \cdot V_0^\beta \cdot R_{BX} \cdot K_{yc}}},$$

где c , α – const; R_{BX} – сопротивление входного усилителя; K_{yc} – коэффициент усиления; T_δ – время дискретизации отчетов, $U(T_i)$ – выборка в i -й момент времени, T_{\max} – число дискретных отсчетов, характеризующих длительность входного импульса.

Показательной зависимостью для ионизационного датчика в литературе принята зависимость отношения ионного заряда к массе частицы от их скорости. Для описанного выше датчика такая зависимость приведена на рисунке 4.45.

В результате работы аппаратуры МЕТЕОР было зарегистрировано несколько событий, которые с большой долей вероятности можно классифицировать как высокосортные частицы (микрометеороиды).

Датчик электризации служит для оценки возможных потоков заряженных частиц на поверхность МКА и динамики изменения поверхностного заряда.

Датчик электризации представляет собой конденсаторный датчик C (рисунок 4.26), верхняя пластина которого подвергается воздействию внешних заряженных частиц космического пространства. Площадь верхней обкладки датчика электризации составляет $22,75 \text{ см}^2$.

По запросу от МК производится коммутация ключа S (рисунок 4.46), при этом происходит протекание тока от конденсатора C через высокоомные резисторы $R1$ и $R2$, образующих делитель напряжения. Сигнал с резистора $R2$ снимается с помощью согласующего усилителя $У$ и подается на вход АЦП. Время измерения сигнала с выхода усилителя во много раз меньше, чем время разрядки конденсатора C через резисторы $R1$ и $R2$, поэтому можно пренебречь изменением напряжения на конденсаторе вследствие разряда.

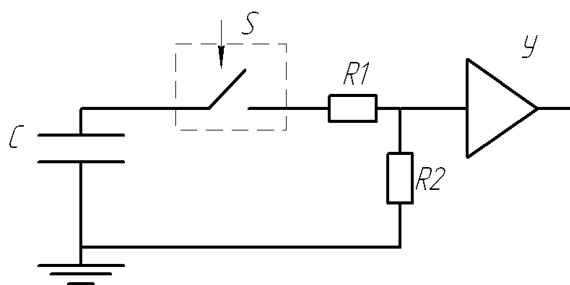


Рисунок 4.46 – Функциональная схема датчика электризации

Солнечный датчик необходим для определения направления аппаратуры МЕТЕОР на Солнце. Испытание солнечных датчиков в лабораторных условиях были проведены на специальном стенде, имитирующем влияние солнечного излучения на датчик.

Солнечный датчик представляет собой усеченную пирамиду с 5 фотодиодами (BPW34), имеющими широкую диаграмму направленности (рисунок 4.47). Световой поток измеряется каждым фотодиодом по отдельности и анализируется уже МК датчика МЕТЕОР.

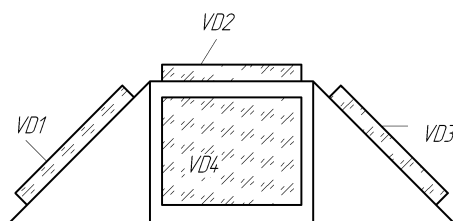


Рисунок 4.47 – Солнечный датчик: VD1, VD2, VD3, VD4, (VD5 находится на заднем плане рисунка) – фотодиоды

На основании данных с фотодиодов высчитываются углы (рисунок 4.48), определяющие положения источника света относительно датчика МЕТЕОР.

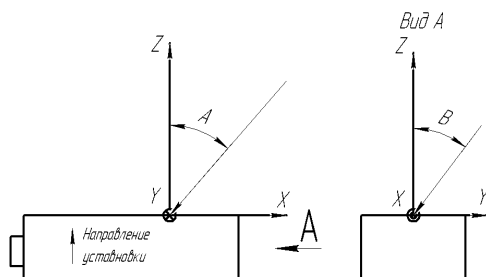


Рисунок 4.48 – Характерные углы, по которым оценивается положение датчика МЕТЕОР на Солнце

Научная аппаратура «МЕТЕОР» испытывалась на электростатическом ускорителе высокоскоростных частиц и в настоящее время – в космических условиях полета МКА «АИСТ», при этом было зафиксировано несколько высокоскоростных частиц (предположительно – микрометеороидов).

Список использованной литературы

1 Семкин, Н.Д., Телегин А.М. Преобразователи информации в электронных устройствах бортовых систем: учебное пособие. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева. Самара. 2012. 307 с.

2 Пыль в атмосфере и околоземном космическом пространстве / Под. ред. Н.Б. Дивари. Материалы научных съездов и конференций, М: «Наука», 1973. 165 с.

3 Метод обработки информации об элементном составе микрометеороидов / Н.Д. Семкин, А.М. Телегин, И.В. Пияков, Р.А. Помельников, Д.В. Родин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2011. Т.14. №2. С. 78-83.

4 Телегин, А.М. Устройство регистрации параметров микрометеороидов и заряженных частиц ионосферы /А.М. Телегин, М.В. Изюмов, К.И. Вергунец, М.П. Калаев // Научные и технологические эксперименты на автоматических космических аппаратах и малых спутниках: труды международной конференции, 2008. Самара: Изд-во СГАУ, 2008. С. 245.

5 Система ориентации космического аппарата пленочной конструкции по магнитному полю Земли / Н.Д. Семкин, К.И. Вергунец, А.М. Телегин, А.В. Овчаров, М.В. Изюмов // VII Международная научно-техническая конференция и «Физика и технические приложения волновых процессов, посвященная 150-летию со дня рождения А.С. Попова»: тезисы международной конференции, 2008. Самара: Изд-во ПГУТИ, 2008. С. 329-330.

6 Макдонелл Ж.А. Обзор замеров пыли, сделанных в отдаленных точках космического пространства // XII конференция КОСПАР, Ленинград, СССР. – 1970 с.

7 Rauser P. Microparticle detector based on the energy gap disappearance of semiconductors (Se,Te,Bi,Ge,Sn,Si, and InSb) at high pressure // JOURNAL of Applied Physics. 1974. Vol. 45. №11. P.48-69.

8 Новиков Л.С. Воздействие твердых частиц естественного и искусственного происхождения на космические аппараты: учебное пособие. М.: Университетская книга, 2009. 104 с.

9 Высокоскоростные ударные явления / Под ред. В.Н. Николаевского. М: Мир, 1973. 533 с.

10 Леонтьев Л.В., Тарасов А.В., Терешкин И.А. Некоторые особенности формы кратеров, образованных высокоскоростными частицами в полубесконечной преграде // Космические исследования. 1971. Т.5. №9. 796 с.

11 Space Dust Impacts Detector Development for the Evaluation of Ejecta Pauline Faure, Shingo Masuyama, Hiroshi Nakamotoa, Yasuhiro Akahoshi, Yukihiro Kitazawa, Takao Koura / Procedia Engineering 58(2013)594-600

12 In orbit debris-detection based on solar panels//CEAS Space J/DOI 10.1007/s12567-013-0039-4. This paper is based on a presentation at the German Aerospace Congress, September 10–12, 2012, Berlin, Germany. W. Bauer, O. Romberg, A. Pissarskoi, Wiedemann, P. Voßrsmann

13 A New Cosmic Dust Detector with a Novel Method Using a Resistive Grid Sensitive to Hypervelocity Impacts/Mark J. Burchell, R. Corsarob, F. Giovane, M. Cole, A. Sadilekd, M. C. Price and J.-C. Lioue Procedia Engineering 58 (2013) 68 – 76. The 12th Hypervelocity Impact Symposium.

14 Development of the Mercury dust monitor (MDM) onboard the BepiColombo mission / K. Nogamia and other // Planetary and Space Science. 2010. №58. P. 108–115.

15 Mercury Dust Monitor for the Bepi Colombo MMO / M. Kobayashi, H. Shibata, K. Nogami, M. Fujii, T. Miyachi, H. Ohashi, S. Sasaki, T. Iwai, M. Hattori, H. Kimura, T. Hirai, S. Takechi, H. Yano, S. Hasegawa, R. Srama and E. Grün // International Workshop of Instrumentation for Planetary Missions, NASA GSFC, Oct 10-12, 2012.

16 Semkin, N.D. Register elemental composition micrometeoroids and debris / N.D. Semkin, A.M. Telegin, K.E. Voronov // 10th International Space Conference on «Protection of Materials and Structures from the Space Environment» (ICPMSE – 10J). Japan, 2011. С. 36.

17 Телегин А.М. Использование матрицы МДМ-структур для анализа элементного состава частиц космического мусора и микрометеороидов // Тезисы докладов второй международной конференции «Научные и технологические эксперименты на автоматических космических аппаратах и малых спутниках». Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2011. С.382-383.

18 Семкин Н.Д., Телегин А.М., Воронов К.Е. Конденсаторный детектор для анализа параметров микрометеороидов на основе органических пленок // Датчики и системы. 2011. №7. С. 18-24.

19 Davison E.H., Winslow P.C. Direct evaluation of meteoroid hazard // Aerospace Engng. 1962. Vol. 21. №2. P. 24-33.

20 M. Kobuscha. Microcalorimeter array for the measurement of kinetic energies of small particles in space / M. Kobuscha and other // Thermochemica Acta. 2009. №492. P. 89–94.

21 Телегин, А.М. Современные детекторы микрометеороидов // IX Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов»: материалы международной конференции, 2010. Челябинск, 2010. С. 169.

22 Семкин Н.Д., Воронов К.Е., Ротов С.В. Детектор микрометеороидных и техногенных частиц // Измерительная техника. 1999. № 8. С. 3-9.

23 Improved dust detectors and analyzers for planetary missions/ Z. Sternovsky, M. Horányi, and other / International Workshop on Instrumentation for Planetary Missions (2012).

24 <http://www.n2yo.com/satellite/?s=39133>

25 Семкин Н.Д., Телегин А.М., Помельников Р.А. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2009. Т.12. №4. С.92-95.

26 Семкин Н.Д., Воронов К.Е., Пияков А.В., Пияков И.В. / Имитация микрометеоритов с помощью электродинамического ускорителя // Приборы и техника эксперимента. 2009. № 4. С. 159-165.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Регистрация космических частиц (микрометеороидов) осуществляется со времени начала освоения космоса. Но, тем не менее, до сих пор не имеется точных данных о распределении техногенных частиц в пространстве, а измеренные потоки микрометеороидов отличаются по величине более, чем на порядок. Основной причиной столь больших расхождений между экспериментальными данными является несовершенство существующих экспериментальных методов, несовершенство методов регистрации и конструкций датчиков, их малая эффективная площадь и, как следствие, низкая достоверность информации.