

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)

На правах рукописи

Телегин Алексей Михайлович

РАЗРАБОТКА МЕТОДИК, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК И  
БОРТОВЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ  
МИКРОМЕТЕОРОИДОВ И ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики

Диссертация на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Научный консультант:  
Казанский Николай Львович,  
доктор физико-математических  
наук, профессор

Самара – 2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
Глава 1. Методы регистрации пылевых микрочастиц (микрометеороидов и частиц космического мусора) .....	18
1.1 Актуальность исследования микрометеороидов и частиц космического мусора .....	18
1.2 Обзор физических эффектов, которые используются для регистрации пылевых микрочастиц .....	32
1.3 Обзор конструкций датчиков .....	48
1.4 Экспериментальное исследование физических эффектов при высокоскоростном соударении .....	62
1.5 Методика регистрации высокоскоростных микрочастиц на основе использования металлических полосков .....	70
1.6 Экспериментальное исследование прототипов датчика микрометеороидов и частиц космического мусора на основе пленочных структур .....	78
1.6.1. Датчик в виде линии передач .....	78
1.6.2 Датчик микрометеороидов и частиц космического мусора на основе пленочной катушки индуктивности .....	84
1.7 Выводы к главе 1 .....	94
Глава 2. Приборы ионизационного типа для регистрации высокоскоростных микрочастиц .....	95
2.1 Общие принципы построения приборов ионизационного типа для регистрации пылевых микрочастиц .....	95
2.1.1 Система электродов ионизационных датчиков микрометеороидов и частиц космического мусора .....	95
2.1.2 Расчёт силы тока в измерительной цепи детектора высокоскоростных микрочастиц .....	101
2.2 Описание конструкции прибора МЕТЕОР, установленного на малый космический аппарата АИСТ, и результаты космического эксперимента с ним .....	108
2.3 Прототип датчика ионизационного типа .....	121
2.4 Наведенный импульс в ионизационном датчике .....	133

2.5	Описание конструкции прибора МЕТЕОР-М ионизационного принципа действия .....	141
2.6	Выводы к главе 2 .....	148
Глава 3. Приборы пролетного типа для регистрации высокоскоростных микрочастиц....		150
3.1	Описание принципов измерения составляющих вектора скорости на основе сеточных конструкций .....	151
3.2	Методика оценки выходного сигнала с измерительной сетки датчика микрометеороидов .....	157
3.3	Методика оценки выходного сигнала для струнного датчика пролета заряженных микрочастиц .....	163
3.4	Методика оценки выходного сигнала с наклонной сетки датчика высокоскоростных микрочастиц .....	165
3.5	Результаты проведенных экспериментов с различными конструкциями датчиков пролета микрочастиц .....	171
3.5.1	Экспериментальный анализ сеточной конструкции для измерения скорости микрочастиц .....	171
3.5.2	Результаты исследование работы детекторов пролета высокоскоростных заряженных микрочастиц.....	179
3.6	Методика оценки параметров заряженных микрочастиц на основе конструкции прибора, использующего измерительные проводящие сетки .....	183
3.7	Выводы к главе 3 .....	191
Глава 4. Приборы, используемые для регистрации пылевых микрочастиц в ускорителях микрочастиц .....		192
4.1	Моделирование движения заряженных микрочастиц в тракте ускорителя.....	201
4.2	Описание метода обработки сигналов с индукционного датчика цилиндрической формы. Численное моделирование работы модификаций конструкций индукционных датчиков .....	208
4.2.1	Описание методики обработки сигналов с индукционного датчика цилиндрической формы .....	208
4.2.2	Моделирование наведённого заряда на измерительных электродах, используемых для регистрации параметров микрочастиц в тракте ускорителя .....	215

4.3 Методика обработки сигнала с индукционного датчика с модифицированной конструкцией электродов.....	222
4.4 Выводы к главе 4 .....	233
Глава 5. Приборы для регистрации удара высокоскоростных микрочастиц, использующие элементы конструкций космических аппаратов.....	235
5.1 Экспериментальная установка в виде макета космического аппарата для контроля места удара высокоскоростных пылевых микрочастиц.....	247
5.2 Методики использования поверхности космического аппарата в качестве датчиков высокоскоростных микрочастиц .....	256
5.2.1 Методика регистрации параметров частиц космического мусора и микрометеороидов с использованием поверхности малого космического аппарата №1 .....	256
5.3.2 Методика регистрации параметров частиц космического мусора и микрометеороидов с использованием поверхности малого космического аппарата №2 .....	259
5.3.3 Методика регистрации параметров частиц космического мусора и микрометеороидов с использованием поверхности малого космического аппарата №3 .....	263
5.3.4 Методика регистрации параметров частиц космического мусора и микрометеороидов с использованием поверхности малого космического аппарата №4 .....	265
5.4 Выводы к главе 5 .....	269
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	271
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	275
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	276
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Методика обработки данных с датчика.....	314
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Акты внедрения .....	317
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Достижения.....	320

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы диссертации.** В настоящее время космические аппараты (КА) и размещаемого на них оборудование проектируются с учетом длительного пребывания их в космическом пространстве. Элементы таких аппаратов в полете подвергаются длительному влиянию факторов космического пространства, в частности, воздействию пылевых микрочастиц (микрометеороидов и частиц космического мусора), что может привести к выходу из строя дорогостоящего оборудования (солнечные батареи, антенны, радиаторы и т. д.). За большинством крупных объектов следят наземными методами, однако мелкие частицы (размером менее 1 см) не поддаются наблюдению из-за малости их размеров. Общая масса искусственных объектов на орбите Земли по состоянию на 2024 год превышает 11,5 тыс. тонн. Отслеживаются и каталогизируются лишь самые крупные из них (около 35 тыс.).

Проблема заключается не только в самом существовании пылевых микрочастиц, но и в недостаточной точности существующих моделей их пространственно-временного распределения. Разработчики КА вынуждены закладывать в расчеты значительные запасы прочности, что удорожает аппараты, либо использовать устаревшие модели, не учитывающие резкий рост техногенного засорения за последние годы. В связи с этим актуальной задачей является уточнение существующих моделей засорения окружающего пространства, что требует разработки новых методов и приборов, обладающих улучшенными целевыми показателями (чувствительностью, точностью определения параметров частиц, работой в реальном времени, информативностью, достоверностью и т.д.).

Разработка и внедрение таких приборов открывает возможности для проведения ряда важных исследований, имеющих как фундаментальное научное, так и прикладное народно-хозяйственное значение:

Для фундаментальной науки: возможность классификации микрометеороидов (природных частиц) и космического техногенного мусора для изучения эволюции пылевых оболочек Земли и оценки естественной метеорной активности.

Для народного хозяйства и коммерческого космоса:

- получение данных в реальном времени даст возможность КА уклоняться от некаталогизируемых «роев» мелких частиц, а не только от крупного мусора. Это напрямую увеличит срок активного существования спутников связи, навигации и дистанционного зондирования Земли.

- новые приборы обеспечат объективную статистику соударений с мелкими частицами, что позволит страховым компаниям корректно рассчитывать тарифы, а операторам аргументированно подтверждать причину выхода спутника из строя.

- мониторинг in-situ (непосредственно на борту КА) позволит оценить реальную эрозию поверхностей (солнечных батарей, радиаторов, оптики) с учетом подтверждения влияние высокоскоростных микрочастиц, тем самым ускоряя разработку новых защитных покрытий и композитных материалов на Земле.

Таким образом, создание методов и приборов регистрации высокоскоростных микрочастиц (микрометеороидов и частиц космического мусора), необходимо для повышения надежности и экономической эффективности будущих космических аппаратов через верификацию и уточнение моделей их окружения.

**Степень разработанности темы исследования.** 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 60-90-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 же 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.

Ежегодно производится десятки ракетносители и спутники, которые запускаются в космос, поэтому проблема разработки аппаратуры для контроля микрометеороидной обстановки должна стоять в одном из первых рядов, как сейчас и происходит за границей, где такая аппаратура запускается в космос достаточно часто, а уж лабораторные испытания проводятся непрерывно. Проектирование такой аппаратуры тесно связано с разработкой лабораторной базы (S.Close (2025), А.В.Пияков (2022), К.И.Сухачев (2023), Л.С.Новиков (2014), А.Б.Надирадзе (2014)) и конструкций датчиков (S.Auer (2013), E.Grun (2013),

Н.Д.Семкин (2016), К.Е.Воронов (2025), И.В.Пияков (2025), М.П.Калаев (2025), Zoltan Sternovsky (2013), Jianfeng Xie (2013)), расчетом распределения метеорного вещества (Б.М.Шустов (2019), В.В.Миронов (2022), М.А.Толкач (2022), А.И.Назаренко (2013), С.С.Вениаминов (2012), А.М.Червонов (2012), М.И.Панасюк (2000), Ю.С.Ушеренко (2022), Л.М.Василяк (2024), Е.В.Шубралова (2024), В.Н.Чикирев (2024), анализом физических эффектов при высокоскоростном соударении (П.В. Бриджмен (1966), Л.В. Альтшулер (1965), Я.Б. Зельдович (1966), Р.Ф. Трунин (2000), Г.И. Канель (2000), В.Е. Фортов (2004), Л.П. Орленко (1975), К.П. Станюкович (1958), С.Д. Гилев (2025) и др.), математическим и экспериментальном моделировании разрушения материалов (Ф.А. Баум (1975), С.И.Герасимов (2019)).

Например, в лаборатории S.Close проводятся исследования физических эффектов при высокоскоростном соударении, однако для каждого эффекта ученые используют отдельный прибор. А в работе Pauline Faure, Shingo Masuyama и др. рассмотрен датчик на основе металлических полосков, которые разрушаются высокоскоростным соударением пылевых микрочастиц, однако данный тип датчиков требует использование большого количества мультиплексоров.

Проведенный анализ существующих работ позволяет выделить следующие важнейшие направления, которым до настоящего времени не уделялось должного внимания:

- повышение информативности регистрации при одновременном снижении требований к массе и энергопотреблению;
- оценка формы наведённого импульса, в которой заложена информация о параметрах микрочастицы (например, траектории полета, вектора скорости и т.д.);
- возможность попутного использования элементов конструкции МКА в качестве датчиков ударов.

Поэтому остаются открытыми проблемы повышения чувствительности и информативности регистрации микрометеороидов и космического мусора, создания регистрирующей аппаратуры для размещения на малых космических аппаратах (МКА), не исследована возможность разработки элементов малого космического аппарата с целью их попутного использования для регистрации ударов высокоскоростных микрочастиц. Во многих приборах для анализа информации о микрочастицах используется информация только с одного типа датчиков при этом игнорируется информация, заложенная в форму наведенного импульса.

### **Научная проблема**

Научная проблема заключается в разработке методов и средств мониторинга микрометеороидов и частиц космического мусора для уточнения моделей их пространственно-временного распределения в околоземном космическом пространстве, обеспечивающих повышение достоверности прогнозирования соударений при проектировании космических аппаратов.

**Объектом исследования** являются микрометеороиды и частицы космического мусора.

**Предметом исследования** служит разработка методов и приборов для регистрации параметров высокоскоростных микрочастиц.

### **Цель диссертационной работы**

Повышение чувствительности, достоверности и информативности регистрации параметров микрометеороидов и частиц космического мусора за счёт разработки новых методов измерений, создания экспериментальных установок и бортовых приборов, адаптированных для малых космических аппаратов, с проведением теоретических и экспериментальных исследований предлагаемых решений.

### **Задачи исследования**

1. Разработка приборов и методов для регистрации параметров заряженных пылевых микрочастиц (микрометеороидов и частиц космического мусора) в лабораторных условиях с имитацией условий космоса.

2. Разработка приборов и методов для регистрации параметров заряженных пылевых микрочастиц в космических условиях, в том числе, в случае размещения на борту малого космического аппарата.

3. Проведение экспериментальных исследований на ускорителе высокоскоростных микрочастиц по испытанию приборов, регистрирующих параметры заряженных пылевых микрочастиц.

4. Разработка и исследование эффективности конструктивных изменений элементов малого космического аппарата с целью их попутного использования для регистрации ударов высокоскоростных микрочастиц.

### **Научная новизна**

1. Предложена методика регистрации и созданы две экспериментальные установки для регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора, в которых вместо громоздких схем мультиплексирования, применяемых в аналогичного типа пленочных датчиках, используется частотный анализ отклика пленочных микрополосковых структур. Принцип работы методики основан на учете зависимости

резонансной частоты коэффициента передачи поврежденной линии от места разрыва полоска, использование предложенной методики позволяет уменьшить массогабаритные характеристики датчиков высокоскоростных микрочастиц и упрощает их электронную часть за счет работы в частотном диапазоне от 4 до 30 МГц.

2. Разработан и изготовлен прибор ионизационного типа с нитяными электродами для регистрации высокоскоростных микрочастиц, отличающийся от обычного ионизационного датчика тем, что дополнительно содержит датчики температуры, электризации и контроля засветки Солнцем. С помощью разработанного прибора были выполнены эксперименты на орбите Земли и получены экспериментальные данные на малом космическом аппарате «АИСТ-1Т».

3. Разработана конструкция прибора для регистрации высокоскоростных частиц, состоящая из мишени, плоскопараллельных электродов и блока электроники, позволяющая с помощью ионизационного и наведенного импульсов производить измерения параметров микрочастиц (массы и скорости). Конструкция отличается тем, что каждый из модулей электроники расположен в отдельном экранированном корпусе, а эффективность работы прибора определяется предложенной на основе использования теоремы Рамо-Шокли методикой расчета форм импульса напряжения, наведенного в измерительных электродах этого прибора и вызванного пролетом высокоскоростных заряженных микрочастиц вблизи этих электродов. Методика позволяет описать полученные экспериментальные осциллограммы для разработанного датчика микрометеороидов с пластинчатыми электродами. Были представлены многообразия форм импульсов напряжения, полученных экспериментально на ускорителе микрочастиц с приемника ионов (плоскопараллельных электродов) при различных местах соударения высокоскоростных микрочастиц с элементами конструкции детектора (мишенью, электродами). Зависимости длительности пролетного импульса от скорости частицы  $T = 12500 / V$ , график отношения заряда собранных ионов к массе микрочастицы ( $Q/m$ ) в зависимости от скорости частицы в диапазоне до 2,5 км/с может быть аппроксимирован зависимостью  $Q / m = C \cdot V^{4.3}$ , где  $C$  – константа для конкретного датчика, получаемая на основе тарировки. На основе проведенного исследования были объяснены результаты экспериментальных данных регистрации “двугорбого” наведенного импульса.

4. Разработана и экспериментально апробирована конструкция ионизационного прибора для регистрации высокоскоростных микрочастиц, обладающая принципиально новыми техническими и функциональными характеристиками. Ключевыми элементами новизны являются: введение оптического канала синхронизации для подавления

электромагнитных помех; реализация двухканального режима измерения для расширения динамического диапазона измерений; использование комбинированной системы, состоящей из чередования нитяных и пластинчатых электродов, позволившей снизить входную ёмкость при сохранении высокой эффективности сбора ионов. С помощью предложенного прибора были получены и проанализированы экспериментальные зависимости степени ионизации от скорости и материала мишени в диапазоне 1–10 км/с.

5. Предложена методика комплексной регистрации параметров заряженных микрочастиц на основе разработанного модульного сеточного прибора для одновременного измерения вектора скорости, заряда и массы микрочастицы, ключевым преимуществом которого является установленная и параметризованная зависимость предельной точности измерений от формы и размеров прибора, отличающаяся тем, что прибор позволяет одновременно оценивать массу, заряд и скорость высокоскоростной заряженной микрочастицы до 10 км/с. Для проверки работоспособности методики измерения вектора скорости микрочастицы был изготовлен и экспериментально проверен в ускорителе микрочастиц макет многосеточного датчика, для обработки результатов с которого была разработана и апробирована математическая модель расчета вектора скорости микрочастицы на основе полученных с датчика экспериментальных данных. Также предложена аналитическая формула, описывающая форму наведенного импульса на двух непараллельных сеточных измерительных электродах, что является новым шагом в интерпретации данных с сеточных индукционных датчиков.

6. Предложена методика математической обработки экспериментальных данных, получаемых от прибора оригинальной конструкции, предназначенного для измерения в электромагнитном ускорителе отклонения микрочастицы от заданной траектории, с модифицированной системой регистрации в виде трех электродов, расположенных на окружности, сосной оси ускорителя микрочастиц. Суть методики заключается в расчёте весовых коэффициентов для данных с каждого электрода при единичном потенциале на одном и нулевом потенциале на остальных, что позволяет по трём измеренным напряжениям с электродов восстановить положение микрочастицы.

7. Предложена оригинальная конструкция экспериментальной установки в виде малого космического аппарата, предназначенного для регистрации высокоскоростных частиц, чьей отличительной чертой является реализация концепции спутник-датчик с большой площадью детектирования высокоскоростных микрочастиц и активного магнитного управления ориентацией. Новизна заключается в синтезе зонтичной пленочной структуры металл-диэлектрик-металл большой площади с трехосной магнитной системой ориентации, что впервые позволяет обеспечить эффективную регистрацию параметров

высокоскоростных частиц в широком телесном угле  $2\pi$  стерадиан, что, примерно, в 1,5 раза больше, чем для разработанных ранее ионизационных датчиков.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Установлены зависимости выходных сигналов регистрирующей аппаратуры от параметров микрометеороидов и частиц космического мусора при их соударении с чувствительными элементами разработанных приборов, что позволяет повысить достоверность интерпретации получаемых данных. Были разработаны и изготовлены экспериментальные образцы приборов для регистрации параметров микрометеороидов и космического мусора, отличающиеся повышенной чувствительностью и помехозащищенностью. Один из разработанных приборов, установленный на малом космическом аппарате «АИСТ-1Т», успешно прошел испытания и обеспечил получение данных космического эксперимента.

Полученные результаты исследования позволяют конструировать приборы для исследования окружающего космического пространства, а также прогнозировать результаты столкновения высокоскоростных микрочастиц с поверхностью космического аппарата и разработать меры защиты элементов конструкции космических аппаратов и научных приборов, размещенных на них. Полученные результаты также позволят усовершенствовать работу лабораторного наземного оборудования для имитации факторов космического пространства (ускорители микрочастиц).

**Область применения:** проектирование приборов для физических экспериментов в космосе.

### **Методы исследования.**

**Теоретические методы:** моделирование на основе аппарата теории электрических цепей и уравнений электростатической индукции.

**Экспериментальные методы:** физическое моделирование в лабораторных условиях с применением ускорителя высокоскоростных микрочастиц и проведение прямых измерений в рамках космического эксперимента на околоземной орбите.

### **На защиту выносятся:**

1. Методика регистрации параметров высокоскоростных микрочастиц с использованием пленочных металлических проводников на основе использования частотного анализа, позволяющая определять места разрыва микрополоска без использования большого количества мультиплексоров, что значительно сокращает массу и габариты датчиков. Обоснование работоспособности разработанной методики на основе серии лабораторных экспериментов с разработанными и изготовленными двумя типами

первичных преобразователей на основе «змейки» и на основе спиральной катушки индуктивности размерами 100 на 100 мм.

2. Бортовая научная аппаратура «МЕТЕОР», предназначенная для сбора в околоземном пространстве на малом космическом аппарате «АИСТ-1Т» данных о микрометеороидах и частицах космического мусора с контролем направления их прихода, основанная на 6 многопараметрических приборах для измерения электризации и направления на Солнце, на датчиках высокоскоростных микрочастиц ионизационного типа с электродами в виде нитей и на адаптивной методике обработки сигналов с датчиков. Результаты экспериментальных исследований на околоземной орбите параметров микрометеороидов и частиц космического мусора, полученные с помощью данной аппаратуры на малом космическом аппарате «АИСТ-1Т».

3. Прибор для регистрации высокоскоростных микрочастиц, состоящий из мишени, плоскопараллельных электродов и блока электроники, позволяющий с помощью ионизационного и наведенного импульса производить оценку параметров микрочастиц (массы и скорости). Многообразие форм импульсов тока, полученных экспериментально на ускорителе микрочастиц с приемника ионов (плоскопараллельных электродов) при различных местах соударениях высокоскоростных микрочастиц с элементами конструкции детектора (мишенью, электродами). Зависимости длительности пролетного импульса от скорости частицы  $T[\text{мкс}] = 12500 / V[\text{м/с}]$ , аппроксимация выражением  $Q^+ / m = C \cdot V^{4,3}$  графика отношения заряда собранных ионов к массе микрочастицы ( $Q/m$ ) в зависимости от скорости частицы в диапазоне до 2,5 км/с.

4. Прибор для регистрации высокоскоростных микрочастиц (микрометеороидов и частиц космического мусора) ионизационного типа с комбинированной системой электродов, позволяющей сохранить большую площадь сбора ионов и при этом снизить входную емкость первичных преобразователей научной аппаратуры на 15-20%. Полученные с помощью прибора на электродинамическом ускорителе с разными мишенями зависимости отношения общего заряда собранных ионов к массе микрочастицы  $Q^+ / m = 6 \cdot 10^{-19} \cdot V^{6,08}$  (для мишени из меди),  $Q^+ / m = 1 \cdot 10^{-20} \cdot V^{6,48}$  (для мишени из нержавеющей стали ЭИ878М),  $Q^+ / m = 6 \cdot 10^{-22} \cdot V^{6,75}$  (для мишени из АМГб).

5. Методика измерения параметров заряженных микрочастиц (массы, вектора скорости и заряда) на основе предложенной конструкции прибора модульного типа, использующего проводящие измерительные сетки. Оценки зависимости точности измерения заданных параметров от геометрических размеров элементов конструкции прибора (погрешности скорости и отношения заряда микрочастицы к ее массе при скорости

до 10 км/с составляют не более 5% при расстоянии между сетками не более 7,5 см и абсолютной погрешности измерения временного интервала  $10^{-7}$ с).

6. Обоснованная и реализованная методика обработки сигналов с трёхканальной электродной системы для вновь разработанного и изготовленного прибора с модифицированными электродами, представляющими собой три электрода, расположенных на окружности сосной оси ускорителя микрочастиц, предназначенного для измерения отклонения положения микрочастицы от заданной траектории в электромагнитном ускорителе, базирующаяся на фундаментальном положении теоремы Шокли–Рамо о наведённых зарядах. Аналитическая модель, связывающая измеряемые на электродах напряжения с геометрией расположения этих электродов и мгновенным положением микрочастицы, обеспечивающая оценку её смещения относительно оси ускорителя микрочастиц.

7. Разработанная оригинальная конструкция экспериментальной установки в виде малого космического аппарата для измерения параметров высокоскоростных частиц в космосе (космического мусора и микрометеоритов) с большой площадью чувствительной поверхности порядка  $1 \text{ м}^2$ , состоящая из пленочной структуры металл-диэлектрик-металл, электромагнитов, расположенных по трем взаимно ортогональным осям, приемника ионов, солнечной батареи, на каждой оси расположен один электромагнит, соединенный с блоком управления электромагнитами, который соединен с блоком управления системой, а также введены блок регистрации, который соединен с пленочной структурой металл-диэлектрик-металл зонтичной конструкции и блоком управления системой, блок формирования питания, соединенный с солнечной батареей и блоком управления системой, добавлен приемо-передающий модуль, соединенный с командной антенной, телеметрической антенной и блоком управления системой, введен блок развертки пленочного датчика, который соединен с блоком управления системой, к которой подключены шесть солнечных датчиков, расположенных на каждой из граней малого космического аппарата.

### **Достоверность результатов**

Достоверность представленных результатов подтверждается воспроизводимостью экспериментальных и расчетных данных, полученных на сертифицированных приборах, а также их соответствием результатам других работ в данной области исследования. Основные результаты работы опубликованы в российских и международных рецензируемых научных журналах.

**Результаты исследований были использованы при выполнении следующих НИОКР:** «Система контроля поверхности космического аппарата для исследования облаков Кордылевского», заказчик Самарский университет, 2020; «Исследование, разработка и моделирование магнитноиндукционного ускорителя для имитации воздействия микрометеоритов и техногенных космических частиц», заказчик АНО «КИЦ СО», 2016 г.; «Разработка, изготовление, испытания и поставка трёх комплектов экспериментальных образцов научной аппаратуры МЕТЕОР, ДЧ-ОПТИКА, СПЕКТР, разработка и поставка на каждый комплект экспериментальных образцов конструкторской документации, технического описания, руководства по эксплуатации, методики испытаний», заказчик ООО «Пекинская компания космической технологии «Сянюй», 2016-2024 гг.; «Создание высокотехнологичного производства маломассогабаритных космических платформ, информационных технологий и программно-аппаратного комплекса приема и обработки гиперспектральных данных (АИСТ-2)», заказчик АО «РКЦ «Прогресс», 2013-2015 гг.; «Разработка экспериментального ускорителя для моделирования воздействия частиц космического мусора на материалы и электрооборудование космических аппаратов», заказчик АНО «КИЦ СО», 2015 г.; «Разработка научно-технических решений для мониторинга космического мусора и микрометеороидов на основе пленочных датчиков, выполненных в виде космического аппарата», Минобрнауки РФ (ФЦП), 2014-2016 гг.; «Разработка физико-химических основ создания и исследования новых материалов на основе плёночных МДМ и МДП структур с помощью мощных ударных волн», РФФИ. 2014 г.; «Исследование процесса ускорения заряженных частиц в тракте ускорителя для моделирования микрометеоритов и техногенных пылевых частиц», Минобрнауки РФ (Госзадание), 2014-2016 гг.; «Разработка физико-химических основ создания и исследования новых материалов на основе плёночных МДМ и МДП структур с помощью мощных ударных волн», РФФИ, 2013 г.; «Разработка пленочных датчиков для исследования физико-химического состава микрометеороидов и частиц космического мусора», Минобрнауки РФ, 2012-2013гг.; Конкурс по назначению денежных выплат молодым учёным и конструкторам, работающим в Самарской области (2016 г., 2017г., 2018 г., 2019 г., 2020 г.).

#### **Апробация диссертационной работы**

Основные результаты работы докладывались на международных и всероссийских конференциях, в том числе: XXI Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», посвященная 80-летию радиотехнического образования за Уралом, 2025; Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций 2014-2026»; Conference of

Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2025 ElCon) (St. Petersburg, Russia, 2025), IAA/AAS SCITECH FORUM 2020 on Space Flight Mechanics and Space Structures and Materials; Международная научно-техническая конференция «Физика и технические приложения волновых процессов»: 2021 (XIX), 2014 (XII), 2012 (XI); Всероссийский семинар по управлению движением и навигации летательных аппаратов. 2020 (XXII), 2015 (XVII), 2014 (XVI), 2013 (XVI); Международная конференция и молодёжная школа «Информационные технологии и нанотехнологии»(ИТНТ) 2020(VI), 2018 (IV), 2017 (III); Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники». Козловские чтения: 2019(VI); 2017 (V), 2015 (IV); 2013 (III); XXI Всероссийская научно-техническая конференция студентов, молодых ученых и специалистов. НИТ-2016; XIII Королёвские чтения: Международная молодёжная научная конференция, 2015; актуальные проблемы космонавтики: XXXIX академические чтения по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства, 2015; НАУЧНЫЕ ТРУДЫ SWORLD, 2015; III международная конференция «Научные и технологические эксперименты на автоматических космических аппаратах и малых спутниках», 2014; 6 European Conference on Space Debris. ESA/ESOC, 2013; 6-ая Международная научно-техническая конференция: Космонавтика. Радиоэлектроника. Геоинформатика. 2013.

**Соответствие паспорту научной специальности.** Диссертация соответствует паспорту научной специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики, в частности пунктам: 2. Разработка новых принципов и методов измерений физических величин, основанных на современных достижениях в различных областях физики и позволяющих существенно увеличить точность, чувствительность и быстродействие измерений; 3. Разработка и создание научной аппаратуры и приборов для экспериментальных исследований в различных областях физики; 4. Разработка и создание экспериментальных установок для проведения экспериментальных исследований в различных областях физики; 6. Разработка и создание средств автоматизации физического эксперимента.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 103 работы, в том числе 41 статья в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 1 глава в коллективной монографии, 8 статей в трудах конференций, индексируемых в информационно-аналитических системах научного цитирования SCOPUS / Web of Science, получено 35 патентов РФ, 18 статей в рецензируемых российских журналах.

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора заключается в проведении анализа литературных и электронных источников, получении аналитических результатов, проведении численного и экспериментального моделирования, участие в изготовлении и экспериментальном исследовании опытных образцов приборов. Результаты работы получены автором лично либо при его непосредственном участии. Постановка задач диссертационного исследования и обсуждение результатов проводились совместно с научным консультантом.

### **Структура работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, списка сокращений и условных обозначений, трех приложений. Текст изложен на 325 страницах машинописного текста, содержит 217 рисунков, 9 таблиц и список литературы из 437 наименований.

### **Краткое содержание диссертации**

Во **Введении** обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, приведён обзор существующих работ, сформулированы цель и задачи исследования, изложены основные результаты работы и их научная новизна, приведены положения, выносимые на защиту, описана структура диссертации.

**В первой главе** рассмотрены методы регистрации пылевых микрочастиц (микрометеороидов и частиц космического мусора). Приведен научный обзор по зарубежным и отечественным источникам. Описаны причины исследования микрометеороидов и частиц космического мусора, вреда, который они наносят элементам конструкции космических аппаратов и электроники. Подробно приведен обзор физических эффектов, которые используются для регистрации пылевых микрочастиц и конструкций датчиков. Описаны методы измерения параметров микрометеороида на основе анализа световой вспышки и с использованием планарных металлических полосок.

**Вторая глава** посвящена приборам ионизационного типа для регистрации высокоскоростных микрочастиц. В главе рассмотрены общие принципы построения приборов ионизационного типа для регистрации пылевых микрочастиц, представлены конструкции разработанных приборов и результаты экспериментальных исследований.

**Третья глава** посвящена приборам пролетного типа для регистрации высокоскоростных микрочастиц, представлены результаты экспериментальных исследований.

**Четвертая глава** посвящена приборам, используемым для регистрации пылевых микрочастиц в ускорителях микрочастиц.

В главе приведено описание методики обработки сигналов с индукционного датчика цилиндрической формы, численное моделирование работы модификаций конструкций индукционных датчиков, методика обработки сигнала с индукционного датчика с модифицированной конструкцией электродов.

**Пятая глава** посвящена приборам для регистрации удара высокоскоростных микрочастиц, использующие элементы конструкций космических аппаратов. В главе описана экспериментальная установка в виде макета космического аппарат для регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора.

**В заключении** приведены основные результаты, полученные в работе.

**В приложениях** приведены дополнительные сведения, конкретизирующие методику обработки данных, а также акты внедрения и полученные достижения в области приборостроения.

## **Глава 1. Методы регистрации пылевых микрочастиц (микрометеороидов и частиц космического мусора)**

### **1.1 Актуальность исследования микрометеороидов и частиц космического мусора**

На этапе проектирования космических аппаратов необходимо проведение моделирования влияния факторов космического пространства на несущие конструкции и бортовую радиоэлектронную аппаратуру. Для этого создаются наземные экспериментальные установки, проводятся космические эксперименты и разрабатываются прогностические модели деградации материалов. Помимо ионизирующих излучений (протонные и электронные потоки, ядра галактических космических лучей), критическое воздействие на КА оказывают высокоскоростные пылевые частицы (техногенный космический мусор и микрометеороиды). Как правило, основными воспринимаемыми элементами при таком воздействии выступают открытые фрагменты внешней конструкции космического аппарата: многослойные панели с терморегулирующими покрытиями, тепловые трубы, теплообменники, иллюминаторы и оптические элементы, фотоэлектрические преобразователи солнечных батарей, антенно-фидерные системы и экранно-вакуумная теплоизоляция [1, 2]. Вероятность повреждения этих элементов космическим мусором и микрометеороидами подтверждается статистикой: в таблице 1.1 приведено распределение аномалий на борту КА до 2000 годов [3], где пылевые микрочастицы выделены в отдельную категорию причин.

В последние годы сохраняется тенденция увеличения концентрации высокоскоростных техногенных пылевых частиц на околоземных орбитах. Поэтому с увеличением срока функционирования КА, появлением долгоживущих космических станций проблема регистрации микрометеороидов и все возрастающего количества техногенных частиц, а также защита космического аппарата становятся более актуальными [4, 5\*<sup>1</sup>, 6, 7\*, 8-11]. По некоторым данным, уже сейчас концентрация техногенных пылевых частиц в три раза превышает концентрацию микрометеороидов естественного происхождения. Учитывая все повышающиеся требования к надежности и долговечности космических аппаратов, а также появление множества новых материалов, необходимо дальнейшее развитие исследований процессов взаимодействия высокоскоростных пылевых частиц с материалами элементов конструкции космических аппаратов [12\*, 13\*, 14-21].

---

<sup>1</sup> Здесь и далее звездочками обозначены ссылки на работы соискателя

Пылевые микрочастицы, не вызывающие сквозного пробоя элементов конструкции КА, производят деградацию их поверхности, что приводит со временем к изменению оптических, электрических, механических и других характеристик, влияющих в целом на работоспособность КА. Для моделирования процессов взаимодействия частиц с многослойными элементами конструкций КА в лабораторных условиях используют различного типа ускорители [13\*, 22 -28]. Для исследования взаимодействия мелких частиц с массой 9—15 г применяются электростатические и электродинамические ускорители [28-34]; для частиц с массами 6—10 г электроплазменные и взрывные ускорители [22, 23, 35-39], а для более крупных частиц 10—100 г электромагнитные [40-43] и легкогазовые пушки [44-46].

Таблица 1.1 – Распределение аномалий на борту КА

Диагностируемое событие	Число случаев
ESD-Электрический разряд	162
SEU - Одиночный сбой из -за радиации	85
Разрушение из-за радиации	16
Микрометеороиды/космический мусор	10
Протоны солнечного ветра	9
Изменение магнитного поля	5
Плазменные эффекты	4
Эрозия из-за атомарного кислорода	1
Атмосферное сопротивление	1
Солнечный свет	1
Фоновое инфракрасное излучение	1
Ионосферные мерцания	1
Электроны с большой энергией	1
Другое	2

Исследования высокоскоростного взаимодействия твердых частиц с различными элементами конструкции космического аппарата проводятся с 50-х гг. XX века с помощью ракет, а позднее – с помощью искусственных спутников Земли. В 60–90-х гг. 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 [2, 47\*].

Согласно бюллетеню NASA «The Orbital Debris Quarterly News» от апреля 2011 г., на орбите находится 15 855 крупных объектов искусственного происхождения, из которых 3379 работающих и вышедших из строя спутников и 12 476 ступеней ракет и прочих объектов [48].

Вклад в создание космического мусора по странам: Китай – 40 %; США – 27,5 %; Россия – 25,5 %; остальные страны – 7 %; по другим оценкам (на 2014 г.): Россия – 39,7 %; США – 28,9 %; Китай – 22,8 % [49].

Наиболее опасными считаются мелкие осколки с размерами менее 1 мм, которые не могут отслеживаться с Земли. Такие осколки относятся к классу техногенных пылевых частиц. По результатам многочисленных исследований [49] на высотах от 300 до 1600 км наблюдается наиболее высокая их концентрация, по уровню уже значительно превосходящая плотность потока частиц естественного метеоритного фона. Классификация частиц искусственного происхождения более подробно приведена в книге [2].

Помимо частиц искусственного происхождения имеются и частицы естественного происхождения. Это так называемые метеороиды. В общем случае частицы искусственного и естественного происхождения носят название «пылевые частицы» [2, 50].

Классификация метеороидов.

1. Межпланетные метеороиды и Зодиакальные Пылевые Облака.

Зодиакальные пылевые частицы рождаются при столкновениях потока от больших межпланетных метеороидов или непосредственно инжектируются с комет (Grün et al., 1985). Метеороиды в космическом пространстве образуются двумя основными путями: в результате фрагментации астероидов при их соударениях и вследствие дегазации (сублимации) кометного ядра. (Ishimoto 2000, Dikarev et al., 2005). Частицы десяти микронного размера и меньше транспортируются Pointing-Robertson эффектом по направлению к солнцу, где они испаряются [51].

2. Потоки нанопыли.

Пылевые эксперименты на солнечных орбитах на космических аппаратах Pioneer 8 и 9 записали потоки пылевых частиц субмикронного размера ( $\sim 2 \cdot 10 \text{ м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ), прибывающих со стороны солнца (Berg and Grün, 1973; McDonnell et al. 1975). Был сделан вывод, что эти частицы движутся по гиперболическим орбитам, которые покидают солнечную систему. Zook и Berg (1975) назвали эти частицы бета – метеороидами и пришли к заключению, что они были вероятно первоначально сгенерированы как обломки в результате взаимного

столкновения между большими метеороидами и движутся из солнечной системы под давлением солнечной радиации. (Zook, 1975) [51].

### 3. Микрометеороиды.

Много космических аппаратов с пылевыми детекторами показали пыль в радиальном направлении от 0.3 AU (Helios, 80Gru) до 18 AU (Pioneer 10, Humes, 1980) от Солнца. Космический аппарат Ulysses на своей уникальной орбите близко к нормали к эклиптической плоскости [Grün et al., 1992] измерял вертикальную плотность профиля зодиакального пылевого облака [51].

Примеры разрушения поверхности, вызванные ударами высокоскоростных микрочастиц показаны на рисунках 1.1 – 1.6 [52, 53].

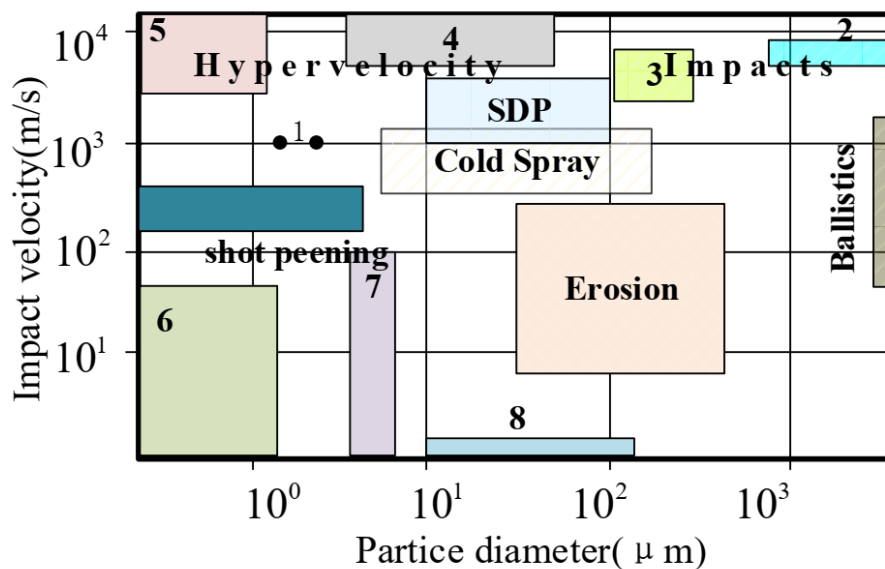


Рисунок 1.1 - Диаграмма, характеризующая эффекты наблюдаемые при ударе [52]

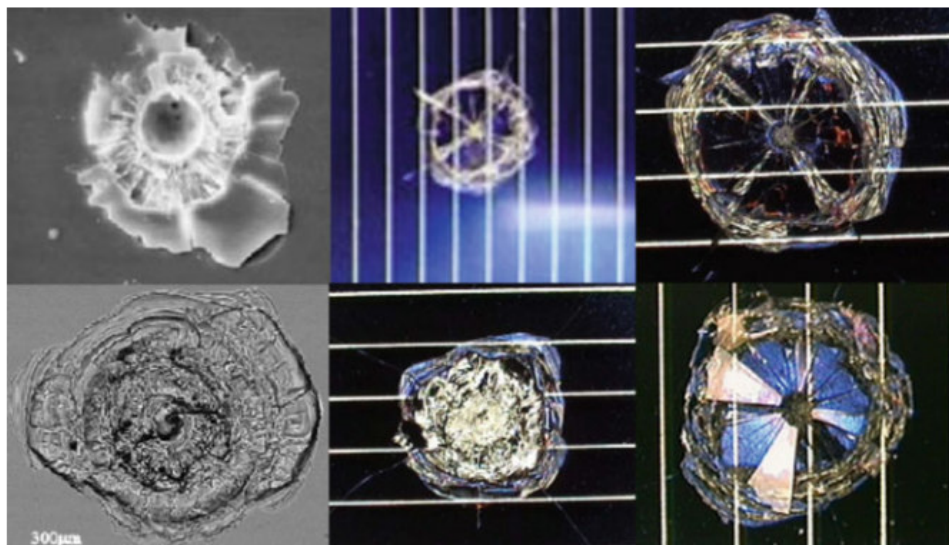


Рисунок 1.2 - Примеры кратеров, образовавшихся на покровных стеклах солнечных батарей [53]

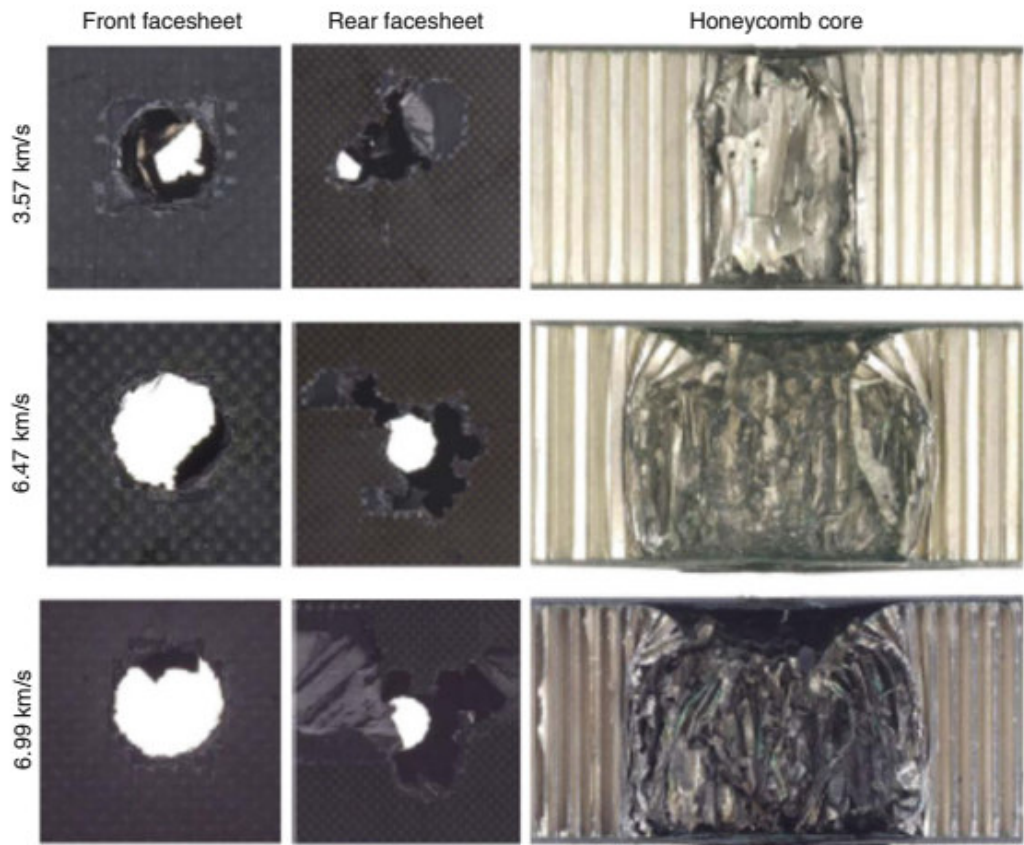


Рисунок 1.3 - Фотография экспериментов по высокоскоростному удару по солнечной панели (из Университета RMIT) [53]

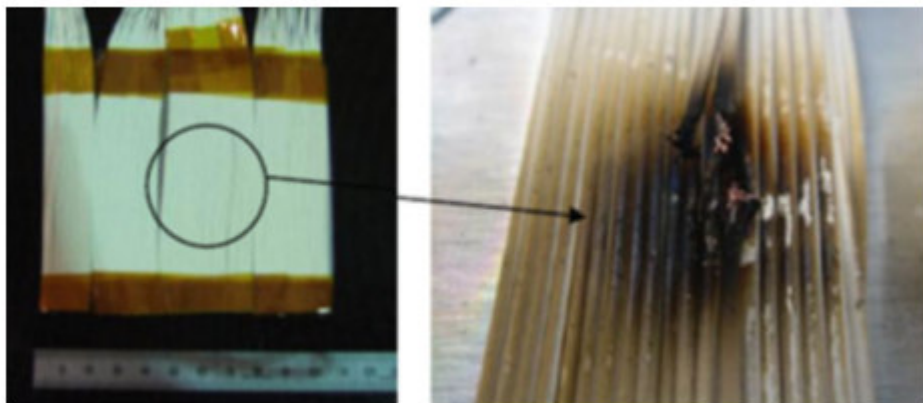
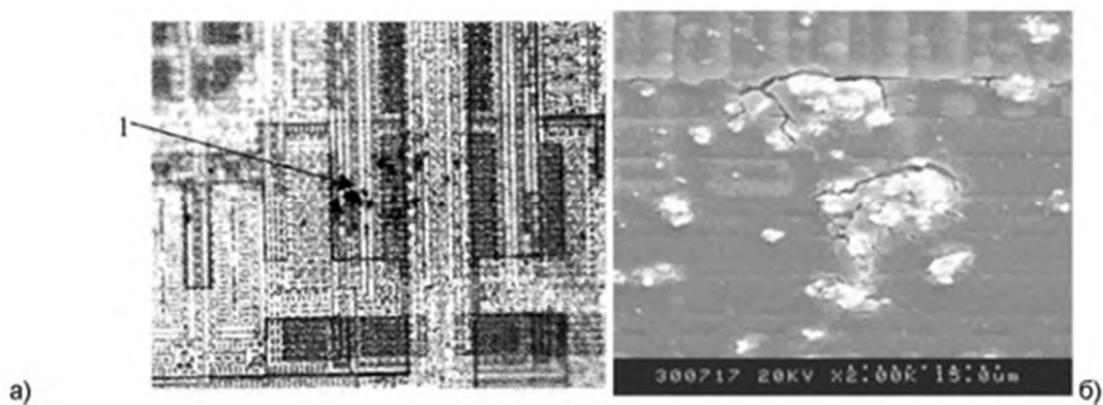
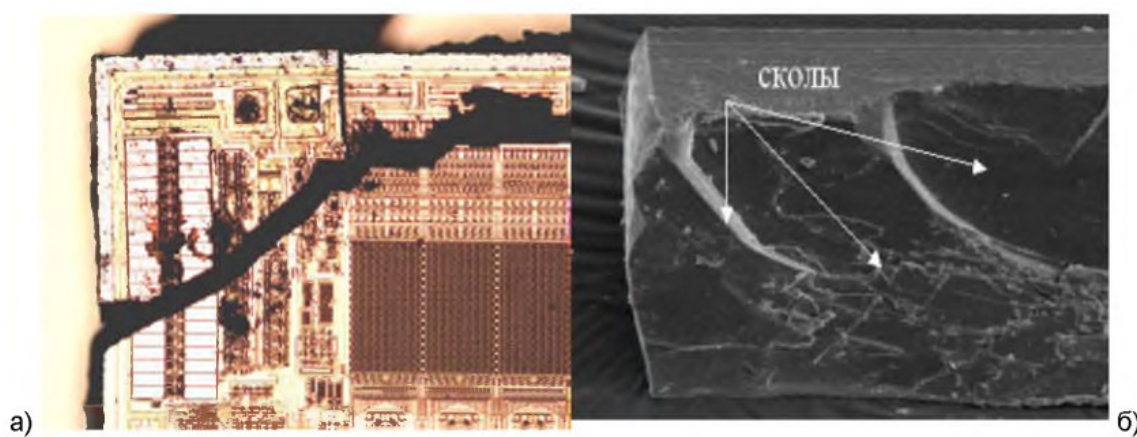


Рисунок 1.4 - Удар снаряда по жгуту кабелей, который вызывает короткое замыкание в кабеле [53]



а) точечные включения1, x50; б) дефекты в области контактов, x2000

Рисунок 1.5 - Структура микросхемы с дефектами [54]



а) разрушение кристалла, x50; б) структура разрушения, x100

Рисунок 1.6 - Структура микросхемы после обработки потоком микрочастиц SiC, ускоренных взрывом [54]

В околоземном космическом пространстве находится огромное количество различных спутников и космических аппаратов (КА). Из-за большого количества КА происходят их столкновения друг с другом и различного рода космическими объектами, при этом образуется большое количество обломков, засоряющих орбиты [55\*, 56\*]. С Земли отслеживаются объекты диаметром более нескольких сантиметров [57]. При этом наносят вред КА и более мелкие частицы [58], информация о распределении плотности, размерах, массе и скорости таких частиц позволит разрабатывать более эффективные методы защиты КА от них и выбирать менее засоренные орбиты.

Как отмечается в работе [59] датчики позволяют изучать плотность потока очень малых частиц массой  $10^{-5} \dots 10^{-15}$  г. В нашей стране и в мире накоплен большой опыт по регистрации таких частиц (например, Сёмкин и др., 2009), разрабатываются новые, всё более точные методы, основанные на изучении физики высокоскоростного удара. время, в основном, используются оптико-электронные средства ГК «Роскосмос», АО «Астрономический научный центр», ПАО «МАК «Вымпел», привлекаемые средства

РАН — Института прикладной математики им. М. В. Келдыша (ИПМ им. М. В. Келдыша РАН), Института солнечно-земной физики СО РАН, Института астрономии. Так, в Институте астрономии РАН занимаются в основном наблюдениями малоразмерных объектов в зоне геосинхронных орбит с помощью довольно крупного телескопа Цейсс-2000. Стандартные средства «Роскосмоса» проводить такие наблюдения не позволяют [59].

Распределение микрометеороидов в отличие от распределения космического мусора можно спрогнозировать, например, с использованием моделей, указанных в ГОСТ 25645.112-84 ВЕЩЕСТВО МЕТЕОРНОЕ, а также различных программ моделирования, например, MASTER 2009 (MASTER 2009 – программа общего пользования, предназначенная для реалистичного описания природной и антропогенной среды Земли и оценки рисков КА посредством прогнозов потоков на заданных пользователем целевых орбитах) [60, 61]. Но как отмечается в работе [62] необходимо постоянное уточнение результатов исследований.

Имеется также российская инженерная модель SDPA (Space Debris Prediction and Analysis), разработанная А.И. Назаренко, позволяющая получать статистические распределения данных об интегральных характеристиках КМ в околоземном космическом пространстве [63]. На основании программы SDPA Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии был разработан ГОСТ Р 25645.167–2022 [64, 65], в котором приведена модель пространственно-временного распределения плотности потоков техногенного вещества в околоземном космическом пространстве. В деле разработки моделей техногенного засорения околоземного космического пространства можно выделить также работы Усовика И.В. [66-68].

В работе [65] авторы разработали реляционную базу данных, позволяющую определить количество столкновений частиц космического мусора и параметры ударного воздействия (размер частиц, скорость столкновения) на космические аппараты, находящиеся на различных орбитах.

Пример моделирования в программе MASTER 2009 приведен на рисунках 1.7, 1.8. Были рассмотрены частицы диаметром от 10 до 100 мкм [55\*]. При моделировании программой учитывались все заложенные источники частиц, такие как фрагменты столкновений КА, частички краски с КА, частички отработанного космического топлива, космическая пыль.

Получены следующие выводы:

– концентрация космических частиц на геостационарной орбите и на орбите полета МКС практически не меняется в течение года;

– для различных наклонений орбиты МКС (международной космической станции), принятой 400 км от уровня Земли, средняя концентрация частиц колебалась в пределах от 660,1 1/м<sup>2</sup>/год до 789,9 1/м<sup>2</sup>/год, при этом максимальное среднее значение концентрации было обнаружено при наклонении 60°, а минимальное при - 30°;

– для орбиты МКС больше всего частиц со скоростями от 7 до 27 км/с, при этом чаще остальных встречаются частицы со скоростью порядка 13 км/с.

Ниже приведены графики отображающие зависимость пространственного распределения плотности частиц от их диаметра и скорости для орбиты, с высотой принятой 400 км от уровня Земли и наклонением 50°.

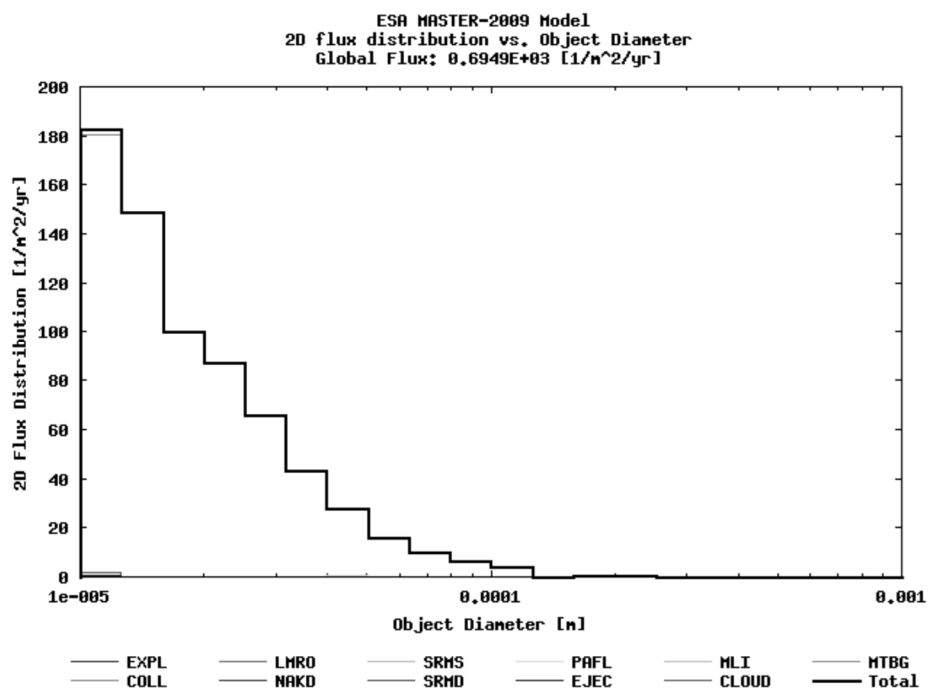


Рисунок 1.7 – Зависимость пространственного распределения плотности частиц от диаметра для орбиты МКС [55\*]

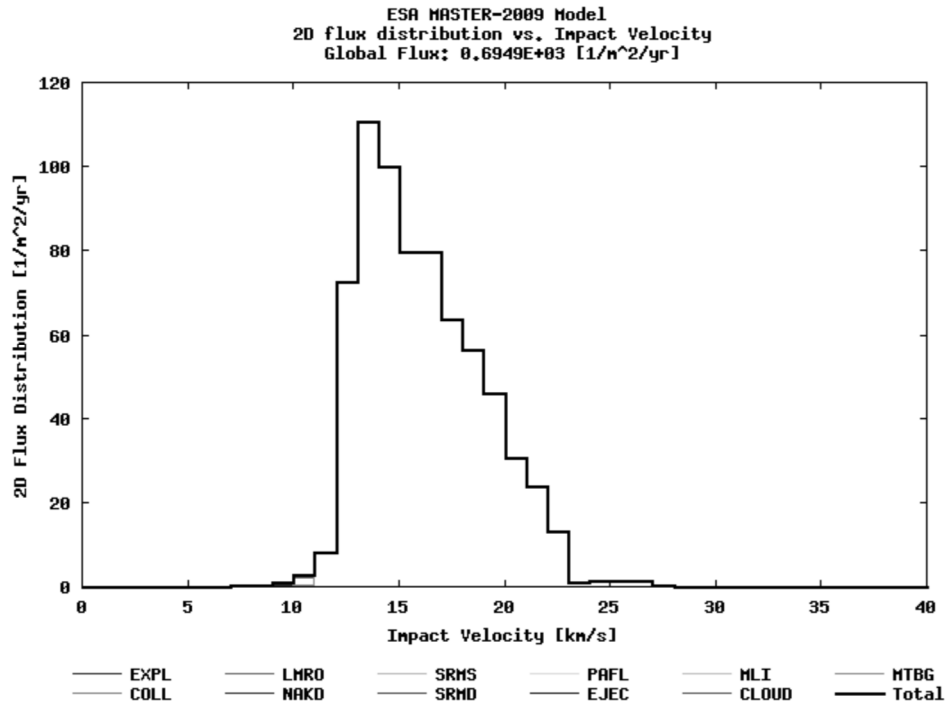


Рисунок 1.8 – Зависимость пространственного распределения плотности частиц от скорости для орбиты МКС [55\*]

Согласно работе [59] под космическим мусором (КМ) обычно подразумевают все неиспользуемые искусственные объекты, в основном в околоземном космическом пространстве (ОКП). Классификация КМ была сведена в таблицу 1.2 [59]. На рисунке же 1.9 [59] показана динамика увеличения космического мусора за прошедшие года.

Таблица 1.2 – Классификация объектов космического мусора [59]

Класс объектов КМ по размеру	I 0,1–1 см	II 1–10 см	III >10 см
Количество объектов на всех высотах	130 млн	900 000	34 000
Количество объектов на низких орбитах	20 млн	500 000	23 000
Последствия столкновения с космическим аппаратом	Серьёзное повреждение КА	Серьёзное повреждение или уничтожение КА	Гарантированное уничтожение КА
Существующие методы защиты	Применение защитных экранов	Манёвр уклонения	Манёвр уклонения

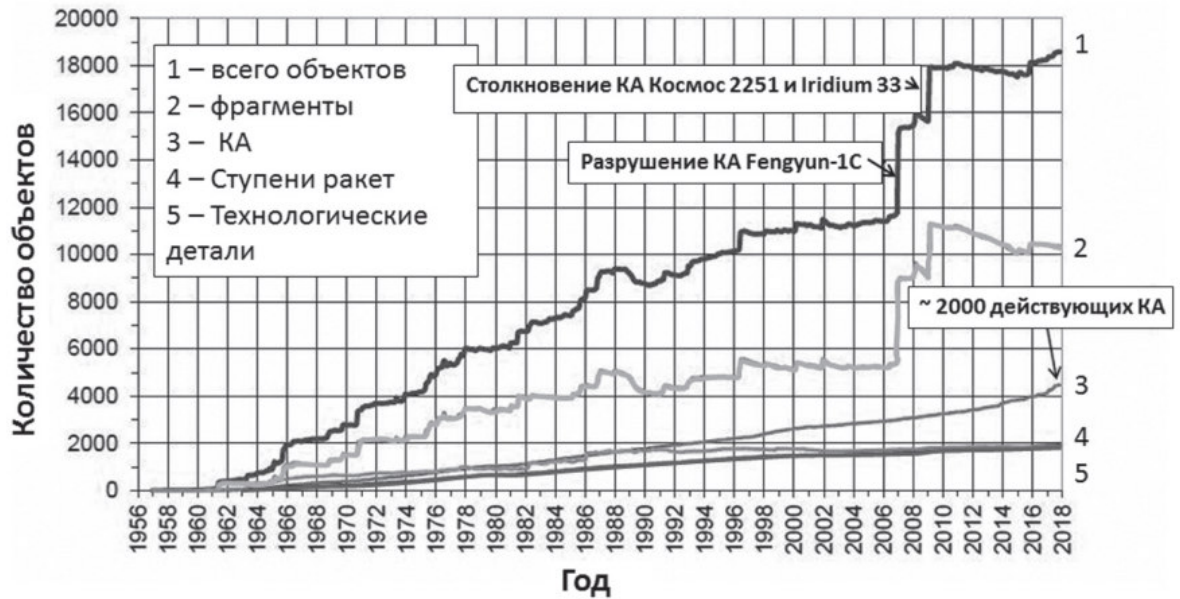


Рисунок 1.9 - Динамика увеличение числа крупных объектов космического мусора [59]

Согласно данным о метеороидах самых мелких размеров, среди них выделяют следующие характерные популяций [69]: внутренние (*Core population*); астероидные (*Asteroidal population*); гало-метеороиды (*Halo population*); метеороиды с большим наклоном орбиты (*Inclined population/i-метеороиды*); эксцентриситетные (*Eccent r icpopulation/e-метеороиды*); межзвёздная пыль (*Inter-Stellar Dust (ISD) population*).

Каждый источник метеороидов имеет популяцию частиц с его собственным распределением орбитальных характеристик, в т. ч., естественно, и скорости метеороидов. Первоначально относительная численность метеороидов от этих источников была оценена Брауном (*Brown*) и Джоунсом (*Jones*) [69]. Несколько позже Тейлор (*Taylor*) разбил распределение направлений исхода спорадических метеоров несколько иначе (рисунки 1.10, 1.11[69]).

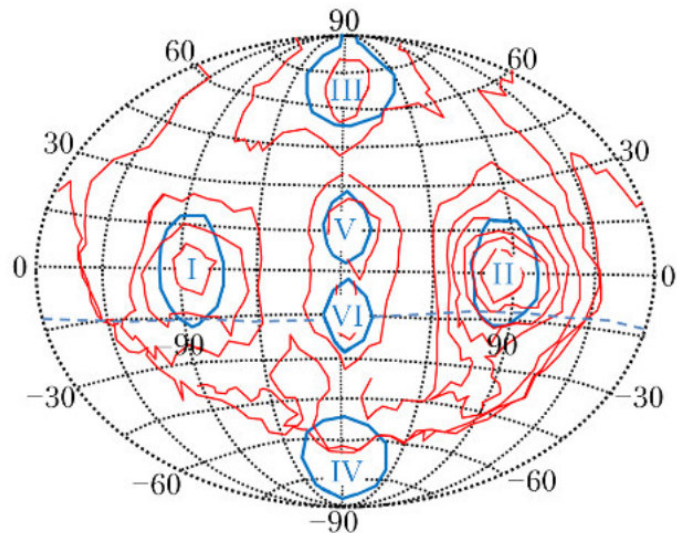


Рисунок 1.10 – Расположение основных радиантов спорадических потоков на небесной сфере: I – Направление на Солнце; II – противосолнечное направление; III – северная тороидальная составляющая; IV – южная тороидальная составляющая; V – северная составляющая апекса орбитального движения Земли; VI – его южная составляющая [69]

### Вклад радиантов в поток спорадических метеороидов

Радиант (рис. 2)	Характеристика радианта (источника метеороидов)	Численность (по массе), %	
		Браун, Джоунс	Тейлор
I	Солнечный ( <i>heliion</i> )	33	33
II	Антисолнечный ( <i>anti-heliion</i> )	33	36
III	Северный тороидальный ( <i>North toroidal</i> )	5	6
IV	Южный тороидальный ( <i>South toroidal</i> )	5	6
V	Северный апекс ( <i>North Apex</i> )	24	4
VI	Южный апекс ( <i>South Apex</i> )		4
—	Исходящие между основными радиантами	—	11

Рисунок 1.11 – Вклад радиантов в поток спорадических метеороидов [69]

При этом необходимо учитывать анизотропию в скорости метеороидов и частиц КМ по отношению к КА, возникающую в результате векторного суммирования их скоростей.

Скорости встречи метеороидов с КА на низких орбитах вокруг Земли лежат в диапазоне 11,2...72,0 км/с. Максимум в нормализованных распределениях скорости на высотах орбит до 36 000 км соответствует скорости в  $18 \pm 2$  км/с (наиболее вероятная скорость). Скорости встречи частиц КМ с КА в ОКП существенным образом зависят от параметров орбиты КА и лежат в диапазоне 4,0..16,0 км/с. Для низких круговых орбит наиболее вероятная скорость удара частиц КМ составляет  $8 \pm 2$  км/с [69].

С момента запуска первого советского спутника по настоящее время системами контроля космического пространства США и России было зарегистрировано и каталогизировано около 40 000 космических объектов искусственного происхождения. Это объекты размером более 10–30 см. Число космических стартов составляет примерно 100 в год. Масса ежегодно выводимых на орбиты объектов примерно 160 тонн [74].

В 1999 г. ООН опубликовала первый обзорный доклад о проблеме космического мусора. В этом докладе вероятность столкновения космических аппаратов с частицами техногенного происхождения (космического мусора) размером от  $10^{-2}$  до  $10^3$  см оценивалась величиной от  $10^{-8}$  до 1 столкновения в год на каждый квадратный метр поверхности космического аппарата ( $1/\text{год}/\text{м}^2$ ).

К настоящему времени существует несколько моделей характеризующих как параметры частиц космического мусора, так и вероятности их столкновения с космическими аппаратами. Сводные параметры этих моделей приведены в таблице 1.3. При этом в работе [70] отмечается, что разные модели дают разные результаты.

Для описания естественной метеорной среды космического пространства используются модель Грюна (Meteoroid Engineering model (MEM 2.1), которая рассматривает диапазон масс метеоритов  $10^{-6} \div 10^1$  г; Interplanetary Meteoroid Engineering Model (IMEM 1.1), которая рассматривает диапазон масс метеоритов  $10^{-18} \div 1$  г и ГОСТ 25645.128-85, который рассматривает диапазон масс метеоритов  $10^{-9} \div 10^2$  г. Современные модели метеорного вещества в космическом пространстве совершенствуются по пути расширения диапазона масс и размеров рассматриваемых объектов. Например, в ESABASE2/Debris Release 6.0 Technical Description от 05.07.2013 года рассмотрены метеориты с размерами  $10^{-3} \div 10^2$  см. International standard ISO/FDIS 14200 от 29.08.2012 содержит сравнение существующих моделей.

В современных моделях вероятности столкновения частиц с поверхностями космических аппаратов имеют большие значения по сравнению с представленными в докладе ООН в 1999 году [81-87]. Согласно проведенному моделированию вероятность

столкновений космического аппарата резко увеличивается с уменьшением размера частиц космического мусора.

Таблица 1.3 - Параметры частиц космического для разных моделей

Параметры модели	Название модели						
	Модель Грюна [80]	Модель Дивайна [81]	Модель Дивайна-Стобака [82]	Модель SSP 30425 (ISS) [83]	Модель IMEM (ESA) [84]	Модель MEM (MSFC) [85]	
Тип модели	Спорадическая составляющая	Спорадическая составляющая	Спорадическая составляющая	Спорадическая составляющая	Спорадическая составляющая	Спорадическая составляющая	
Межпланетные объекты	Не учитывает	0,1-20 а.е.	0,1-20 а.е.	Не учитывает	0,1-10 а.е.	0,2-2 а.е.	
Диапазон масс, г	10 <sup>-18</sup> -10 <sup>2</sup>	10 <sup>-18</sup> -1	10 <sup>-18</sup> -1	10 <sup>-18</sup> -10 <sup>2</sup>	10 <sup>-12</sup> -10 <sup>2</sup>	10 <sup>-6</sup> -10	
Околоземные объекты	Да	Да	Да	Да	Да	Да	
Влияние гравитационных составляющих	Не учитывает	Только Земля	Только Земля	Только Земля	Только Земля	Только Земля	
Магнитное поле планет	Не учитывает	Только Земля	Только Земля	Только Земля	Только Земля	Только Земля	
Распределение по скоростям	Единственное значение (20 км/с)	Учитывает	Учитывает	Учитывает	Учитывает	Учитывает	
Плотность	Единственное значение (2,5 г/см <sup>3</sup> )	2 г/см <sup>3</sup> ( $m < 10^{-6}$ г); 1 г/см <sup>3</sup> ( $10^{-6}$ - $10^{-2}$ г); 0.5 г/см <sup>3</sup> ( $m > 10^{-2}$ г)	2 г/см <sup>3</sup> ( $m < 10^{-6}$ г); 1 г/см <sup>3</sup> ( $10^{-6}$ - $10^{-2}$ г); 0.5 г/см <sup>3</sup> ( $m > 10^{-2}$ г)	2 г/см <sup>3</sup> ( $m < 10^{-6}$ г); 1 г/см <sup>3</sup> ( $10^{-6}$ - $10^{-2}$ г); 0.5 г/см <sup>3</sup> ( $m > 10^{-2}$ г)	2 г/см <sup>3</sup> ( $m < 10^{-6}$ г); 1 г/см <sup>3</sup> ( $10^{-6}$ - $10^{-2}$ г); 0.5 г/см <sup>3</sup> ( $m > 10^{-2}$ г)	Единственное значение (2,5 г/см <sup>3</sup> )	Единственное значение (1 г/см <sup>3</sup> )
Дата издания	1985	1993	1996	1994	2004	2006	

Проблема контроля техногенного засорения космоса, актуальность которой отражена в [72] (рисунок 1.12, таблица 1.4), ставит конкретные задачи перед экспериментальной физикой. Среди них в работе [71] особо выделяется необходимость разработки методов регистрации высокоскоростных частиц диаметром 1–7 мм.

Таблица 1.4 - Классификация объектов КМ по их размеру и степени угрозы (на основе публикации Шустова Б.М. «О роли науки в изучении и парировании космических угроз» в Вестнике Российской академии наук) [72]

Класс объектов КМ по размеру	I 0,1-1 см	II 1-10 см	III >10 см
Количество объектов на всех высотах	130 млн	1 млн	36 тыс.
Количество объектов на НОО	20 млн	500 тыс.	23 тыс.
Последствия столкновения с КА	Серьезное повреждение КА	Серьезное повреждение или уничтожение КА	Гарантированное уничтожение КА
Существующие методы защиты	Применение защитных экранов	Маневр уклонения	Маневр уклонения

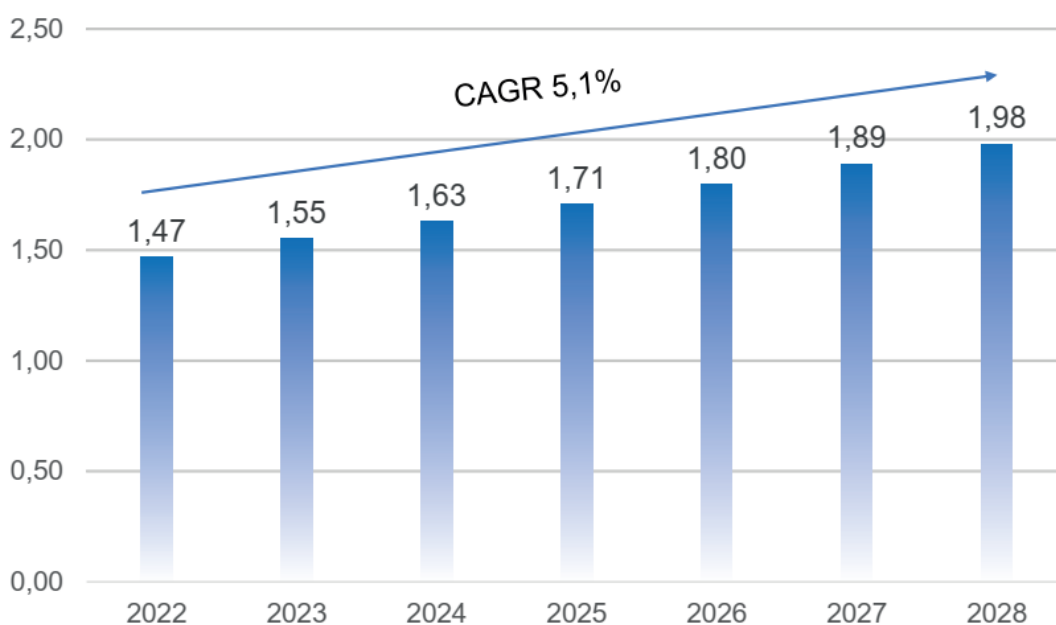


Рисунок 1.12 - Прогноз динамики развития мирового рынка услуг мониторинга и предоставления информации о ситуации в ОКП до 2028 г., млрд долл. [72]

Актуальность исследования приборов и методов регистрации параметров микрометеороидов обусловлена несколькими важными аспектами:

1. Безопасность космических полетов: микрометеороиды представляют собой существенную угрозу для космических аппаратов, спутников и экипажей. Исследования в этой области позволяют разрабатывать более эффективные системы защиты и обеспечивать безопасность космических миссий.

2. Космология: изучение микрометеороидов помогает лучше понять свойства и характеристики космической среды, в которой находятся космические объекты. Это знание важно для научных исследований и для будущих миссий на другие планеты.

3. Разработка новых материалов: исследования в этой области могут способствовать созданию новых материалов и технологий, устойчивых к воздействию микрометеороидов, что улучшит долговечность и надежность космических аппаратов.

Таким образом, исследование приборов и методов регистрации параметров микрометеороидов является значимой областью, способствующей развитию космической науки и технике, а также обеспечению безопасности космических полетов. Можно сделать вывод что исследование микрометеороидов и частиц космического мусора является **актуальной задачей**, поэтому необходимо совершенствовать приборы и методы проведения экспериментальных исследований в космических и лабораторных условиях. Помимо этого можно также сказать, что представляет интерес проведения экспериментов и в других областях космического пространства, не только в околоземном, например, точки Лагранжа (облака Кордылевского) или частиц атмосферы Луны (лунную пыль).

Важно отметить, что интерес представляют, как физические параметры (масса, скорость, заряд, средняя плотность, форма), элементный состав высокоскоростных микрочастиц, так и источник их происхождения (направление их прилета).

## **1.2 Обзор физических эффектов, которые используются для регистрации пылевых микрочастиц**

При соударении микрометеороидов и частиц космического мусора с поверхностью космического аппарата наблюдаются различные эффекты, оказывающие негативное влияние на функционирование космических аппаратов [24, 73\*, 74-80]:

- Изменения тепловых, оптических или электрических свойств, вызванные поверхностной эрозией и деградацией;
- Структурные повреждения внутренних подсистем, вызванные пробиванием стенок космических аппаратов;
- Разрыв кабелей или тросов;
- Короткие замыкания;
- Повреждение CCD – матриц;
- Полное разрушение космического аппарата;
- Электромагнитные помехи;
- Зарядка космического аппарата, приводящая к электроразрядам.

Перечисленные физические процессы и эффекты, несмотря на свои негативные и разрушительные последствия, могут быть использованы для изготовления датчиков

регистрации высокоскоростного воздействия. Этот вид научной аппаратуры используется для определения точного момента возникновения высокоскоростного воздействия с последующим анализом свойств и параметров предшествующих физических явлений и их компонент.

В таблице 1.5 [88] указаны массо–технические характеристики датчиков и их разрешающие параметры.

Таблица 1.5 - Датчики высокоскоростных микрочастиц

Название миссии	Название датчика	Масса, кг	Мощность, Вт	Площадь, м <sup>2</sup>	Минимальная масса частиц, кг	Максимальная масса частицы, кг
HEOS 2	Dust Detector	–	–	0.01	$1 \times 10^{-17}$	$1.4 \times 10^{-14}$
Helios 1/2	Dust Sensor	–	–	0.012	$1 \times 10^{-17}$	$1.4 \times 10^{-14}$
Hiten	Mars Dust Counter	0.61	1.80	0.01	$1 \times 10^{-16}$	$1 \times 10^{-7}$
Ulysses	Dust Experiment	3.75	2.0	0.10	$1 \times 10^{-16}$	$1 \times 10^{-6}$
Nozomi	Mars Dust Counter	0.7	3.78	0.01	$1 \times 10^{-15}$	$1 \times 10^{-8}$
Clementine	Orbiting Meteoroid and Debris Counting Experiment	0.5	0.01	0.16	–	–
Express–2	Geostationary Orbit Impact Detector	4.48	3.40	0.1	$>1 \times 10^{-14}$	
Cassini	Cosmic Dust Analyser	17.15	17.00	0.1	$1.3 \times 10^{-16}$	$1.2 \times 10^{-4}$
	Impact Ionisation Detector	8.00	8.00	0.10	$1 \times 10^{-15}$	$1 \times 10^{-7}$
	Chemical Analyzer Target	7.40	9.00	0.02	$1 \times 10^{-15}$	$1 \times 10^{-7}$
	High Rate Detector	1.10	0.70	0.006	$8 \times 10^{-13}$	$1 \times 10^{-4}$
Stardust	Cometary and	–	–	0.01	–	–

	Interstellar Dust Analyzer					
	Dust Flux Monitor Instrument	1.76	1.80	0.022	$1 \times 10^{-11}$	$1 \times 10^{-4}$
	Large Area Momentum Sensor	–		0.33	$5 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-3}$
Rosetta Lander, Philae	DIM	0.41	0.17	0.007	$6 \times 10^{-10}$	$8 \times 10^{-4}$
Cosmos–Oberstufe	Micrometeoroid and space Debris Detector–1	1.40	–	0.1	$>1 \times 10^{-5}$	
Spectr–R	Micrometeoroid and space Debris Detector–2	3.50	10	0.12	$>1 \times 10^{-9}$	
IKAROS	Arrayed Large–Area Dust Detectors in Interplanetary space	0.25	–	0.54	–	–
BepiColombo MMO	Mercury Dust Monitor	0.60	4.00	0.006	$1 \times 10^{-14}$	$1 \times 10^{-8}$

Диапазон применимости того или иного эффекта наглядно представлен в работе [89] (рисунок 1.13).

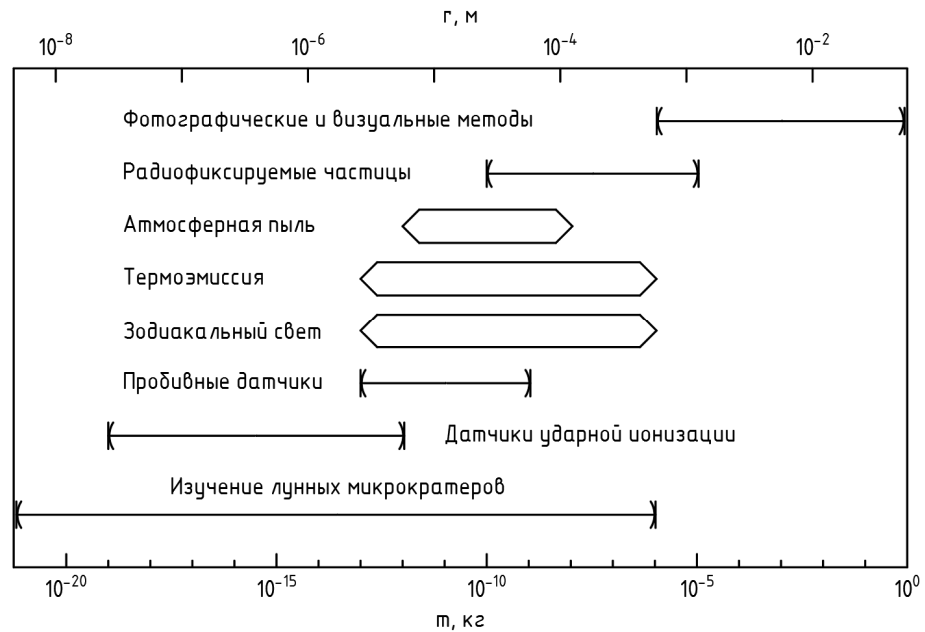


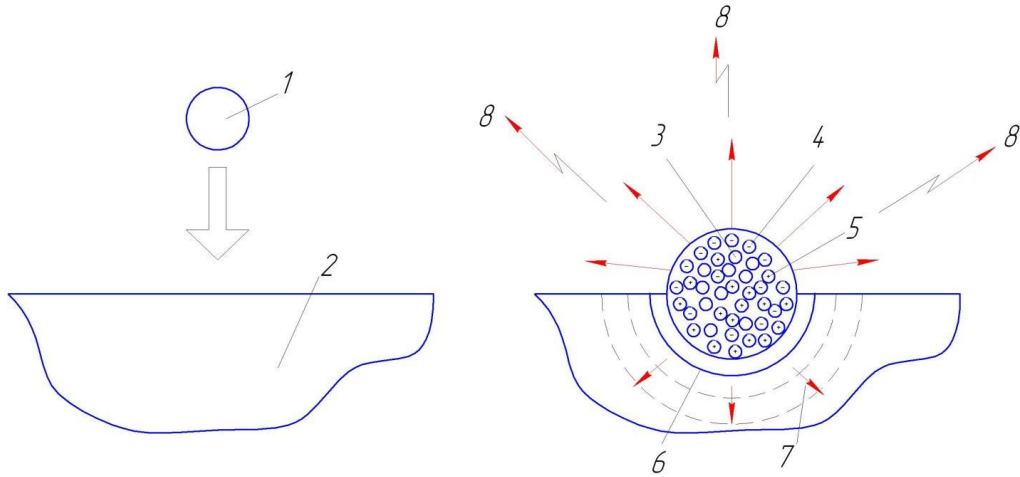
Рисунок 1.13 - Методы регистрации высокоскоростных микрочастиц

Рассмотрим более подробно некоторые из этих эффектов, которые наблюдаются при контактном взаимодействии высокоскоростной микрочастицы с поверхностью мишени. Здесь переплетаются такие области науки как физика взрыва, физика твердого тела, квантовая механика, оптика и многие другие. Характерными особенностями таких процессов являются их краткосрочность, точечное воздействие и сложность постановки повторяемого эксперимента.

Например, эксперименты со сталью, проведенные авторами [90, 91], показали, что плавление вещества начинается при скоростях удара более 2–3 км/с. При меньших скоростях возможны лишь процессы деформации и механического разрушения частицы и мишени. Испарение вещества, сопровождающееся частичной термической ионизацией образующегося пара, начинается при скоростях удара порядка 10–15 км/с и выше, а при скоростях, превосходящих диапазон 20–25 км/с, процесс термической ионизации протекает настолько интенсивно, что из области соударения выбрасывается облако плазмы, имеющей температуру  $\sim 10^4$  К.

К основным параметрам микрочастиц, представляющих интерес, относят массы, скорость и их элементный состав. Масса и скорость (кинетическая энергия) служат для описания механических воздействий: эрозии покрытий, деформации и разрушения поверхностей и экранов космических аппаратов. Элементный состав необходим для определения источника высокоскоростной микрочастицы. Тем не менее, исходя из величины скорости микрочастицы, можно предсказать характер ее происхождения [92]: от 7 до 11 км/с – это космический мусор, от 11 до 72 км/с – это микрометеороиды.

При высокоскоростном ударе микрочастицы по мишени (рисунок 1.14) в виде полубесконечной преграды происходит процесс ионообразования, распространения ударных волн в мишени, выброс нейтрального газа, образование кратера, распространения радио- и оптических волн в окружающее пространство. Данные эффекты используются для регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора.



1 – микрочастица; 2 – мишень; 3 –нейтральный газ; 4 – электроны; 5 – ионы; 6 – кратер; 7 – ударные волны; 8 – электромагнитное излучение (оптическое и радио)

Рисунок 1.14 - Физические эффекты при высокоскоростном ударе: слева представлен момент до удара, справа момент удара [73\*]

### Электростатическая и электромагнитная индукция

Микрочастицы (космический мусор и микрометеороиды), находясь в околоземном пространстве, заряжаются до некоторого потенциала под действием факторов космического пространства [93]. Поэтому в качестве одного из способов регистрации частиц используют явление электростатической индукции. Как отмечается во многих работах [31, 34, 94-97], данное явление используется чаще всего для измерения скорости микрочастиц.

В основе явления электростатической индукции лежит наличие в незаряженных проводниках положительных и отрицательных свободных зарядов, которые могут перемещаться по проводнику. При движении заряженного тела относительно неподвижной системы электродов величины наведенных на электродах зарядов изменяются, и во внешних цепях протекает ток, обусловленный перераспределением зарядов. Математической моделью, удобной для описания явления электростатической индукции, является теорема Шокли–Рамо [2].

Согласно [98] заряд, наведенный на  $k$ -м электроде, равен произведению влияющего заряда  $Q$  на потенциал фиктивного лапласовского поля системы в точке нахождения  $Q$ , которое возникло бы, если бы на  $k$ -й электрод был задан безразмерный единичный потенциал, остальные же электроды были бы заземлены, а сам заряд  $Q$  удален из системы на бесконечность. При сближении заряда с измерительным электродом, на последнем наводится (образуется) заряд:

$$Q_{ik} = -Q\varphi_Q(x, y, z) \quad (1.1)$$

где  $Q$  – заряд микрочастицы,  $\varphi_Q(x, y, z)$  – потенциал фиктивного лапласовского поля в точке нахождения заряда  $Q$ . Как можно заметить из формулы (1.1)  $Q_{ik} = -Q$  при  $\varphi_Q(x, y, z) = 1$ .

Теперь перейдем к понятию тока, который протекает в измерительном электроде. Заряд, подлетая к электродам, наводит на них импульс тока, форму которого можно рассчитать с использованием также теоремы Шокли–Рамо [98, 99]. Согласно этой теореме, если в пространстве, в котором располагаются электроды, со скоростью  $\mathbf{V}$  движется заряд  $Q$ , то на  $k$ -ый электрод наводится ток:

$$i_k(t) = Q (\mathbf{V}\mathbf{E}_k), \quad (1.2)$$

где  $\mathbf{E}_k$  — эффективная (взвешенная) напряжённость поля в точке, где находится заряд  $Q$  в момент времени  $t$ , рассчитанная по схеме: заряд удалён, потенциал проводника, с которого снимается ток, равен 1, потенциал оставшихся проводников равен 0 [98-100].  $(\mathbf{V}\mathbf{E}_k)$  – скалярное произведение вектора скорости и эффективной напряженности.

Формула (1) выведена с тем допущением [98, 100], что поле движущегося заряда удовлетворяет уравнению Лапласа и не учитывает конечной скорости распространения электромагнитных волн, которая может быть принята во внимание с использованием следующего выражения [100]:

$$i_k(t) = Q (\mathbf{V}\mathbf{E}_k) + \int_W (\mathbf{E}_k \mathbf{j}_{см}) dW, \quad (3)$$

где  $\mathbf{j}_{см} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$  – плотность тока смещения,  $W$  – объем, через который протекает ток.

Датчики, основанные на данном методе регистрации, активно используются в ускорителях микрочастиц (рисунок 1.15), путем фиксации времени пролета их микрочастицами [101\*, 102\*], и для измерения вектора скорости микрочастиц в космическом пространстве (обычно измерительные электроды выполнены в виде сеток)[103], и позволяют измерять скорость и оценивать заряд микрочастиц.

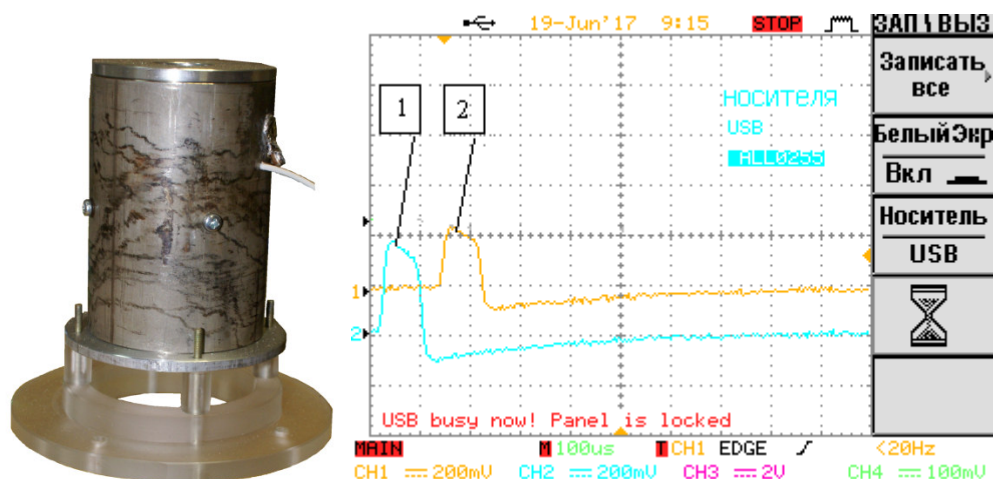


Рисунок 1.15 - Цилиндр Фарадея (слева) и осциллограмма сигнала с двух (1 и 2) цилиндров Фарадея, расположенных на одной измерительной оси (справа)

### 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 [104]:

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

Авторы работ [105-107], исследуя этот эффект в ионных кристаллах, показали, что электрический потенциал возникает как при напряжениях ниже предела текучести, так и в процессе пластической деформации кристаллов и обусловлен движением заряженных дислокаций. Значения амплитуды потенциалов зависят, в частности, от концентрации сорта примесей, скорости деформирования и температуры образцов [105].

Разворот молекул происходит под действием градиента давления на фронте ударной волны, если один конец молекулярного диполя имеет большую массу, чем другой.

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

### **Вакуумный пробой промежутка “частица – преграда”**

Если пылевая частица, имеющая заряд в  $10^{-12}$ – $5 \times 10^{-14}$  Кл, и металлическая преграда вступают во взаимодействие в вакууме на расстоянии, не превышающем нескольких диаметров частицы, то можно наблюдать эффект электрического пробоя, в результате которого часть вещества частицы и преграды превращается в ионизированный газ. Если в области пробойного участка создать электрическое поле, то с поверхности преграды (мишени) можно снять заряд электронов или ионов. Величина заряда, образованного в результате пробоя, определенным образом связана с потенциалом на частице и оценивается структурными дефектами поверхности частицы и мишени, а также рядом других факторов. Параметры плазмы, полученной в результате пробоя вакуумного промежутка, характеризуются температурой, которая оценивается через потенциальную энергию заряженной частицы [2, 108].

$$T = \xi U_r$$

где  $\xi$ – коэффициент пропорциональности;  $U_r$ – потенциал заряженной частицы.

Температура катодного факела находится в пределах 5–10 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 возникновения плазмы являются заряд частицы и её размер [2].

### **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 [109]. Воздействуя на дно кратера рентгеновским (или лазерным) излучением, можно получать спектры рентгеновского излучения и, тем самым, определять 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 [2].

### Кратерообразование

При высокоскоростном соударении частицы с полубесконечной средой образуется кратер (рисунок 1.16), параметры которого являются функциями массы, скорости и плотности частицы [22, 110-113].

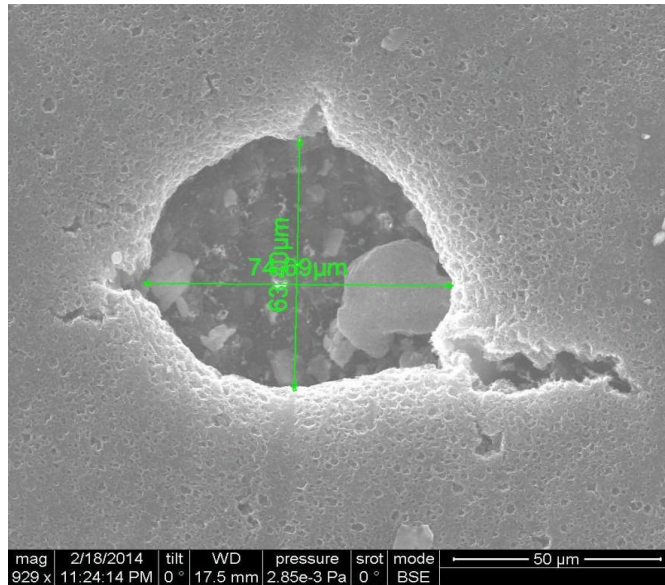


Рисунок 1.16 - Кратер от удара микрочастицы из алюминия диаметром 5–10 мкм по мишени из меди

Существующие полуэмпирические выражения, связывающие диаметр, глубину кратера, образованного в полубесконечной преграде справедливы лишь в определённой 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  $m_0, V, d_0$  – масса, скорость, диаметр частицы соответственно;  $D, h$  – диаметр, и глубина кратера соответственно;  $\rho_0, \rho_1, H_{B0}, H_{B1}$  – плотности и твердости частицы и преграды соответственно.

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 [22]:

$$\frac{D_H}{D_S} = 0,45V_0 \left(\frac{h_1}{D_S}\right)^{2/3} + 0,9$$

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 выражениям [79]:

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

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

где  $p$  – глубина проникновения,  $D_{CO}$  – эквивалентный диаметр разрушения,  $k$  – константа материала,  $\rho_t$  – плотность материала мишени,  $\rho$  – плотность материала микрочастицы,  $V$  – скорость микрочастицы,  $\theta$  – угол к нормали,  $m$  – масса микрочастицы.

### **Пьезоэффект при ударном взаимодействии частиц с мишенью**

При высокоскоростном ударе микрочастиц в пьезоэлектрические материалы происходит их сжатие и растяжение, при этом на их гранях появляются заряды, подобные поляризационным [2]. На данном принципе работают пьезодатчики высокоскоростных микрочастиц.

В этих датчиках используется эффект преобразования механических колебаний, возникающих при столкновении микрометеороида с поверхностью чувствительного элемента, в пульсирующий электрический сигнал с помощью пьезоэлектрических кристаллов. Такие типы датчиков можно реализовать на основе тонких пленок окиси цинка. При матричном типе нанесения плёнок на мишень появляется возможность совмещения их с плёнками других типов (люминофором, диэлектриком) и получения многоинформативного преобразователя.

Описанный 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 датчиков является пылевой датчик Mercury Dust Monitor (рис. 6) миссии VeriColombo [114, 115].

Для разработчиков космических аппаратов представляет интерес разработка, представленная в [116]: детектирующим элементом является комбинированная экранно-вакуумная термоизоляция, позволяющая значительным образом увеличивать активную площадь датчика.

### Ионизация

В процессе высокоскоростного соударения микрочастицы с мишенью наблюдается процесс образования многокомпонентной плазмы (так называемого плазменного сгустка) за счет скоротечного преобразования кинетической энергии частицы в тепловую энергию мишени микрочастицы, которая разогревает вещества до температуры в 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. На рисунке 1.17 представлена осциллограмма, полученная в ходе наземного эксперимента [102\*].

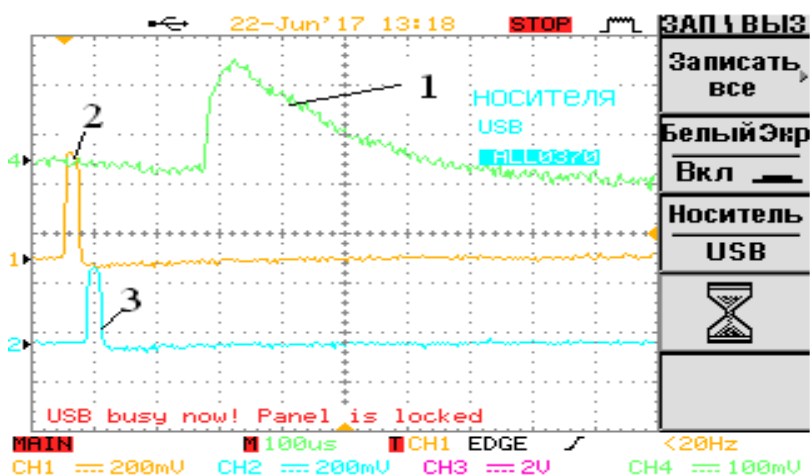


Рисунок 1.17 - Осциллограммы ионизационного импульса (1) и импульсов с колец Фарадея (2,3), полученные на ускорителе микрочастиц с частицами из алюминия и мишенью из меди

В 1963 году была обнаружена [117] плазма, образовавшаяся при высокоскоростном ударе [118]. С тех пор плазменные и связанные с ними электромагнитные эффекты, которые

возникают при высокоскоростных соударениях, привлекли внимание большого исследователей.

В своей работе авторы [117] выяснили зависимости параметров измеряемого сигнала от параметров микрочастицы и конструкции прибора. Формулы, описывающие их, представлены ниже [119]:

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

где  $t$  является временем нарастания сигнала заряда,  $Q$  – амплитуда заряда,  $m$  – масса микрочастиц и  $V$  – скорость удара микрочастицы. Параметры  $C_t, C_p, \eta, \beta$  должны быть определены с помощью калибровочного эксперимента. Значения  $\varepsilon$  и  $\alpha$  устанавливаются в 0 и 1 соответственно. Тогда масса частицы и скорость удара могут быть определены исходя из амплитуды и времени нарастания сигнала.

Например в работе [120] при ударе микрочастиц об алюминиевую мишень была получена эмпирическая формула, получившая широкое распространение в научно-исследовательских кругах:

$$Q = 0,1m \left( \frac{m}{10^{-11}} \right)^{0,02} \left( \frac{V}{5} \right)^{3,48}$$

Эффекты при наклонном высокоскоростном ударе о поверхность исследовались в работах [119, 121-123]. Влияние электрического поля на процесс ионизации рассмотрены в [124, 125\*]. В [126] приведены результаты экспериментов по воздействию столкновений и солнечными батареями, в ходе которых автором были определены электронная температура и плотность плазмы с помощью зонда Ленгмюра. Негативное влияние на солнечные батареи исследовались также в [127]. В [128] экспериментально исследовали свойства плазмы и электромагнетизма. В [129] были измерены ионные выходы и их характерные энергии в плазме, создаваемой в процессе соударений железных микрочастиц на родий в диапазоне от 1,2 до 87 км/с. Подобными же исследованиями занимались авторы работ [130-132].

В [133] авторы провели исследование о влиянии ряда параметров (например, исходного заряда микрочастиц, угла падения) на распределения массы и скорости частиц космической пыли, обнаруженных в типичных датчиках 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 [125\*] указывается, что при высокоскоростном ударе микрочастицы в мишень сначала происходит образование ударной плазмы из материалов мишени и микрочастицы, потом закалка плазмы и в дальнейшем ее разлет.

В работе [134] предложена теоретическая модель, описывающая стадии плазмы. На основании экспериментальных результатов, расширение плазмы под высокоскоростные соударения можно разделить на три этапа:

- образование;
- равновесие;
- затухание.

Распределение скоростей ионов в многокомпонентной плазме в зависимости от температуры подчиняется распределению Максвелла [134]:

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

где  $Q$  – общий заряд плазмы,  $m_j$  – масса ионов,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T_j$  – температура,  $\eta_j$  – 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.

### **Фотоэмиссия**

Явление фотоэмиссии (световая вспышка) связывают с процессом свечения плазменного сгустка. В работе [135] отмечается, что световая вспышка может быть также использована в качестве запускающего триггера для другой научно-измерительной аппаратуры по исследованию высокоскоростного соударения. Что еще более важно, свойства оптической вспышки могут быть использованы для оценки различных параметров воздействия, такие как массы и скорости микрочастицы, обеспечивая тем самым простой, но эффективный способ регистрации высокоскоростных микрочастиц в околоземном космическом пространстве и частиц пыли в других местах в солнечной системе.

Ударная вспышка была обнаружена в одних из первых тестов высокоскоростного соударения [136]. Впервые влияние параметров высокоскоростных микрочастиц на параметрах вспышки было описано в [137, 138], где отмечалось, что энергия вспышки связана с массой и скоростью микрочастицы следующим соотношением:

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

где  $E$  – энергия вспышки, образовавшейся при ударе;  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты со значениями  $\alpha=1,25$ ,  $\beta=2,3-3$ ;  $C$  – постоянная, зависящая от свойств материала и от принципа измерения световой вспышки. В дальнейших работах упоминается, что  $\alpha=1$ ,  $\beta=2,3-8$  в зависимости от методики проведения эксперимента.

В работе [135] уточняется, 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 микрочастицы. 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.

В работе [135] показано, что наилучшая корреляция наблюдается при исследовании полной энергии, то есть необходимо произвести интегрирование сигнала, представленного на рисунке 1.18 [139\*].

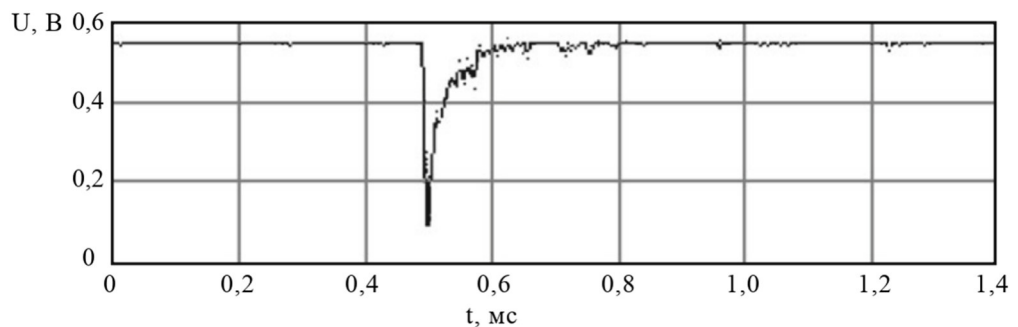


Рисунок 1.18 - Типичный сигнал вспышки, полученный с помощью ФЭУ [139\*]

В работах [137, 138] упоминается, что время нарастания сигнала связано со скоростью и не связано с массой. Впоследствии многие исследователи обнаружили, что данная связь значительно слабее [135].

В работе [135] отмечается, что временная корреляция слабо наблюдается для скоростей до 8 км/с. Тем не менее, для скоростей выше 8 км/с, имеется слабая зависимость, показывающая, что время нарастания сигнала уменьшается с увеличением скорости. Такой переход авторы в [140] связывают с переходом из состояния частичной ионизации к состоянию полной ионизации в ударной области.

В работе [141] для численной оценки интенсивности излучения, при условии, что частица и материал мишени изготовлены из одного материала, авторы применяют закон Стефана–Больцмана:

$$I = \left( \frac{\sigma}{(24Nk)^4} \right) V^8,$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана,  $k$  – постоянная Больцмана,  $V$  – скорость частицы,  $N$  – число атомов на единицу массы.

В действительности, однако, спектр излучения имеет изрезанный характер [142, 143], поскольку модель абсолютно черного тела является идеализированной. Если

проводить исследования спектра вспышки при помощи метода спектрофотометрии, то можно получить более полную картину о материале ударника и мишени.

Как правило, измерение свечения плазмы от воздействия высокоскоростных микрочастиц проводится с помощью фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) [144]. Но также возможно измерение и с помощью фотодиодов, однако в данном случае/при таком подходе чувствительность прибора, а значит и объём получаемых данных, ухудшается.

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

Температуру плазмы ( $T_0$ ) в начальный момент времени можно вычислить согласно работе авторов [145], если использовать два ФЭУ, на входе которых расположены светофильтры с узкой полосой пропускания для различных длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ :

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

$$R = \frac{E_{\lambda_1}}{E_{\lambda_2}},$$

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

где  $C_1 = 3,741 \times 10^{-16} \text{ Вт м}^2$ ,  $C_2 = 1,439 \times 10^7 \text{ нм К}$ .

### Электромагнитное излучение

Электромагнитное воздействие, наблюдаемое экспериментально при высокоскоростном соударении, связано с излучением плазменного сгустка и микрозарядами, возникающими на мишени [146].

В работе [146] показано, что энергия электромагнитного излучения радиоволнового диапазона зависит от материала мишени и линейно связана со скоростью частицы в диапазоне скоростей 2–7 км/с, когда явно не выражены процессы образования плазмы. Для описания использовалось сопоставления с излучением диполя.

В работе [147] авторы отмечают, 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 будет действовать как антенна и излучать электромагнитные волны, распространяющиеся внутри и вокруг космического корабля. Более подробное математическое описание моделей излучения можно найти в работах [148-150].

### Тепловой эффект

Когда происходит удар по мишени, основная доля рассеиваемой кинетической энергии частиц нагревает мишень до соответствующей температуры. В работе [151] 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:

$$E_{cal} = \eta E_k,$$

где  $\eta$  показывает эффективность преобразования энергии при высокоскоростном ударе, причем всегда некоторое количество энергии теряется на инжекцию, формирование плазмы и излучение, тем самым не внося вклада в нагрев мишени (рисунок 1.19) [151].

Параметры частицы  
 скорость - 4,89 км/с  
 кинетическая энергия - 139 нДж  
 диаметр - 1,4 мкм

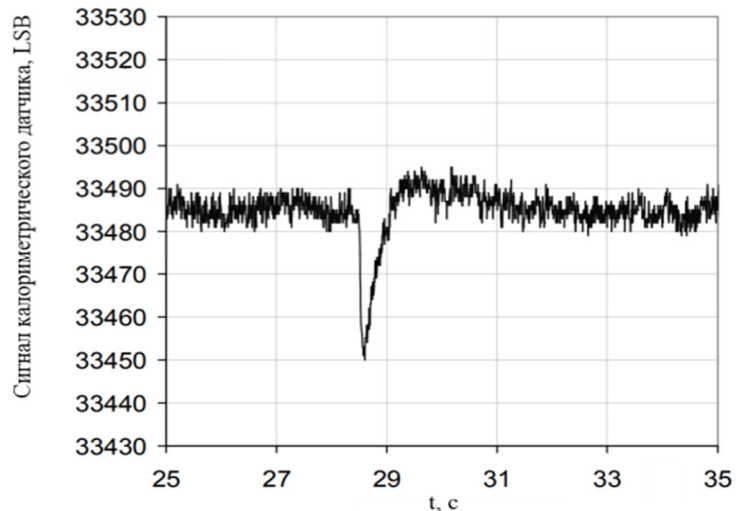


Рисунок 1.19 - Сигнал с калориметрического элемента при ударе частицы [151]

### Изменение электропроводности

Как отмечается в работе Я.Б.Зельдовича, Ю.П.Райзера [152] электропроводность органического стекла и парафина в ударной волне изменяется на 15–20 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 и тем самым облегчаются электронные переходы, приводящие к появлению свободных электронов и металлической проводимости в веществе, ранее бывшем диэлектриком [152].

Дальнейшие исследования [12\*, 152, 153] показали, что изменение электропроводности материалов можно оценить формулой:

$$\sigma(T) \sim \exp\left(\frac{-E}{kT}\right),$$

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

Изменение электропроводности позволило создать пленочные датчики высокоскоростных частиц космического мусора и микрометеороидов. Для этих целей используется многослойная структура металл–диэлектрик–металл, представляющая 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 [154\*, 155, 156].

### **Краткие выводы**

Анализ материалов, посвященным физическим эффектам при высокоскоростном ударе, позволяет сделать несколько выводов:

- с большой степенью точности возможно определить скорость микрочастицы, оценка же размеров частицы затруднительна в силу сложности ее геометрии;
- форму микрочастицы можно определить с помощью оптических методов либо анализируя диаметр кратеров после удара;
- для более качественного анализа параметров микрометеороидов и частиц космического мусора необходимо использовать совмещение нескольких физических принципов [2, 157];
- для описания процессов учёные стараются выявить простые зависимости, которые впоследствии могут быть использованы инженерами;
- необходимо проводить тарировку датчиков с использованием специализированного оборудования (ускорителей частиц).

### **1.3 Обзор конструкций датчиков**

Датчики микрометеороидов и частиц космического мусора можно классифицировать по разным признакам:

- по исследуемым параметрам (массе, скорости, заряду, элементному составу);
- по физическому эффекту положенному в основу процесса регистрации (однофакторного, многофакторные);
- по методу регистрации;
- по габаритам;
- по времени анализа данных (сразу или анализ проводить на Земле).

По методам регистрации выделяют способы регистрации с поверхности Земли (оптические и радиолокационные), они позволяют отслеживать только достаточно крупные

объекты и наблюдения за ними ведется постоянно на основе специальных каталогов (более 1 мм) [5, 158-160, 161\*, 162\*, 163-166, 167\*, 168, 169\*, 170\*, 171, 172\*-174\*, 175, 176, 177\*-202\*, 203-205].

Рассмотрим методы которые, используются для контроля параметров высокоскоростных микрочастиц с поверхности КА:

-дискретные датчики: пьезо, оптоволоконные ВБР, оптоволоконные распределенные;

-плёночной конструкции: пьезо, МДМ и т.д.

- датчики в виде космических аппаратов: больших и CubeSat.

Для контроля множества мелких объектов используют непосредственные измерения с использованием космических аппаратов. Такие датчики еще называют «*In-Situ*». К примеру, метод, основанный на использовании трех ПЗС матриц, позволяет определить не только расстояние до объекта, но и оценить его форму, и скорость движения [206].

К числу наиболее ранних методов относятся: ионизационный, конденсаторный, пьезоэлектрический, а также способы, базирующиеся на статическом анализе большого количества частиц через исследование деградации поверхности космического аппарата [207].

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 [47\*, 202\*].

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.

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 [47\*]. 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 работе [47\*].

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 [47\*].

Методы и устройства для регистрации высокоскоростных пылевых частиц можно классифицировать с учетом ряда их особенностей следующим образом [47\*, 208\*-211\*, 212, 213]:

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 быстрдействию 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 [47\*]:

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.

#### **Недостатки датчиков микрометеороидов и частиц космического мусора.**

Основным недостатком датчиков на основе пробития МДМ-структур [24, 47\*] является низкая чувствительность, обусловленная необходимостью физического пробоя, что ограничивает возможность обнаружения мелких или низкоскоростных частиц, не способных пробить верхний слой.

Датчики на основе конденсаторно-резистивных структур являются более чувствительными за счет необходимости обрыва тонких проводников. Однако для датчиков на основе проводящих полосок необходимо использовать большого количества микросхем или каналов считывания для регистрации состояния каждого токопроводящего элемента, что существенно усложняет конструкцию, увеличивает массу, энергопотребление и стоимость прибора, особенно при создании детекторов с высокой разрешающей способностью на больших площадях [22, 47\*, 110, 214, 215, 216\*, 217].

Основным недостатком датчиков на основе пьезоэффекта является большая вероятность ложного срабатывания от вибраций, распространяющихся по поверхности космического аппарата, а также от ударов и термических шумов, что усложняет выделение полезного сигнала [114].

Основным недостатком датчика на основе регистрации оптического излучения (вспышки) при высокоскоростном соударении является сложность количественной интерпретации световой вспышки из-за сильной зависимости интенсивности и энергии излучения от формы частицы и конструктивных параметров, а также необходимость использования высокочувствительных фотоэлектронных умножителей, подверженных влиянию паразитных засветок [139\*].

Основным недостатком полупроводниковых датчиков, работа которых основана на фазовом переходе селена в металлическое состояние под действием ударного давления [219], является слабая радиационная стойкость полупроводниковых структур и сильная температурная зависимость их параметров, что снижает надежность и точность измерений в условиях космического пространства.

Основными недостатками датчика на основе теплового эффекта следует считать высокую тепловую инерцию чувствительного элемента, приводящую к снижению быстродействия, и сложность конструктивной реализации, связанная с необходимостью

обеспечения эффективной тепловой изоляции и калибровки датчика. Поэтому такой тип датчиков не получил широкое распространение [151, 161\*].

Увеличение площади чувствительной поверхности напрямую повышает вероятность регистрации высокоскоростных микрочастиц, поэтому в качестве датчиков предлагается использовать крупногабаритные элементы самого космического аппарата [220\*, 221, 222].

В работе [168] рассматривается конструкция датчиков на основе надувных конструкций с использованием структур металл-диэлектрик - металл. Недостатком данного подхода является сложность обеспечения герметичности и стабильности геометрии надувных конструкций в условиях космического пространства, а также высокие требования к точности синхронизации при регистрации ионного импульса между двумя МДМ-структурами, что критично при малых временах пролета частиц.

В работе [223] рассматривается пылевой детектор CLOTH на основе пьезоэлектрических плёнок, для наблюдения микрометеороидов окружающей среды. Основным недостатком является снижение теплоизоляционных характеристик многослойной изоляции (MLI) при ее малых размерах, характерных для кубсатов (CubeSats), из-за увеличения соотношения длины внешнего края к площади, что приводит к усилению теплового мостика между лицевой и тыльной сторонами и ухудшению терморегулирования космического аппарата.

Датчик космического мусора (SDS) стал первой летной демонстрацией технологии орбитального датчика НАСА-ВМС на основе резистивной/акустической сетки (DRAGONS), разработанной и усовершенствованной Управлением программы НАСА по орбитальному мусору (ODPO) [157, 224]. Существенным недостатком, выявленным в ходе лётной эксплуатации, является низкая надежность электронной подсистемы, проявившаяся в многочисленных аномалиях (потеря командных каналов и телеметрии), что привело к полной потере полезной нагрузки менее чем через месяц работы на борту МКС. Это указывает на недостаточную отказоустойчивость при использовании большого количества каналов считывания (40 акустических датчиков, 4 резистивные сетки).

В работе [225] рассмотрена конструкция CubeSat Lunar Meteoroid Impact Observer (LUMIO), одна из двух концепций-победителей конкурса ESA SysNova Lunar CubeSats for Exploration. Она представляет собой миссию, предназначенную для наблюдения, количественной оценки и определения характеристик ударов микрометеороидов на обратной стороне Луны. Разработка базируется на спутнике CubeSat высотой 12U, оснащённом LUMIO-Cam, специально разработанным оптическим инструментом, способным обнаруживать световые вспышки в видимом спектре. Космический корабль выведен на гало-орбиту вокруг точки L2 Земля-Луна, где можно осуществлять постоянное

полнодисковое наблюдение обратной стороны Луны с отличным качеством, учитывая отсутствие фонового шума Земли. Недостатком является невозможность регистрации ударов на освещенной стороне Луны из-за яркого фонового излучения, а также зависимость обнаружения от условий освещения и наличия прямой видимости места удара.

В работе [226] представлена конструкция датчик для исследования параметров высокоскоростных микрочастиц на основе использования пьезопленок. В работе [227] предложены конструкция и принцип действия плоскопанельного детектора космической пыли регистрирующего параметры ударов на основе нескольких физических явлений. Описываемая конструкция включает в себя специальные вставки-мишени из уязвимых материалов КА для контроля степени их деградации под действием потока пылевых частиц. Однако приведенное в работе [227] носит чисто теоретический характер.

#### **Выводы на основе анализа конструкций датчиков**

При создании космической аппаратуры разработчик обязан руководствоваться требованиями ГОСТов и отраслевых стандартов. Ключевыми методами проектирования в данном случае выступают декомпозиция (разбиение системы на части), итерационный подход (циклическое повторение этапов) и обязательный контроль промежуточных результатов на каждом этапе работ [228\*]. Обобщая представленную информацию был разработан упрощенный алгоритм по проектированию аппаратуры для исследования микрометеороидов и частиц космического мусора (рисунок 1.20) [228\*].

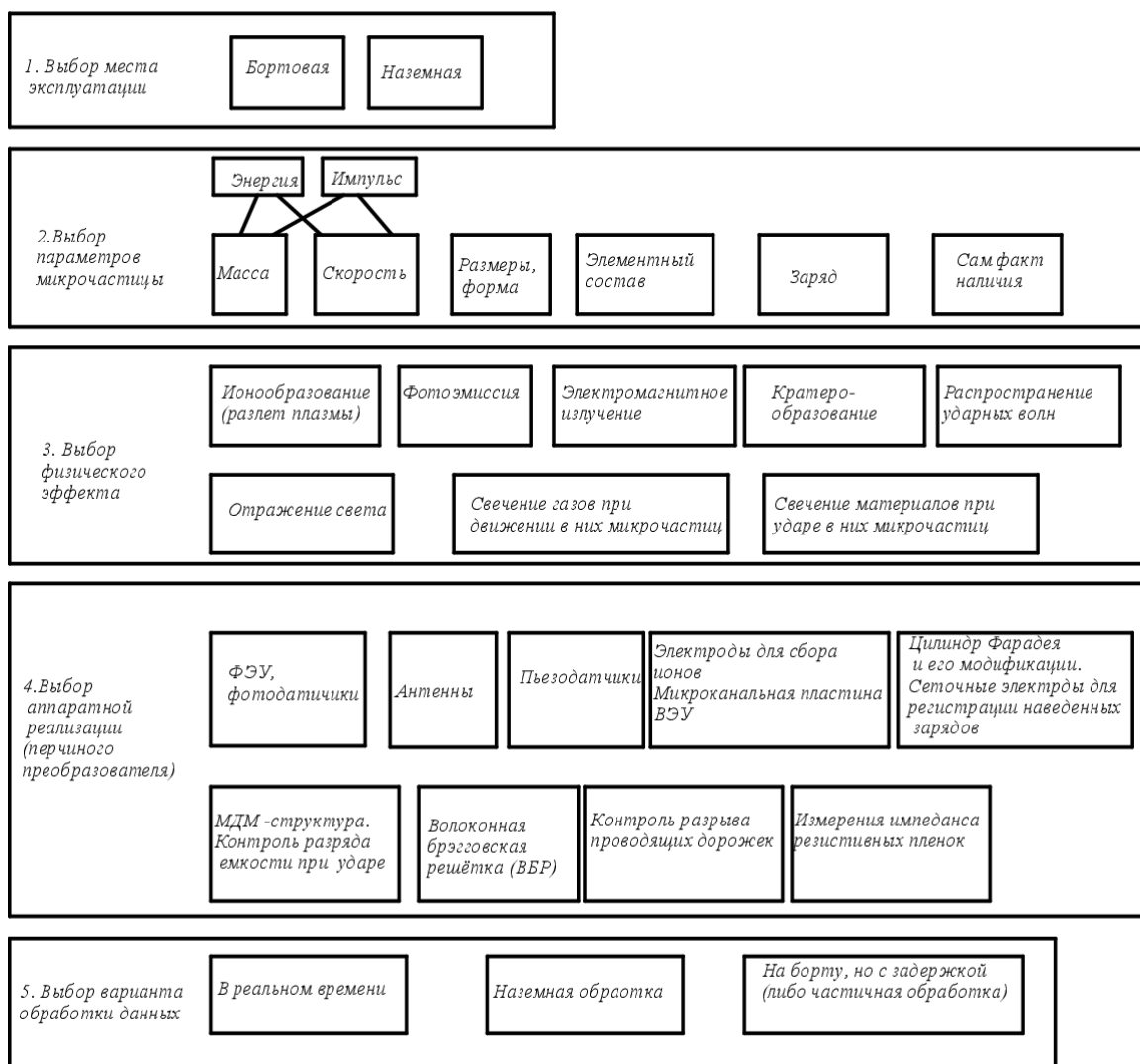


Рисунок 1.20- Упрощенный алгоритм по проектированию аппаратуры для исследования микрометеороидов и частиц космического мусора

При этом можно сделать несколько рекомендаций.

При проектировании аппаратуры желательно разделять блок электроники и блок датчиков, так как блок датчиков обычно располагается на поверхности космического аппарата. Так же разделение аппаратуры на два блока позволит повысить ремонтпригодность и взаимозаменяемость составных узлов аппаратуры.

Процесс высокоскоростного удара быстротечен, поэтому желательно использовать высокоскоростную электронику. Используются микросхемы FIFO, FPGA, микроконтроллеры с DMA (прямым доступом к памяти). Должна быть предусмотрена система резервирования. К примеру, в пьезодатчиках без такой системы невозможно их функционирования без отбраковки ложного срабатывания. Необходимо проводить фильтрации полученного сигнала от внешних помех: вызванных ударами протонов,

электронов. Необходимо делать оптическую развязку по сигналам передачи данных. Это такие интерфейсы как CAN, MIL-STD, оптически развязанные RS232, RS485, RS488. В канале измерения используются зарядочувствительные усилители с повышенной чувствительностью. Должна быть система самотестирования аппаратуры. Вся элементная база должна быть стойкой к воздействию факторов космического пространства (вакуума, температуры и радиации). Материалы, из которых изготавливаются аппаратура, может газить в космосе, что создает погрешности при измерении и затеняет оптические элементы космического аппарата (солнечные батареи, линзы).

Формирование телеметрии нужно производить с контролем ошибки. Обязательно в телеметрии должна содержаться информации о времени измерения, местоположении датчика, температуры работы датчика.

Наиболее информативные параметры высокоскоростных пылевых микрочастиц, с которыми связано повреждения КА представлены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 - Основные регистрируемые параметры микрочастиц

Параметр	Диапазон измерений	Важность параметра	Примечание
Скорость (V)	От ~1-2 км/с (низкоскоростные частицы на высоких орбитах) до 70 км/с и выше (межпланетная пыль).	Кинетическая энергия частицы пропорциональна квадрату скорости. Даже крошечная частица на высокой скорости обладает огромной разрушительной энергией. Отличие опасных последствий медленной частицы пыли и быстрого осколка космического мусора происходит именно по скорости.	Направление прихода частицы необходимо для определения траектории, идентификации ее возможного источника и расчета точки столкновения с КА. Для этого контролируется вектор скорости. Вектор скорости позволяет определить, была ли эта частица из определенного метеорного потока (естественная угроза) или фрагмент космического мусора (искусственная угроза). Это важно для

			каталогизации и прогнозирования угроз.
<p>Масса (m) и/или характерный размер (D):</p>	<p>Наиболее опасный диапазон — от десятков микрон до нескольких миллиметров. Более крупные объекты отслеживаются наземными радаром и телескопами, а частицы меньше микрона часто не несут катастрофической угрозы, однако они могут привести к постепенной деградации поверхности космических аппаратов (солнечных батарей, иллюминаторов и т.д.)</p>	<p>Второй ключевой компонент кинетической энергии. Параметр, который сложнее всего измерить напрямую для микрочастиц.</p>	<p>Проблема: Частицы имеют разную плотность и форму. Говорят об эффективном размере (диаметре сферы D).</p>
<p>Плотность (ρ) и элементный состав</p>	-	<p>От этого параметра зависит импульс, передаваемый при ударе, и тип образующейся плазменной струи. Плотная металлическая частица опаснее ледяной того же размера</p>	<p>Оценивается косвенно, по последствиям удара (например, с помощью масс-спектрометрии образовавшейся плазмы), по размерам образовавшегося кратера</p>

Координаты точки соударения	-	Позволяет локализовать повреждение на корпусе КА. Столкновение с солнечной батареей, научным прибором или топливным баком имеет разные последствия для срока функционирования космического аппарата.	
Производные (рассчитываемые) параметры: импульс и кинетическая энергия	-	Ключевые входные данные для моделей повреждений для прогнозирования пробития экрана, образования кратера и генерации вторичных осколков.	-

На основе выбранного регистрируемого параметра микрочастиц производят выбор физического эффекта для его регистрации. Наиболее широко распространёнными являются использование пьезоэффекта, так как с помощью пьезодатчиков можно контролировать большую площадь поверхности КА и ионизационные датчики, которые обладают наибольшей чувствительностью к регистрации микронных частиц. Также ионизационный метод используется для изготовления времяпролетных масс-спектрометров.

Критерии, которые используют для выбора аппаратной реализации:

- 1) чувствительность: способность регистрировать частицы с минимально значимой массой/энергией;
- 2) точность: возможность измерить нужные параметры (скорость, направление) с требуемой погрешностью;
- 3) надежность и живучесть в условиях космического пространства;
- 4) массо-габаритные характеристики и энергопотребление;

5) способность контролировать большую площадь для эффективного мониторинга.

При выборе реализации конструкции аппаратуры на основе проведенной оценки рассматриваются несколько альтернативных путей (таблица 1.7).

Таблица 1.7 -Критерии выбора варианта реализации аппаратуры

Критерий выбора	Вариант 1. (Высокорисковый)	Вариант 2. (Сбалансированный)	Вариант 3. (Низкорисковый)
Элементная база	Новейшие высокопроизводительные компоненты	Проверенные, возможно, менее производительные, но доступные компоненты.	Использование промышленных (industrial) компонентов с обоснованием их применимости в данной миссии (например, для КА с коротким сроком службы или для научных миссий).
Конструктив	Сложная, высокоинтегрированная плата с компонентами в миниатюрных корпусах.	Модульная конструкция: несколько плат проще в отладке и замене.	Упрощенная конструкция на основе проверенных решений, возможно, с большими массогабаритными показателями.
Сроки и риск	Высокий риск срыва сроков из-за долгих поставок компонентов и сложности отладки.	Умеренный риск. Сроки поставки ключевых компонентов известны и приемлемы.	Минимальный риск. Комплектующие есть в наличии или поставляются быстро. Технологии хорошо освоены.
Результат	Максимальное соответствие ТЗ	Соответствие ТЗ по ключевым	Гарантированное создание

Критерий выбора	Вариант 1. (Высокорисковый)	Вариант 2. (Сбалансированный)	Вариант 3. (Низкорисковый)
	(или даже превышение), если уложиться в сроки.	параметрам с некоторыми допущениями.	работоспособного прибора в срок, но, возможно, с ухудшенными характеристиками (меньшая чувствительность, скорость и т.д.).

После выбора первичного преобразователя необходимо определить способ обработки и передачи информации. При пересылки полного пакета собранных данных увеличивается объем телеметрии, но при этом снижается риск некорректной обработки данных и есть возможность изменить (модифицировать) алгоритмы их анализа уже на земле. Если аппаратура является возвращаемой на землю, то в телеметрическом пакете содержится как правило ограниченный объем информации, а более полная информация содержится во внутренней памяти прибора.

Возможно три варианта: передача полного пакета сырых данных, обработка данных на борту с передачей результатов, гибридный подход.

Вариант №1 (передача полного пакета сырых данных). Прибор выступает как "осциллограф" в космосе. Он оцифровывает сигнал с первичного преобразователя (например, форму импульса с пьезодатчика или масс-спектр с ионизационного детектора) и передает этот массив данных на землю без существенной обработки.

Преимущества:

1) Снижение риска некорректной обработки: алгоритмы обработки могут быть чрезвычайно сложными, а мощность процессора для бортовых комплексов как правило ограничена, что связано с вопросами надежности и энергопотребления. На земле, в лабораторных условиях, где нет ограничений по вычислительной мощности, можно применить более совершенные и даже исправленные постфактум алгоритмы.

2) Гибкость и возможность ретроспективного анализа: у ученых появляется возможность по-новому взглянуть на научные данные, применяя новые методы анализа, чтобы найти следы редких событий, которые старый алгоритм пропускал.

3) Для бортовой реализации прибора используется относительно простой по сложности код, в котором вероятность ошибки снижается.

Недостатки:

1) Очень высокий объем телеметрии. Выделенной скорости канала передачи данных может не хватить для передачи всего объема телеметрии.

2) Высокие требования к бортовой памяти: данные нужно где-то буферизовать до момента сеанса связи с Землей.

Данный метод применяется для уникальных научных экспериментов, где важна каждая деталь либо на этапе лётно-конструкторских испытаний прибора, когда нужно проверить и откалибровать используемые аппаратные и программные методы.

Вариант 2 (обработка данных на борту с последующей передачей результатов). В данном варианте бортовой процессор прибора выполняет первичную обработку: определяет факт события, его основные параметры (амплитуду, время, длительность, спектральные характеристики) и формирует компактный телеметрический пакет с уже готовыми результатами. Например, ионизационный импульс, записанный на МК «АИСТ» с помощью датчиков МТ имеет размер 2 килобайта. Обработанные же данные: время события, координата, расчетный импульс/энергия – порядка 20 байт. Сокращение объема информации в 100 раз.

Преимущества:

1) Кардинальное снижение объема телеметрии, что позволяет работать с очень низкоскоростными каналами связи.

2) Оперативность: на Землю сразу поступает готовая к использованию информация (например, "зафиксирован удар энергией X в точке Y").

Недостатки:

1) Риск потери данных: ошибка в программном обеспечении (ПО) (используемом алгоритме) может отбраковать реальное событие как шум или некорректно рассчитать его параметры.

2) Сложность и риск ошибок в бортовом ПО: требуется тщательная наземная отработка алгоритмов.

3) Невозможность ретроспективного анализа: данные, отброшенные на борту, утеряны навсегда.

Данный метод применяется:

- Для серийных или инженерных систем (например, постоянный мониторинг ударов на МКС), где статистика важнее деталей каждого события.

-Для миссий с крайне ограниченной пропускной способностью канала (дальний космос).

-Когда прибор должен оперативно реагировать на события (например, запускать другие приборы для детального изучения физических явлений).

Вариант 3 (Гибридный подход). Это компромиссное решение между первыми двумя вариантами. Для штатных событий передаются только обработанные данные (вариант 2). Для нештатных или особо интересных событий: (например, удар с энергией выше порога) вместе с результатами обработки передается и небольшой фрагмент "сырых" данных для верификации на Земле. При этом прибор ведет полную запись "сырых" данных во внутреннюю энергонезависимую память (flash-накопитель), и при запросе с Земли эти данные пересылаются целиком. Для возвращаемой аппаратуры, например, для МКС и аппаратов типа "БИОН", в телеметрию передается лишь малая часть данных (основные счетчики событий, служебная информация о состоянии прибора). Полный объем данных считывается непосредственно с прибора после возвращения космического аппарата на Землю. Этот метод обеспечивает максимально возможное качество и объем данных, но применим только для очень редких и дорогих миссий (возвращаемые спускаемые аппараты).

#### **1.4 Экспериментальное исследование физических эффектов при высокоскоростном соударении**

С помощью экспериментальной установки, разработанной в Институте космического приборостроения Самарского университета, были проведены исследования одновременно трех физических эффектов: ионизации, электростатической индукции и фотоэффекта при высокоскоростном ударе (вспышка) [139\*]. Схема эксперимента приведена на рисунке 1.21. Электродинамический ускоритель способен облучать мишень одиночными частицами с контролем их скорости и массы, что позволяет производить тарировку датчиков высокоскоростных микрочастиц. Более подробная методика разгона частиц рассмотрена в работе [34].

В экспериментах использовались частицы алюминия размерами от 0,5 мкм до 2 мкм. В качестве мишени испытывалось кварцевое оптическое стекло. При ударе по стеклу наблюдается процесс ионообразования, который регистрировался с помощью с приемника ионов в виде собирающих электродов, представляющего собой двухфазную решетку (рисунок 1.22), также наблюдалась световая вспышка, которую фиксировали с помощью ФЭУ-102. На рисунке 1.22 более детально показана схема измерения ионов, образованных

при высокоскоростном соударении частиц с мишенью. Площадь приемника составляла 100 см<sup>2</sup>. Выходы операционных усилителей соединены с осциллографом. Примеры осциллограмм представлены на рисунке 1.23.

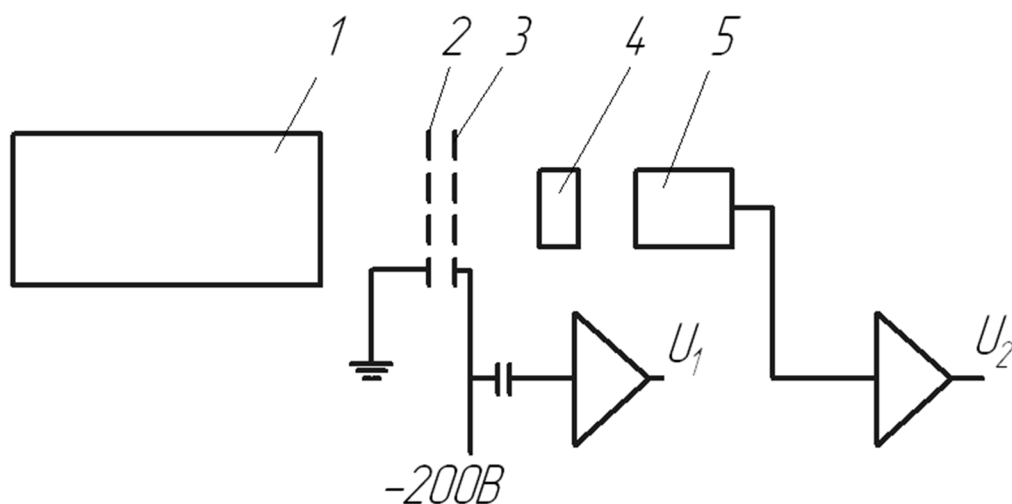
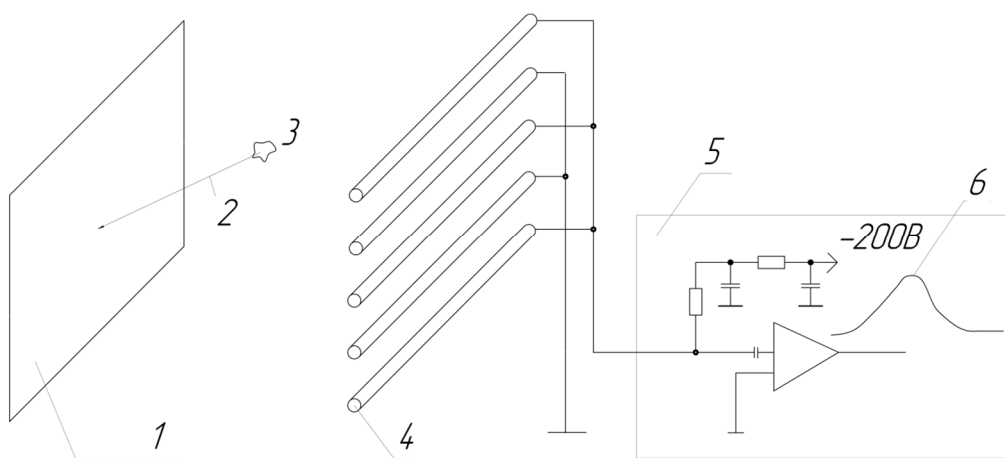
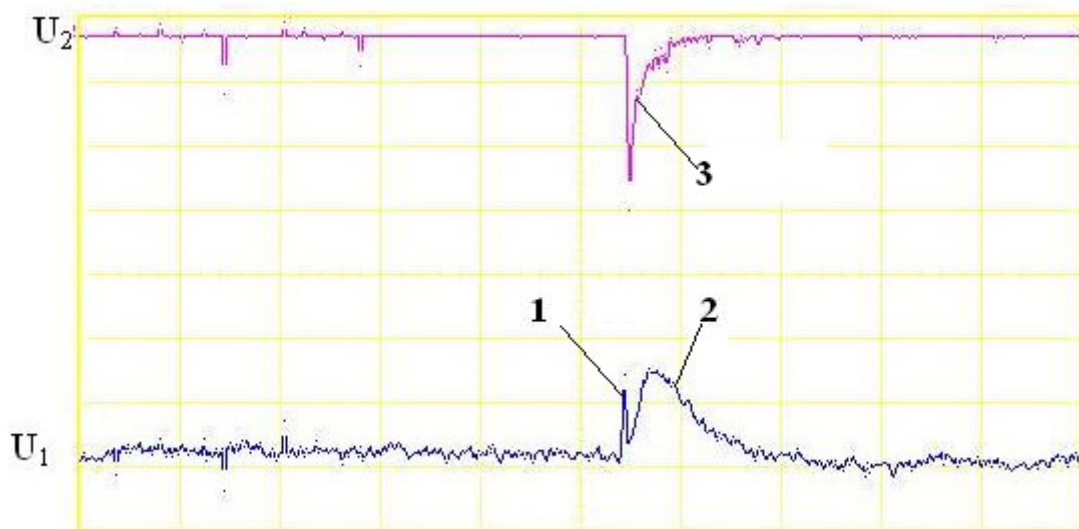


Рисунок 1.21 – Схема проведения эксперимента: 1 – электростатический ускоритель; 2 –земляная сетка; 3 – собирающие электроды; 4 –образец стекла; 5 – ФЭУ – 102; U<sub>1</sub> – напряжения на выходе усилителя с собирающих электродов; U<sub>2</sub> – напряжения на выходе усилителя с ФЭУ



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

Рисунок 1.22 - Блок – схема ионизационного датчика



1-наведенный импульс, 2 – ионизационный импульс, 3-вспышка от удара  
 Рисунок 1.23– Осциллограммы:  $U_2$  - сигнал с ФЭУ;  $U_1$  .сигнал с ионизационного датчика

Принцип измерения следующий: микрочастица 3 (рисунок 1.22) с высокой скоростью ударяется в мишень 1, при этом происходит образование положительно заряженных ионов и электронов в зоне контакта микрочастицы и мишени. В результате влияния электрического поля положительно заряженные ионы летят в сторону измерительных электродов 4, с которых сигнал снимается с помощью зарядочувствительного усилителя.

Для разгона в электродинамическом ускорителе частица в инжекторе заряжается положительно, поэтому при пролете ее через измерительные электроды на них наводится заряд (1 на рисунке 1.23). В результате полета микрометеороидов и частиц космического мусора в космосе они тоже заряжаются до некоторого потенциала. Таким образом, импульс с ионизационного датчика  $U_1$  (2 на рисунке 1.23) имеет две составляющие 1 - наведенный импульс от заряда на частице и 2 – ионизационный импульс от ионов, собранных приемником ионов.

Импульс амплитуды  $U_2$  с ФЭУ (рисунок 1.23) имеет вид перевернутого треугольника, с очень коротким передним фронтом и достаточно длинным задним.

При этом длительность наведенного заряда составляет порядка 10-70 мкс, длительность ионизационного импульса порядка 150-600 мкс. Эксперименты для испытания таких детекторов проводят на ускорителях частиц [34]. В процессе эксперимента было замечено, что многие частицы с относительно небольшими скоростями наводили большой по амплитуде заряд на электроды. Это в первую очередь связано с тем,

что эти частицы обладали большой массой, а значит заряжались в инжекторе до большего значения.

Суммарный заряд ионов при высокоскоростном соударении твердых тел определяется в соответствии с известным параметрическим выражением [229]:

$$Q^+ = c \cdot m^\alpha \cdot V^\beta,$$

где  $c$  – коэффициент пропорциональности,  $\alpha$ ,  $\beta$  – коэффициенты, полученные экспериментальным путем, заряд  $Q^+$  пропорционален площади под кривой 2 (рисунок 1.36).

Согласно экспериментальным данным, приведенным в работах [2, 230] интенсивность света  $I$  и общая световая энергия  $E$  связаны с массой  $m$  и скоростью  $V$  исследуемой частицы следующими соотношениями:

$$I = c_1 \cdot m \cdot V^{4.1}, E = c_2 \cdot m \cdot V^{3.2}.$$

Существующие экспериментальные зависимости имеют большой разброс данных в связи с выходом фотонов при разряде с заряженной частицы на мишень. В работе [2] показана связь между параметрами высокоскоростных частиц и общей световой энергией, интенсивностью света:

$$I \sim V^4, E \sim V^3.$$

### **Обработка полученных результатов**

Важным параметром для детектора высокоскоростных частиц является зависимость длительности наведенного в приемнике импульса от скорости частицы (рисунок 1.24). На основе полученных данных можно оценить скорость ударяющей частицы, причем длительность наведенного в приемнике импульса (электростатическая индукция) не зависит от массы. Отклонение экспериментальных данных связано с погрешностью измерения длительности импульса.

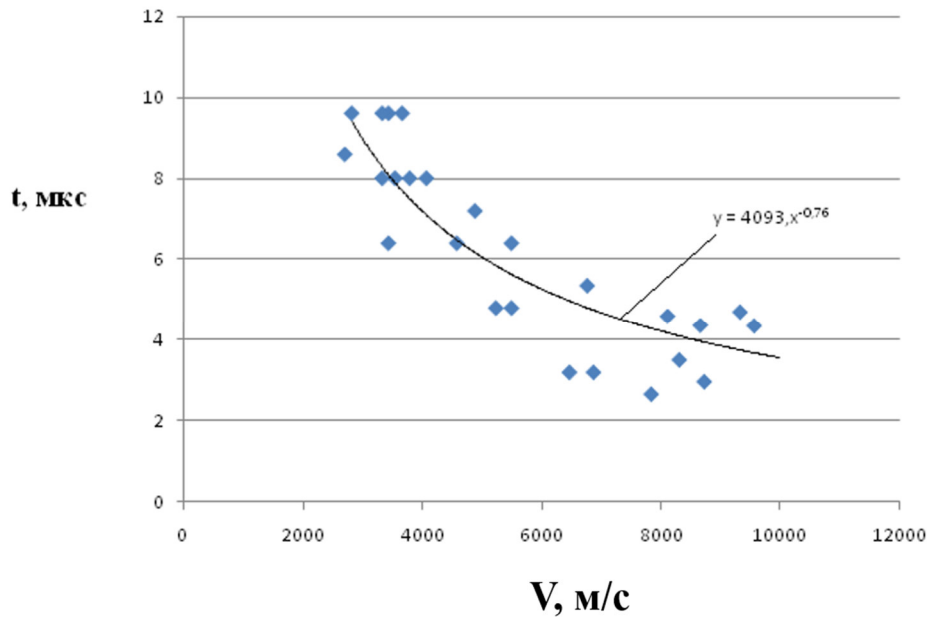


Рисунок 1.24 - Зависимость длительности наведенного импульса от скорости частицы

График представленный на рисунке 1.25 по исследованию зависимость заряда ионов соответствует теоретическим результатам, приведенным в работах [2, 229].

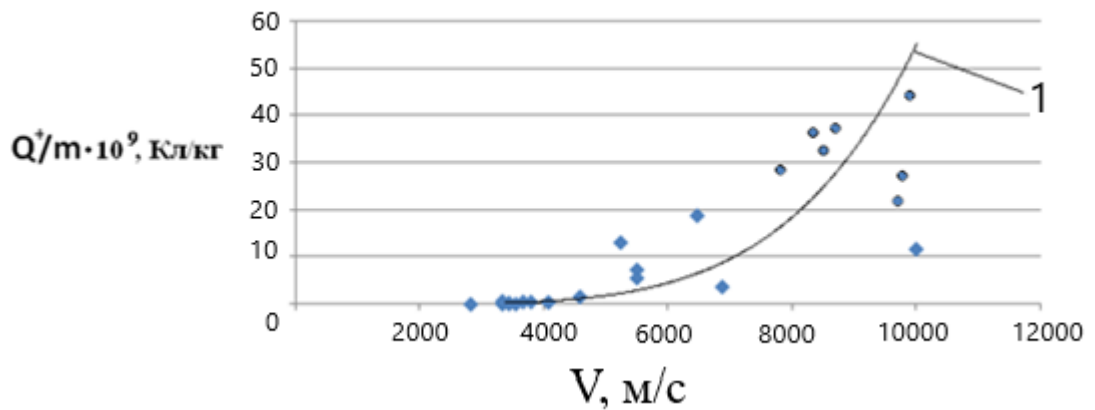


Рисунок 1.25– Зависимость заряда ионов, отнесенного к массе частицы, от ее скорости: 1 -  $y = 2 \cdot 10^{-18} \cdot x^{4.882}$

Кинетическая энергия частицы при высокоскоростном ударе тратится на процессы ионообразования, светового излучения, разрушения материала [2]. Как показал эксперимент, взаимосвязь энергии вспышки и кинетической энергии частицы имеет неоднозначную зависимость (рисунок 1.26). Это связано с тем, параметры вспышки зависят от формы ударника, которая не контролируется в процесс проведения эксперимента. Было принято допущение, что все частицы имеют сферическую форму.

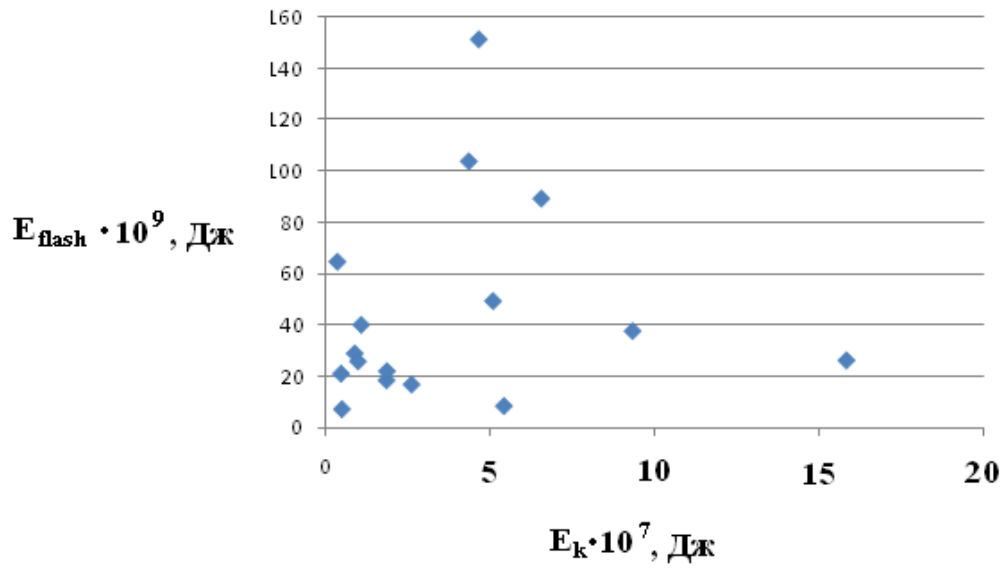


Рисунок 1.26 - Зависимость полной световой энергии вспышки от кинетической энергии частицы

Получены зависимости амплитуды ионизационного импульса и амплитуды вспышки от скорости (рисунки 1.27, 1.28).

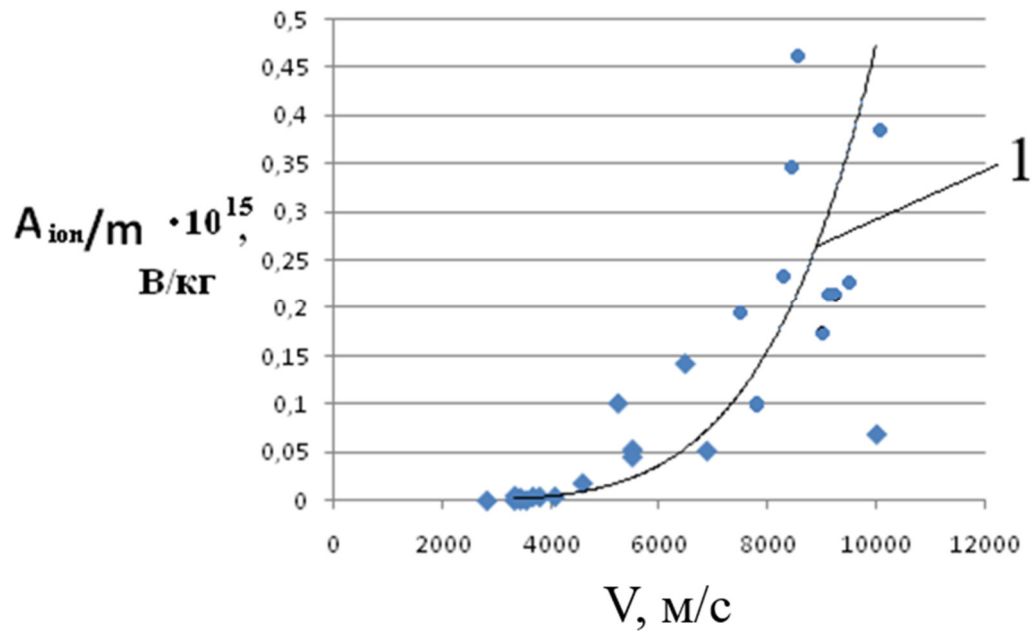


Рисунок 1.27 – Зависимость амплитуды ионизационного импульса, отнесенного к массе ударника, от его скорости: 1 -  $y = 6 \cdot 10^{-21} \cdot x^{4,971}$

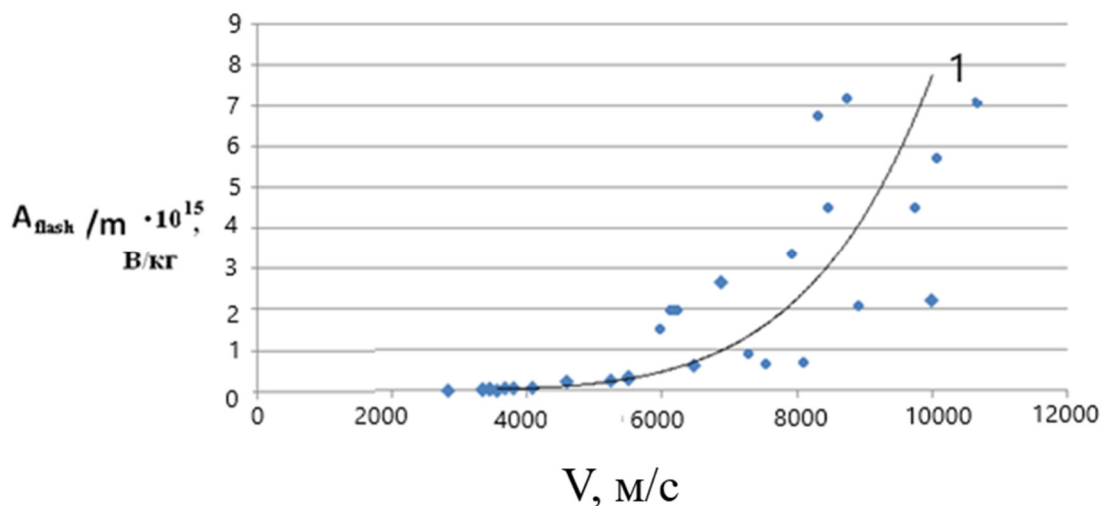


Рисунок 1.28 - Зависимость амплитуды вспышки, отнесенной к массе ударника, от

скорости частицы: 1 -  $y = 7 \cdot 10^{-22} \cdot x^{5,517}$

При рассмотрении зависимостей  $A_{\text{всп}} = f(W)$  и  $A_{\text{ион}} = f(W)$  следует учитывать следующее. С увеличением скорости частиц модель образования ионов при ударе переходит из поверхностной в объемную ионизацию, которые описываются соответствующими зависимостями [2]. Кроме того, на экспериментальные результаты влияет заряд частицы на мишень [229]. То же самое касается и влияния заряда частицы на образование фотонов.

Также на результаты влияет форма частицы, которая при проведении эксперимента различна. Представленные зависимости на качественном уровне хорошо согласуются с теорией.

Анализ сигнала вспышки в диапазоне скоростей 1÷5 км/с затруднен из-за короткого переднего фронта импульса и зашумленности сигнала, вызванного электромагнитными процессами, происходящими в ускорителе микрочастиц. Поэтому был предложен метод анализ в частотной области. На рисунке 1.29 приведены спектры сигналов вспышки, рассчитанные с помощью быстрого преобразования Фурье (БПФ), для трех значений скоростей частиц.

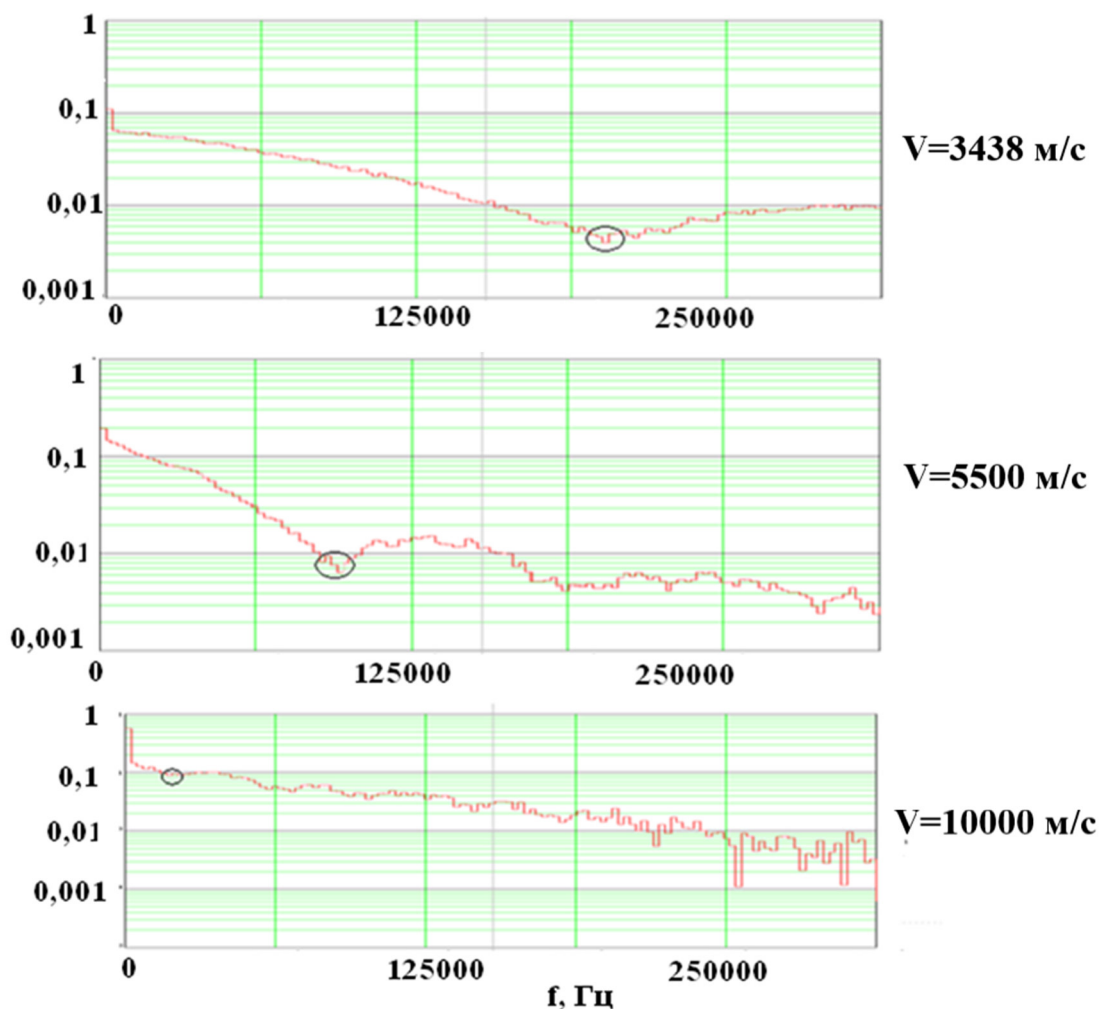


Рисунок 1.29 – Спектры вспышки при различных скоростях ударника.

#### Анализ полученных данных

1. Проведенные исследования показали, что зависимость длительности наведенного импульса линейно зависит от скорости частицы.
2. По измеренным амплитудам вспышки, ионизационного импульса и длительности наведенного заряда можно оценить параметры ударяющей частицы (скорость, размер и плотность) с большей достоверностью и точностью.
3. Увеличение скорости частицы приводит к увеличению количества образовавшихся ионов и фотонов в соответствии с экспериментальными зависимостями.
4. Анализ сигнала вспышки, проводимый в частотной области с помощью БПФ, позволяет увеличить качество информации о параметрах частицы. В спектре сигнала граничная частота переднего лепестка зависит от скорости частицы.
5. На процессы образования ионов и фотонов значительное влияние оказывает форма частиц и их заряды.

Для улучшения качества информации, особенно при высоких скоростях (1–5 км/с), где сигнал зашумлен и имеет короткий фронт, применяется анализ в частотной области.

Метод многофакторного контроля состоит из следующих шагов:

- 1) К сигналу световой вспышки применяется быстрое преобразование Фурье (БПФ).
- 2) В спектре выделяется характерная точка — граничная частота первого лепестка).
- 3) Обнаружение корреляции — с увеличением скорости частицы граничная частота смещается влево (в область более низких частот). Это позволяет использовать частотный анализ для оценки скорости частиц в условиях сильных электромагнитных помех от ускорителя.

В результате математическая обработка данных с многопараметрического детектора строится на комплексном анализе временных и спектральных характеристик:

- длительность наведенного импульса → оценка скорости (линейная зависимость);
- заряд ионов → оценка массы (степенная зависимость от  $m$  и  $Q$ );
- амплитуда/энергия вспышки → оценка кинетической энергии;
- спектр сигнала вспышки (БПФ) → уточнение скорости при высоких скоростях и помехах.

Такой подход позволяет с большей достоверностью и точностью определять скорость, размер и плотность микрочастиц по сравнению с однопараметрическими методами. В работах [231\*, 232, 233\*] также приведены различные конструкции по проведению многофакторных измерений высокоскоростного соударения.

### **1.5 Методика регистрации высокоскоростных микрочастиц на основе использования металлических полосков**

Датчики микрометеороидов и частиц космического мусора пленочного исполнения отличаются небольшими размерами, в связи с этим их удобно монтировать на космические аппараты типа CubeSat. Известно несколько датчиков подобного типа. Например, датчики на основе регистрации теплового потока [234], пьезоэлектрические датчики [235], на основе углеродных нанотрубок [236], тензометрические датчики [237] и датчики на основе пленочных (печатных) проводников [214, 222, 237]. В работах [238\*, 239\*, 240] описаны конструкции на основе использования трехслойных структур металл-диэлектрик-металл (МДМ). В работе [241] предлагается использовать TDR метод (Time Domain Reflectometry -рефлектометрия во временной области). В работе [242] предлагается использовать микрополосковые конструкции для анализа осаждения материалов на поверхность

пленочного датчика в виде полосового СВЧ-фильтра. В работе [243] рассмотрена датчик в виде штыревой конструкции.

В работе [214] рассмотрен датчик микрочастиц, представляющий собой квадратную печатную плату (PCB) с длиной стороны 90 мм и массой 30г (рисунок 1.30). На передней панели расположены 128 медных полосок, образующих зону регистрации. Ширина каждой полоски составляет 127 мкм, а расстояние между двумя линиями составляет 190 мкм. На задней стороне размещены электронные компоненты: четыре 32-канальных мультиплексора и микроконтроллер. В датчике на один вход металлических полосок подается постоянное напряжение, со второго входа металлических полосок контролируется напряжение с помощью микроконтроллера. Для регистрации удара микрочастицы необходимо, чтобы хотя бы одна металлическая полоска была разорвана. При разрушение металлического полоска, вызванного образованием кратера от высокоскоростного соударения микрометеороидов или частиц космического мусора с чувствительной поверхностью датчика, сигнал на выходе разрушенного полоска пропадает.

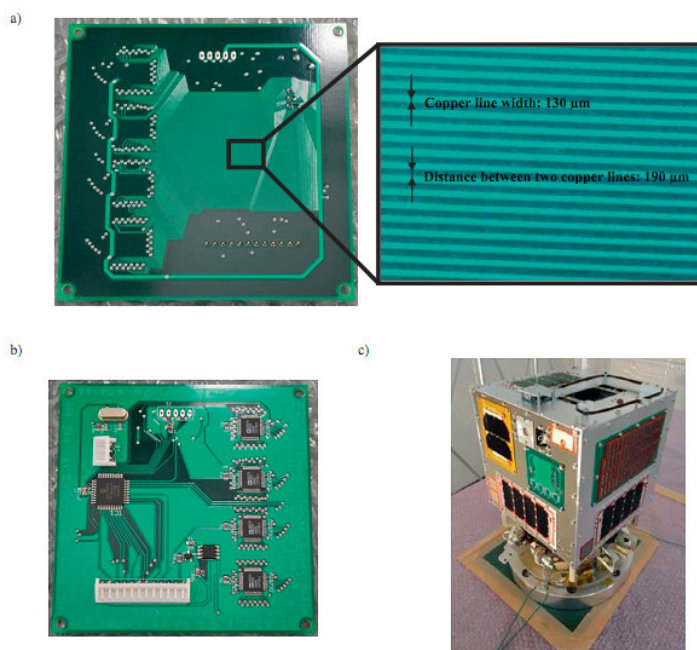


Рисунок 1.30 – Детектор пылевых частиц: а) Передняя панель с 128 медными линиями, подвергшимися воздействию космической среды; б) Задняя сторона детектора с электронными компонентами для контроля состояния каждой линии; в) Фотография спутника с установленным на него детектором; г) фотография спутника

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.

Соискателем предлагается производить оценку состояния металлического полоска с использованием частотного анализа, который позволяет избавиться от использования в аппаратной реализации большого количества мультиплексоров, а также дает возможность определять место места разрыв полоска, вызванного образованием кратера [245\*, 246\*].

### Описание модели

Для моделирования изменения коэффициента передачи датчика высокоскоростных микрочастиц на основ плёночных металлических полосков были использованы T и S матриц. Использование S параметров обусловлено тем, что их можно достаточно легко измерить с помощью векторного анализатора цепей либо промоделировать с помощью специализированных САПР (например, Microwave Office). В качестве аналитического описания радиотехнических параметров металлических полосок на диэлектрике предлагается использовать модель микрополосковой линии передач (рисунок 1.31).

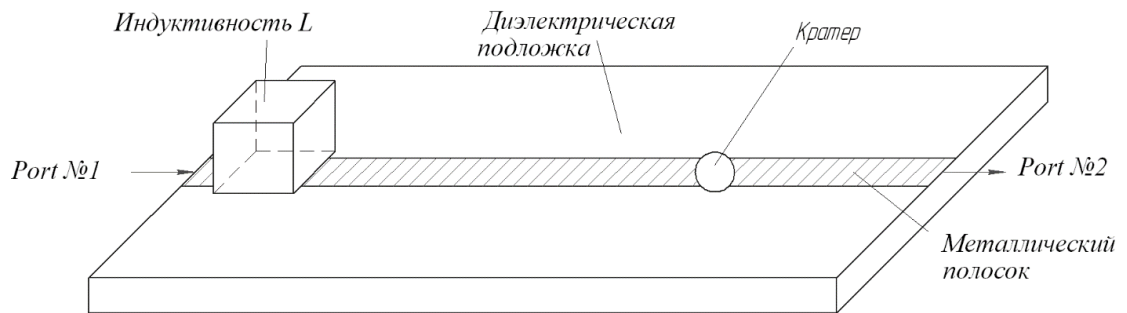


Рисунок 1.31 – Конструкция пленочного металлического полоска, разорванного ударом высокоскоростной микрочастицы

Принцип работы датчика следующий. При ударе высокоскоростной микрочастицы (микрометеороида или частицы космического мусора) в металлический полосок происходит образование кратера, приводящего к разрыву этого металлического полоска. Размеры образовавшегося кратера можно оценить согласно эмпирическим моделям представленным в научных публикациях. Например, модель Kineke, связывающая геометрические размеры кратера и параметры высокоскоростной микрочастицы, описывается следующим выражением [113]:

$$D/d = K_1 \cdot \rho_p^{0,333} \cdot V^{0,667},$$

где  $K_1$  - коэффициент, зависящий от материалов металлического полоска и микрочастицы,  $D$  – диаметр кратера в [см],  $d$  – диаметр микрочастицы [см],  $\rho_p$  - плотность ударяющей микрочастицы в [г / см<sup>3</sup>],  $V$  - скорость микрочастицы [км / с].

Разрыв металлического полоска приводит к образованию электрической емкости, последовательно подключенной к металлическому полоску (рисунок 1.32), рассчитать которую можно с использованием модели компланарного конденсатора на основе микрополосковой линии [247]:

$$C_{cr} = \begin{cases} \frac{\varepsilon_r'}{120 \cdot c \cdot \ln\left(2 \cdot \frac{1 + \sqrt{k}}{1 - \sqrt{k}}\right)}, \text{ при } \frac{1}{\sqrt{2}} \leq k \leq 1 \\ \frac{\varepsilon_r' \cdot \ln\left(2 \cdot \frac{1 + \sqrt{k'}}{1 - \sqrt{k'}}\right)}{377\pi \cdot c}, \text{ при } 0 \leq k \leq \frac{1}{\sqrt{2}} \end{cases}$$

$$k = \frac{s}{s + w}, k' = \sqrt{1 - k^2},$$

$$\varepsilon_r' = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} \cdot [\tanh(0,775 \cdot \ln(h/w) + 1,75) + bp]$$

$$bp = \frac{k \cdot w}{h} (0,04 - 0,7k + 0,01 \cdot (1 - 0,1\varepsilon_r)(0,25 + k))$$

где  $s$ - ширина разрыва металлического полоска, равная диаметру кратера от высокоскоростного соударения,  $\varepsilon_r$ - диэлектрическая проницаемость,  $h$ - высота диэлектрической подложки,  $c$  – скорость света,  $w$  - ширина металлического полоска.

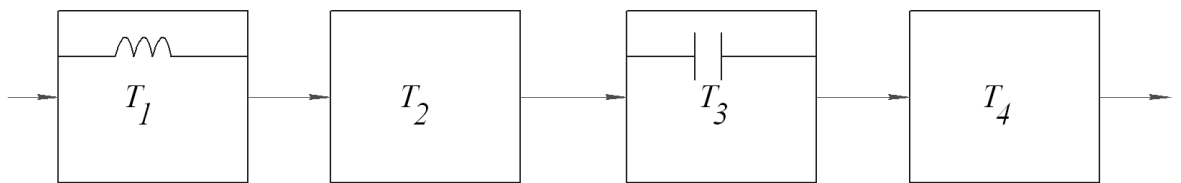


Рисунок 1.32 – Каскадное соединение элементов металлического полоска:

$T_1, T_2, T_3, T_4$  - матрицы передач

Матрицу передачи всего металлического полоска рассчитаем согласно выражениям [248, 249]:

$$T = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4, \quad T_1 = \begin{vmatrix} \frac{2 + Z_1}{2} & -\frac{Z_1}{2} \\ \frac{Z_1}{2} & \frac{2 - Z_1}{2} \end{vmatrix}, \quad T_2 = \begin{vmatrix} e^{i\theta_1} & 0 \\ 0 & e^{-i\theta_1} \end{vmatrix},$$

$$T_3 = \begin{vmatrix} \frac{2 + Z_2}{2} & -\frac{Z_2}{2} \\ \frac{Z_2}{2} & \frac{2 - Z_2}{2} \end{vmatrix}, \quad T_4 = \begin{vmatrix} e^{i\theta_4} & 0 \\ 0 & e^{-i\theta_4} \end{vmatrix},$$

где  $Z_1 = \frac{i \cdot \omega \cdot L}{Z_0}$ ,  $Z_2 = \frac{1}{Z_0} \cdot \frac{1}{i \cdot \omega \cdot C_{cr}}$ ,  $i$  - мнимая единица,  $L$  - индуктивность,

$\omega = 2\pi f$  - круговая частота,  $Z_0 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}$  - волновое сопротивление,  $L_1$  - погонная

индуктивность,  $C_1$  - погонная ёмкость микрополосковой линии [113],  $\theta_1 = \frac{2\pi}{\Lambda} \cdot l_1$ ,  $\theta_2 = \frac{2\pi}{\Lambda} \cdot l_2$ ,

$\Lambda = \frac{c}{f \cdot \sqrt{\varepsilon}}$ ,  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость среды (в данной работе взята как постоянная,

но в работе [248] отмечено, что данная величина также зависит от частоты).

Коэффициент передачи со входа на выход можно рассчитать согласно выражению [248]:

$$S_{21} = 1/T_{22}.$$

Результаты моделирования влияния места разрыва металлического полоска на коэффициент передачи представлена на рисунках 1.33, 1.34. Для моделирования была взята катушки номиналом 150 мкГн, толщина слоя диэлектрика 1 мм, ширина полоска 100 мкм, длина металлического полоска составила 20 см, диаметр кратера 100 мкм.

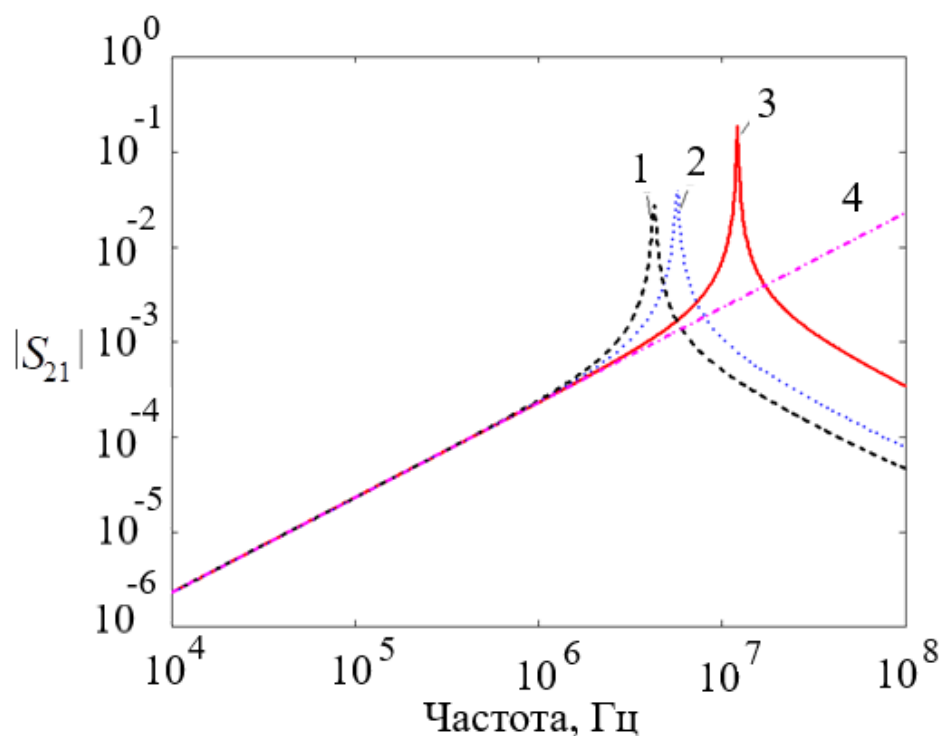


Рисунок 1.33 –Результаты моделирования модуля коэффициента передачи: 1 – случая, когда емкость расположена на расстоянии  $0,1L$  от индуктивности ( $L$  – общая длина полоска), 2- на расстоянии  $0,5L$  от индуктивности; 3- на расстоянии  $0,9L$  от индуктивности; 4 – отсутствии индуктивности при компланарной емкости, расположенной на расстоянии  $0,5L$

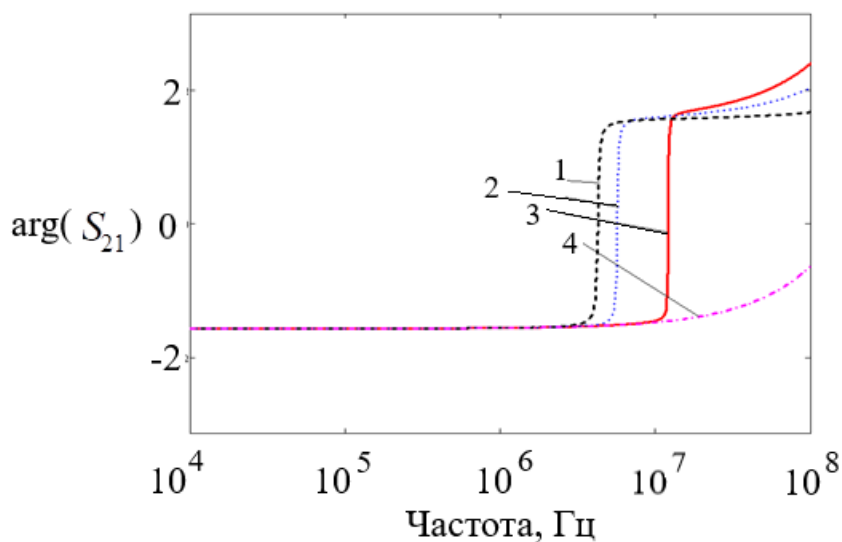
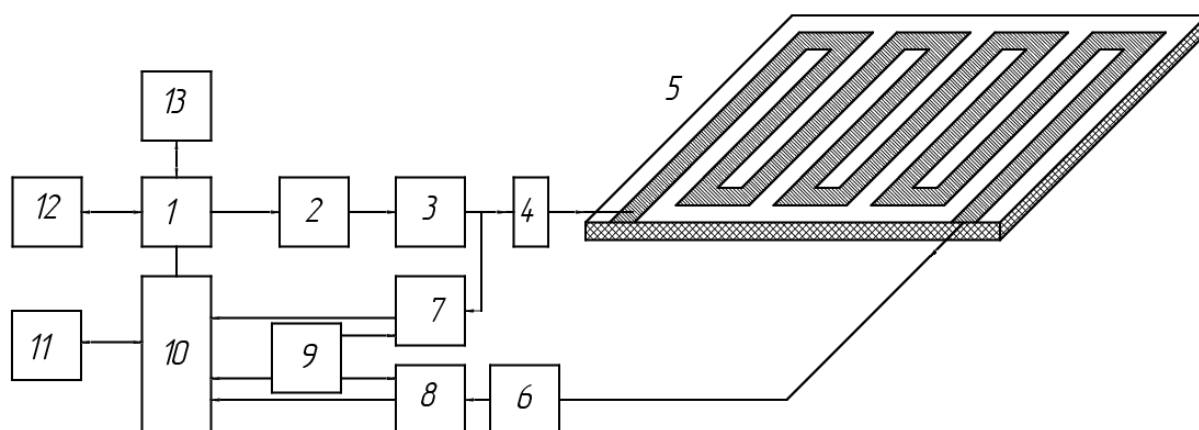


Рисунок 1.34–Результаты моделирования аргумента коэффициента передачи: 1 – случая, когда емкость расположена на расстоянии  $0,1L$  от индуктивности ( $L$  – общая длина полоска), 2- на расстоянии  $0,5L$  от индуктивности; 3- на расстоянии  $0,9L$  от индуктивности; 4 – отсутствии индуктивности при компланарной емкости, расположенной на расстоянии  $0,5L$

Согласно результатам, представленным на рисунках 1.33, 1.34, резонансная частота коэффициента передачи составляет несколько десятков МГц, при этом она зависит от места расположения обрыва. Для того, чтобы сместить резонансную частоту в область низких частот, необходимо увеличивать номинал индуктивности, что является нежелательным при аппаратной реализации.

На рисунке 1.35 показана структурная схема датчика микрометеороидов и частиц космического мусора, которая может быть использована для реализации предложенного метода регистрации микрочастиц. Микроконтроллер 1 подает код на вход управляемого генератора 2, на выходе которого формируется гармонический сигнал заданной частоты. Далее гармонический сигнал через согласующий усилитель 3 подается на индуктивность 4. Сигнал с выхода металлического полоска поступает на вход усилителя 6, где сигнал усиливается и далее переводится из аналоговой в цифровой код с помощью АЦП №2. Тактовый генератор 9 генерирует прямоугольные периодические импульсы, которые необходимы для работы АЦП №1, №2 и программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС). ПЛИС производит вычисления коэффициента передачи на заданной частоте, путем сравнения сигналов с АЦП №1 и АЦП №2. Полученная информация передается в микроконтроллер 1, который сохраняет полученные данные и передает при необходимости через интерфейс обмена с бортовым компьютером 12 и интерфейс обмена с контрольно-проверочной аппаратурой 13. Оперативное запоминающее устройство 11 необходимо для предварительного хранения информации, которую обрабатывает ПЛИС. После проведения измерения на одной частоте микроконтроллер подает код о повышении частоты, на которой производится частотный анализ, управляемому генератору 2 с шагом  $\Delta \omega_i$  (шаг изменения частоты). Далее происходит процедура измерения коэффициента передачи на новой частоте. Операция повторяется до тех пор пока не пройдут измерения в диапазоне от низкой частоты  $\omega_0$  до высокой частоты  $\omega_N$  с шагом  $\Delta \omega_i$ . Низкая частота  $\omega_0$ , высокая частота  $\omega_N$  и шаг изменения частоты  $\Delta \omega_i$  задаются изначально пользователем устройства. Частоту резонанса же можно рассчитать путем обработки данных о коэффициенте передачи на нескольких частотах согласно методам обработки (двухчастотный, четырехчастотный и т.д.), изложенным в работах [250, 251].



1 - микроконтроллер, 2 - управляемый генератор, 3 - согласующий усилитель, 4 - индуктивность, 5 – изогнутый металлический полосок, 6 усилитель, 7 – АЦП №1, 8 – АЦП №2, 9 - тактовый генератор, 10 – программируемая логическая интегральная схема (ПЛИС), 11 - оперативно-запоминающее устройство, 12 - интерфейс обмена с бортовым компьютером, 13 - интерфейс обмена с контрольно-поверочной аппаратурой

Рисунок 1.35 – Структурная схема датчика:

Для того, чтобы заменить параллельные металлические полоски, показанные на рисунке 1.30, на один полосок, необходимо этот металлический полосок изогнуть, как показано на рисунке 1.35. При этом возникает паразитная емкостная связь между рядом расположенными металлическими полосками.

Использование частотного метода измерения в датчиках микрочастиц позволит в перспективе определить места разрыва микрополоска без использования большого количества мультиплексоров, что значительно сокращает массу и габариту датчиков. Расположение частотного резонанса располагается в области от 4 до 30 МГц, позволяет не использовать высокочастотную электронику. При моделировании было обнаружено, что зависимость частотного резонанса коэффициента передачи от диаметра кратера не так велика от индуктивности, что связано скорее всего с малой емкостью образовавшегося компланарного конденсатора, включенной последовательно, и влиянием распределённой емкости и индуктивности длинной линии. Моделирование с учетом потерь в металлических полосках и диэлектрике показали, что значение коэффициент передачи по амплитуде уменьшается процентов на 10 относительно идеальной линии передач без потерь.

## 1.6 Экспериментальное исследование прототипов датчика микрометеороидов и частиц космического мусора на основе пленочных структур

### 1.6.1. Датчик в виде линии передач

В качестве чувствительного элемента для детектирования факта удара высокоскоростной микрочастицы соискателем было предложено использовать металлическую полоску (дорожку), расположенную на диэлектрическом основании, при этом диэлектрическая подложка с другой стороны металлизирована (рисунок 1.36). Для проведения экспериментов была изготовлен опытный образец датчика, при этом в качестве материала был использован стеклотекстолит СФ-2-50Г-1.5 мм, ширина металлических дорожек составила 0,3 мм с расстоянием между ними 0,8 мм [245\*, 252\*].

В следствии удара высокоскоростной микрочастицы с поверхностью мишени образуется кратер, размеры которого связаны с параметрами этой микрочастицы (массой, скоростью, размерами) [113]. Образовавшийся кратер приводит к разрыву металлических полосок, что и контролируется обычно в датчиках на основе металлических пленок [222, 246\*]. В данном исследовании разрыв проводника был осуществлен механически лезвием скальпеля.

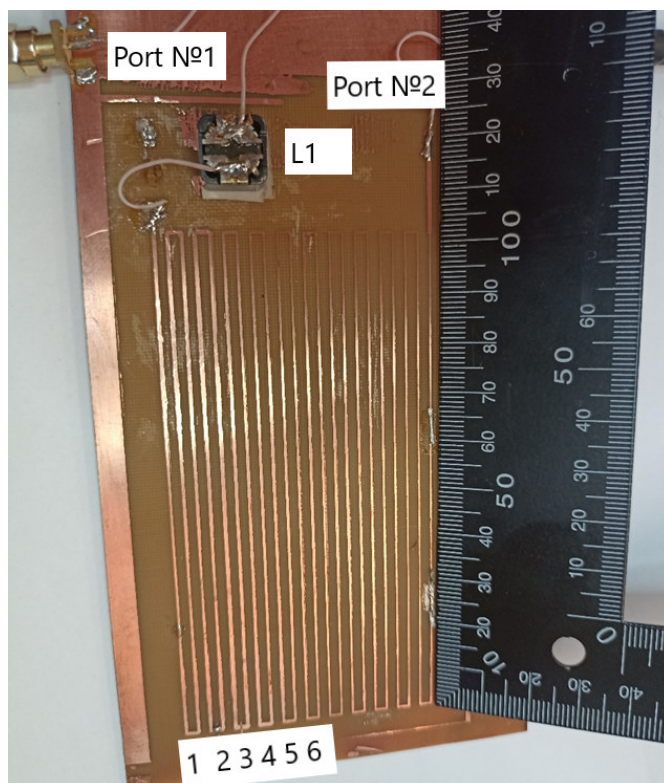


Рисунок 1.36 – Фотография экспериментального прототипа датчика: Port№1 и Port№2 -порты подключения спектроанализатора; L1=150 мкГн – дискретная индуктивность; 1, 2, 3, 4, 5, 6 - номера позиций, которые разрушались механически путем разрезания

В работе [246\*] для математического описания коэффициента передачи металлического полоска было предложено использовать S и T матрицы передачи каскадного соединённых четырехполюсников, при этом для определения элементов матриц использовалась модель микрополосковой линии передач. При отсутствии разрушения металлического полоска, эквивалентная схема чувствительного элемента датчика выглядит так, как представлено на рисунке 1.37. При этом в данной схеме не учитывается отсутствие согласования сопротивлений линии передачи металлического полоска (порядка 130 Ом) и спектроанализатора (50 Ом).

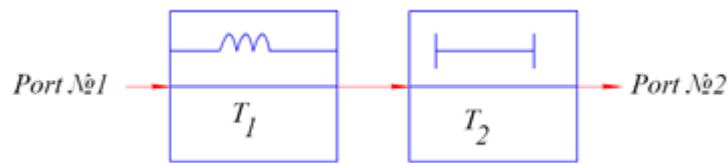


Рисунок 1.37 – Эквивалентная схема металлического полоска без разрушения: T1 – матрица передачи последовательно включенной индуктивности, T2 – матрица передачи металлического полоска без повреждений длиной l

С учетом отсутствия согласования сопротивлений матрицу передачи можно рассчитать согласно выражению:

$$T = T_{01} \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot T_{10},$$

где  $T_1, T_2$  - матрицы передач согласно рисунок 1.70,  $T_{01}, T_{10}$  - матрицы передач, учитывающие, что сопротивление спектроанализатора не согласовано с сопротивлением датчика [246\*, 249, 250].

Удар высокоскоростной микрочастицы приводит к образованию разрыва металлического полоска. В радиотехнической модели данный разрыв можно представить в виде компланарной емкости, включенной последовательно (рисунок 1.38), при этом номинал данной емкости составляет от 0,1 до 1 пФ. Тогда матрицу передачи прототипа датчика можно рассчитать согласно выражению:

$$T = T_{01} \cdot T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4 \cdot T_{10},$$

где  $T_1, T_2, T_3, T_4$  - матрицы передач согласно рисунку 1.50,  $T_{01}, T_{10}$  - матрицы передач, учитывающие, что сопротивление спектроанализатора не согласовано с сопротивлением датчика [246\*, 249, 250].

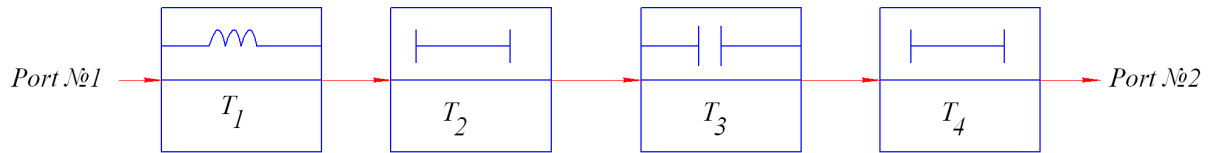


Рисунок 1.38- Эквивалентная схема металлического полоска с разрушением:  $T_1$  – матрица передачи последовательно включенной индуктивности,  $T_2$  – матрица передачи металлического полоска без повреждений длиной  $l_1$ ,  $T_3$  – матрица передачи компланарного конденсатора,  $T_4$  – матрица передачи полоска без повреждений длиной  $l_2$  (при этом полагаем, что  $l=l_1+l_2$ )

Так как коэффициенты передачи для металлического полоска с разрывом и без разрыва рассчитываются согласно разным эквивалентным схемам, то можно предположить, что на основании анализа частотных зависимостей элементов матриц  $S$  (или  $T$ ) можно определить факт наличия места разрыва данного металлического полоска.

Результаты компьютерного моделирования при условии согласования сопротивлений спектроанализатора и измеряемого образца представлен на рисунке 1.39, а без учета согласований сопротивлений - на рисунке 1.40.

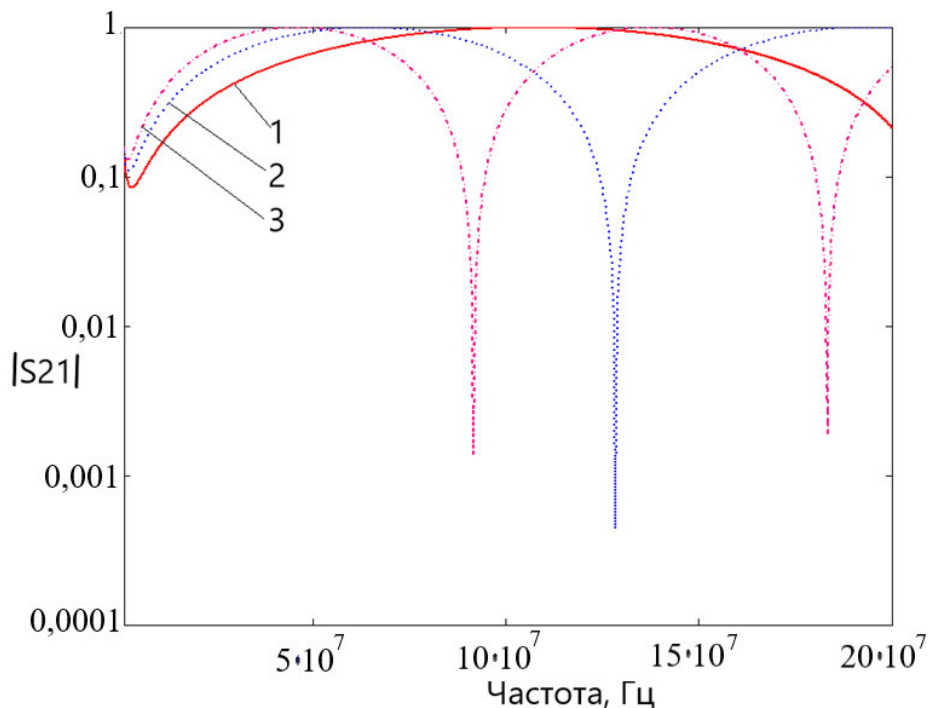


Рисунок 1.39 -График зависимости нормированного коэффициента передачи без учета несогласованности волнового сопротивления образца и спектроанализатора: 1 соответствует разрыву позиции 2 (рисунок 1.36), 2 – п. 3 (рисунок 1.36), 3 - п.4 (рисунок 1.36)

У спектроанализатора входное и выходное сопротивление составляло 50 Ом. У спроектированной прототипа датчика оно отличалось (130 Ом), с учетом несогласованности сопротивлений результаты моделирования представлены на рисунке

1.40. При моделировании не учитывалось взаимное влияние соседних участков металлического полоска.

Согласно рисункам 1.39, 1.40 несогласованность волнового сопротивления прототипа датчика и спектроанализатора приводит к появлению побочных колебаний, связанных с возникновением отраженных волн. В работе [246\*] более подробно рассмотрены результаты моделирования, показывающие, что на низких частотах возникает резонанс коэффициента передачи, который появляется за счет добавления последовательно включенной индуктивности.

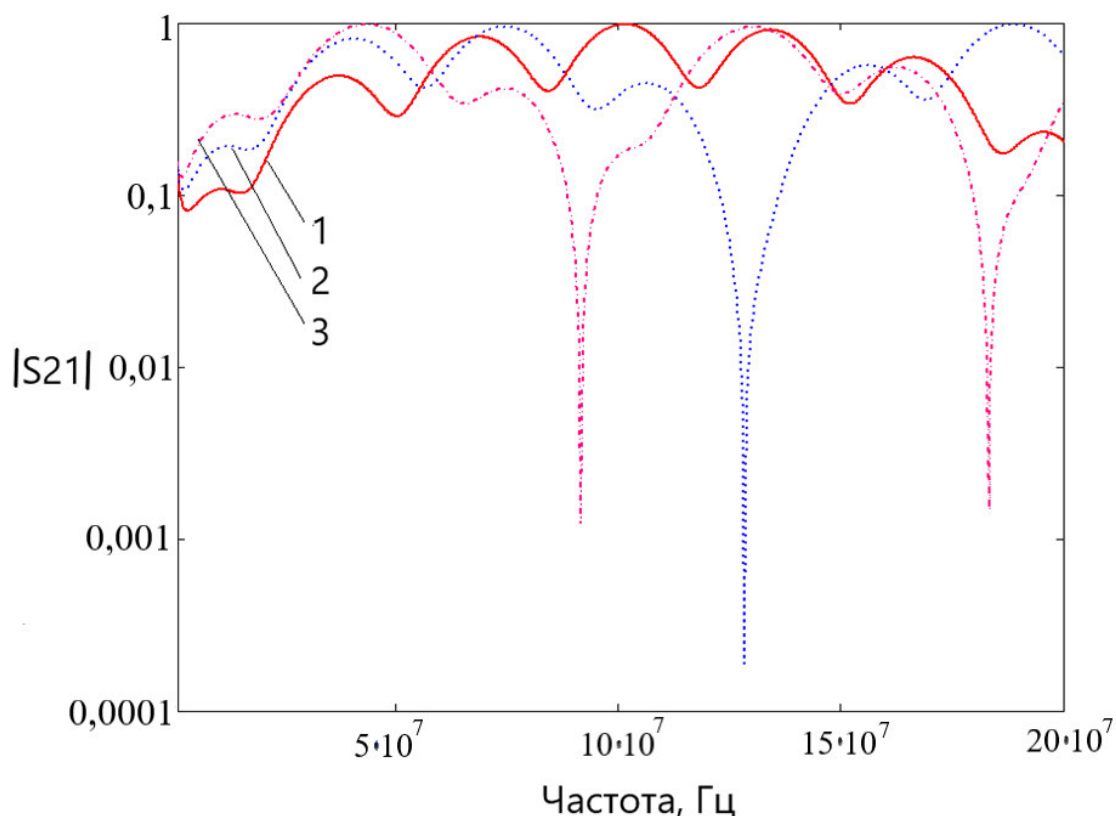
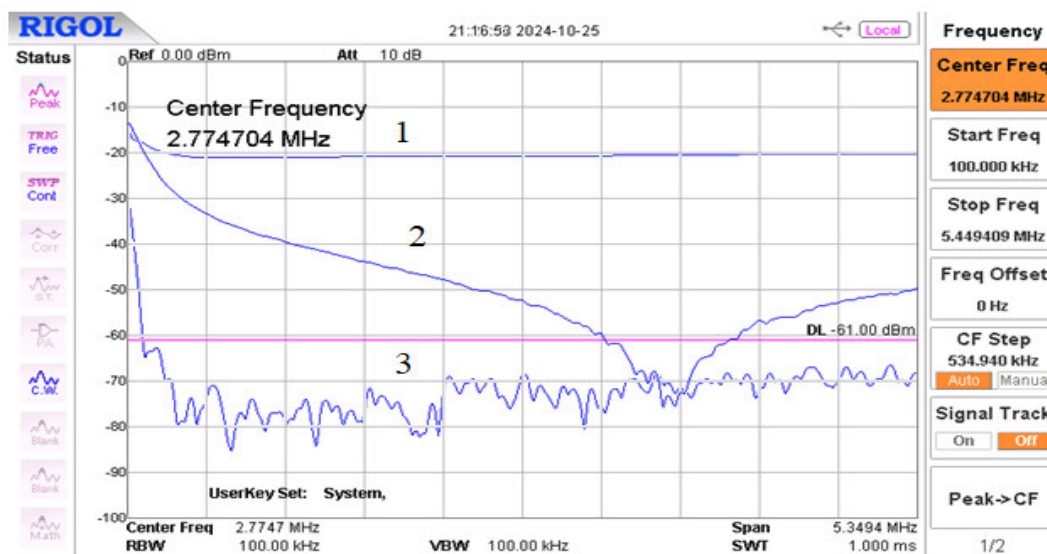


Рисунок 1.40- График зависимости нормированного коэффициента передачи с учетом несогласованности волнового сопротивления образца и спектроанализатора: 1 соответствует п.2 (рисунок 1.36), 2 соответствует п.3 (рисунок 1.36), 3 соответствует п.4 (рисунок 1.36)

### Результаты экспериментального исследования

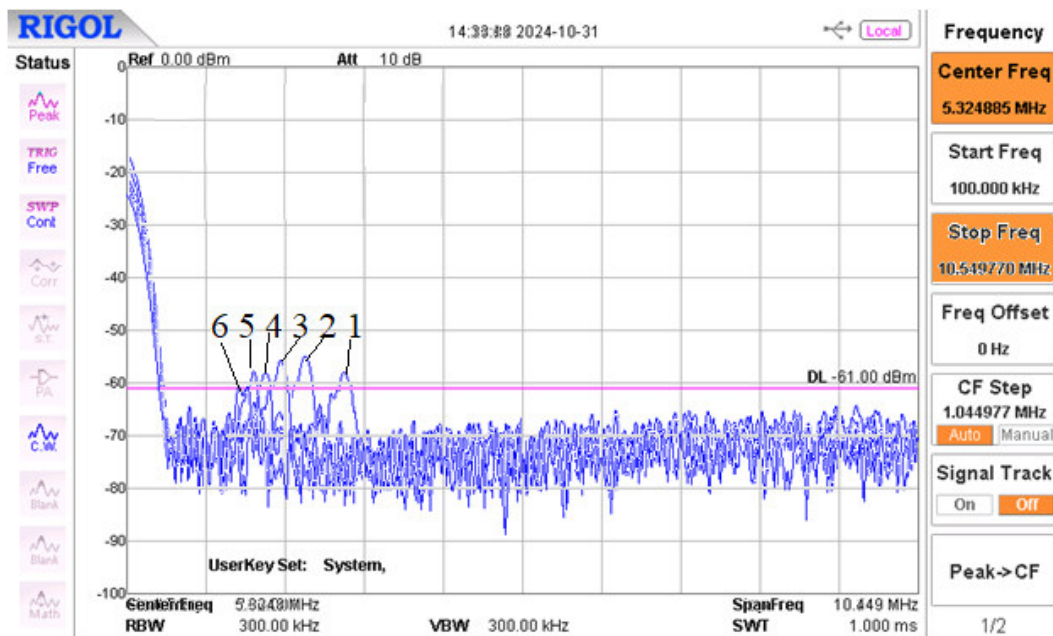
Исследование коэффициента передачи датчика (металлического полоска) в зависимости от частоты проводилось на экспериментальной установке, включающей в свой состав датчик на основе «змейки» и спектроанализатор RIGOL DSA875, который был подключен к разъемам PORT №1 и PORT №2 (рисунки 1.36). Разрушение проводника производилось с помощью скальпеля.

Результаты проведённого исследования приведены на рисунках 1.41-1.43. При этом мощность тестового сигнала со спектроанализатора была -20дБм (0,01 мкВт).



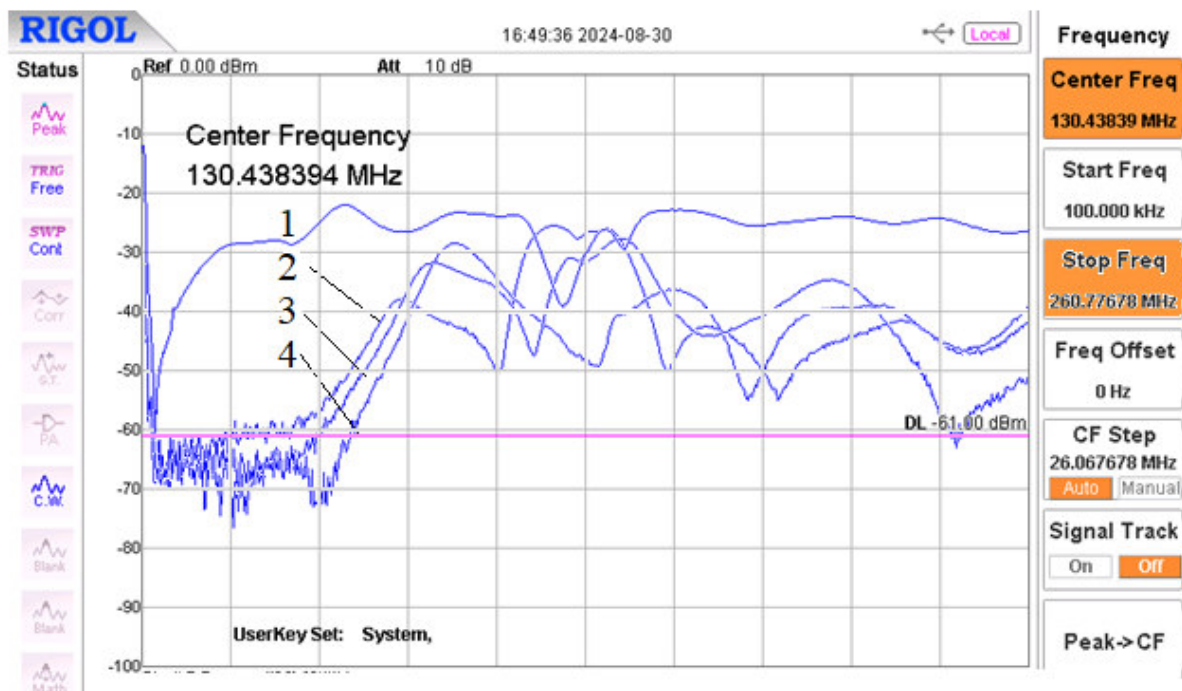
1- без разрыва металлического полоска и без последовательно включенной индуктивности; 2- без разрыва металлического полоска и с последовательно включенной индуктивностью; 3 - с разрывом в точке №1 (рисунок 1.36 без последовательно включенной индуктивности)

Рисунок 1.41 – Коэффициент передачи прототипа датчика



1 – была разорвана точка №1; 2 – №2; 3 – №3 ; 4 – №4 ; 5 – №5 ; 6 – №6 (согласно рисунку 1.36)

Рисунок 1.42– Резонансы коэффициента передачи прототипа датчика с последовательно включенной индуктивностью



1 – вариант без разрыва, 2 – была разорвана точка №2, 3 - точка №3, 4 - точка №4  
(согласно рисунку 1.36)

Рисунок 1.43 – Результаты измерения коэффициента передачи

Снижение коэффициента передачи прототипа датчика, показанный на рисунке 1.41 связан с паразитными свойствами катушки индуктивности [253]. Номинал катушки индуктивности был выбран достаточно большой для того, чтобы резонансы, показанные на рисунке 1.42 располагались в области низких частот, что позволяет построить систему обработки информации с использованием относительно низкочастотных радиоэлементов [245\*].

В области высоких частот спектральный анализ коэффициента передачи не имеет четко выраженного резонанса, но с использованием тарировки датчика, возможно также предположить точку разрыва металлического проводника (рисунок 1.43).

### Краткие выводы

Проведенные исследования показали принципиальную возможность применения спектрального метода анализа для определения удара высокоскоростной микрочастиц, приводящего к разрыву металлического полоска, при этом размеры микрочастицы должны быть соизмеримы с размерами металлического проводника.

Введение индуктивности, включенной последовательно, позволило увеличить номинал коэффициента передачи прототипа датчика на частоте резонанса. Резонанс при этом возникает при появлении разрыва металлического полоска и его частота зависит от места разрыва данного полоска. Для изготовления датчика рекомендуется использовать

материал с равномерной диэлектрической проницаемостью, а также выбирать высокочастотную индуктивность. Сам датчик больше ориентирован на регистрации высокоскоростных частиц размерами более 100 мкм, что связано с шириной металлической дорожки.

### 1.6.2 Датчик микрометеороидов и частиц космического мусора на основе пленочной катушки индуктивности

В качестве первичного преобразователя датчика высокоскоростных микрочастиц [254\*, 255, 256, 257\*] соискателем было предложено использовать пленочную катушку индуктивности, выполненной из проводящего материала, нанесённого на диэлектрическое основание, с другой стороны которого имеется металлизация. Индуктивность пленочной круглой спиральной катушки индуктивности можно рассчитать согласно выражениям [258-264] (рисунок 1.44):

$$L = 0,033937 \cdot \frac{a^2 \cdot n^2}{8 \cdot a + 11 \cdot c} \cdot K_g,$$

$$a = \frac{D_0 + D_i}{4}, c = \frac{D_0 - D_i}{2},$$

$$K_g = 0,57 - 0,145 \cdot \ln(W / h),$$

где  $L$  – индуктивность катушки в [нГн],  $D_i$  – внутренний диаметр катушки [мкм],  $D_o$  – внешний диаметр катушки [мкм],  $n$  – количество витков,  $K_g$  – коэффициент учитывающий наличие заземляющей плоскости и уменьшается по мере приближения заземляющей плоскости, поэтому в работе [260] он равен 1,  $W$  – ширина полоска [мкм],  $h$  – толщина диэлектрического основания [мкм].

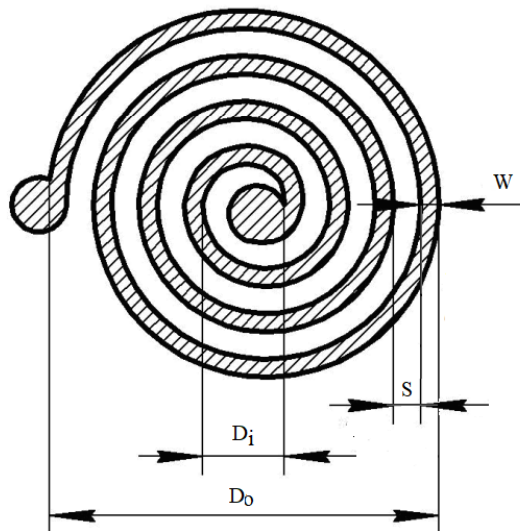


Рисунок 1.44 - Катушка индуктивности

При ударе высокоскоростной микрочастицы в металлический полосок происходит образование кратера, приводящего к его разрыву (рисунки 1.45, 1.46).

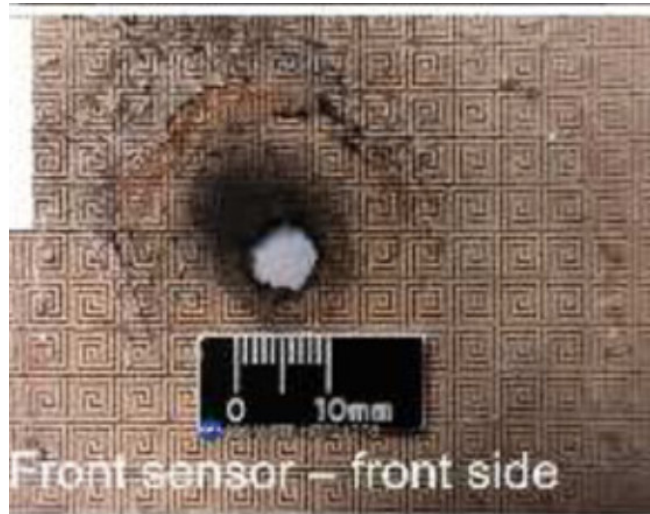


Рисунок 1.45-Фотография кратера [222]

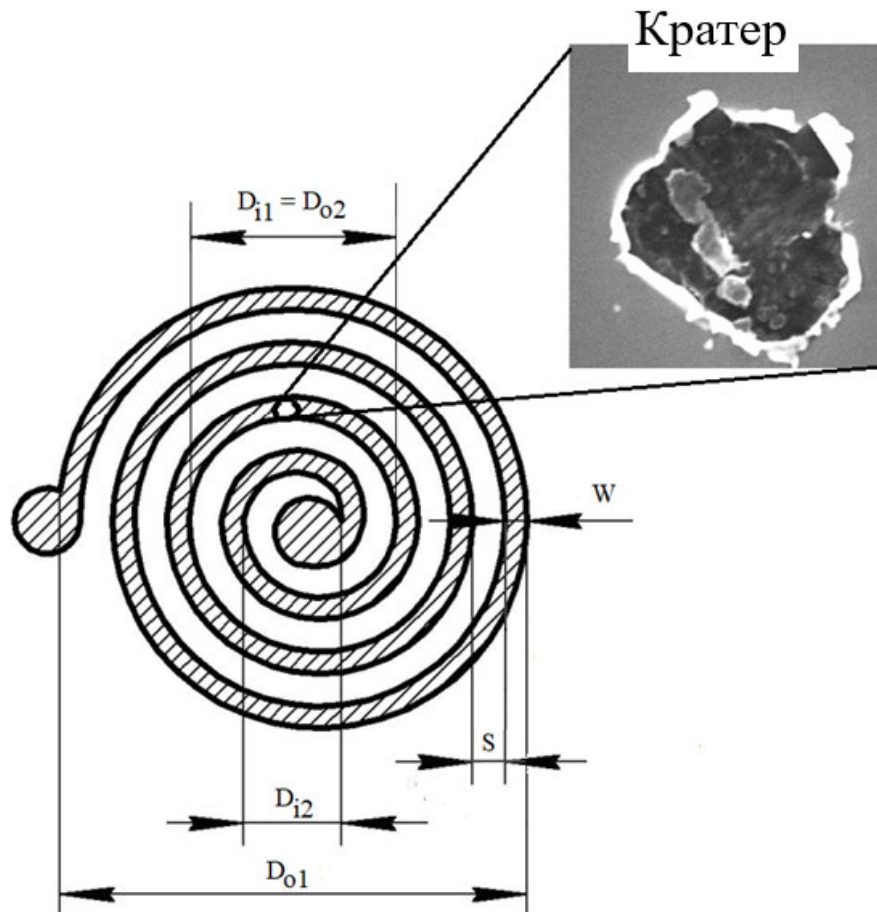


Рисунок 1.46 –Катушка индуктивности с кратером

Размеры образовавшегося кратера можно примерно оценить согласно эмпирическим моделям, представленным в работе [113]. При этом разрыв металлического полоска приводит к образованию электрической емкости, последовательно подключенной к металлическому полоску (рисунок 1.46), рассчитать

которую можно с использованием модели компланарного конденсатора, выполненного на основе микрополосковой линии [265-268] (рисунок 1.47):

$$C_g = \frac{1}{2} C_{even},$$

$$C_{even} = W \cdot \left( \frac{S}{W} \right)^{m_e} \cdot e^{K_e} \cdot \left( \frac{\varepsilon}{9,6} \right)^{0,9} n\Phi$$

$$m_e = \frac{1,565}{\left( \frac{W}{h} \right)^{0,16}} - 1, \text{ при } 0,3 \leq \frac{S}{W} \leq 1,$$

$$K_e = 1,97 - \frac{0,03}{\frac{W}{h}}, \text{ при } 0,3 \leq \frac{S}{W} \leq 1.$$

где  $S$ - ширина разрыва металлического полоска, равная диаметру кратера от высокоскоростного соударения,  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость,  $h$ - высота диэлектрической подложки,  $W$  - ширина металлического полоска.

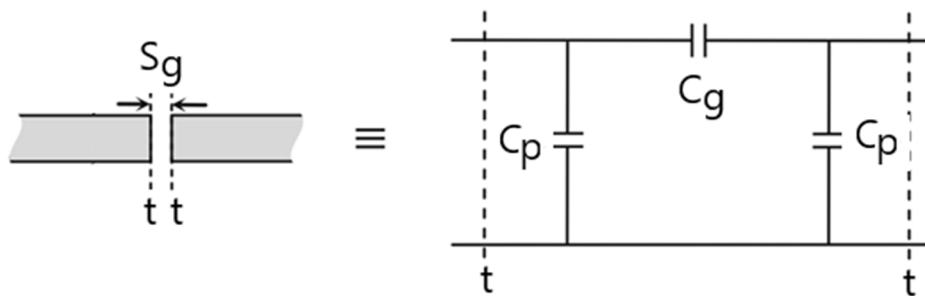


Рисунок 1.47 - Модель компланарного конденсатора, образовавшегося за счет разрыва металлического полоска

Проведённые предварительные расчеты показали, что емкость компланарного конденсатора мала по сравнению с межвитковой емкостью пленочной катушки индуктивности, поэтому приближенно можно оценить ёмкость  $C_g$  как ёмкость между двумя соседними витками катушки, где произошел разрыв согласно выражениям, приведенным в работах [246\*, 247].

Тогда согласно рисункам 1.46, 1.47 катушку индуктивности с разрывом можно представить в виде двух катушек индуктивностей, имеющих взаимную индуктивную связь и соединенных последовательно через электрическую емкость (рисунок 1.48). При этом взаимную индуктивность можно оценить согласно аналитическому выражению, приведённому в работе [261]:

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} N_1 \cdot N_2 \frac{D_{o1}}{(1-g) \cdot (\Delta - \delta)} \cdot \left[ \frac{A_3}{3} (\Delta^3 - \delta^3) \cdot \ln\left(\frac{1}{g}\right) + \frac{A_5}{10} (\Delta^5 - \delta^5) \cdot \left(\frac{1}{g^2} - 1\right) + \frac{A_7}{28} (\Delta^7 - \delta^7) \cdot \left(\frac{1}{g^4} - 1\right) \right],$$

где  $N_1, N_2$  - число витков большой и меньшей катушки индуктивности;  $g = D_{o2} / D_{o1}$ ,  $\Delta = D_{i1} / D_{o1}$ ,  $\delta = D_{i2} / D_{o1}$ ,  $D_{o1}$  и  $D_{i1}$  - соответственно внешний и внутренний диаметры большой катушки;  $d_{o1}$  и  $d_{i1}$  - соответственно внешний и внутренний диаметры меньшей катушки (рисунок 1.58);  $A_3 = 9,87$ ,  $A_5 = 3,701$ ,  $A_7 = 2,313$  - коэффициенты, указанные в работе [261].

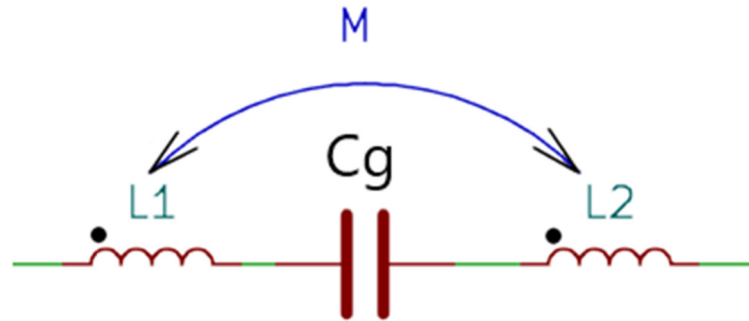


Рисунок 1.48 - Эквивалентная схема разорванной катушки

Согласно представленным выше аналитическим выражениям было проведено компьютерное моделирование, результаты которого представлены на рисунках 1.49, 1.50. При моделировании учитывалось, что внешний диаметр катушки был 10 см (размеры выбирались таким образом, чтобы можно было разместить катушку на внешнюю стенку CubeSat), внутренний диаметр 1 см, ширина полоска 250 мкм, количество витков 90. Индуктивность катушки составила  $\approx 9,65 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$ . Результаты моделирования показали, что на больших частотах полный импеданс разорванной катушки индуктивности стремится к импедансу катушки без разрыва. При этом четко выделяются резонансные частоты, которые зависят от параметров катушки индуктивности, места разрыва и номинала образовавшейся емкости. График нормированной (относительно резонансной частоты, образовавшейся на середине катушки индуктивности) резонансной частоты представлен на рисунке 1.50.

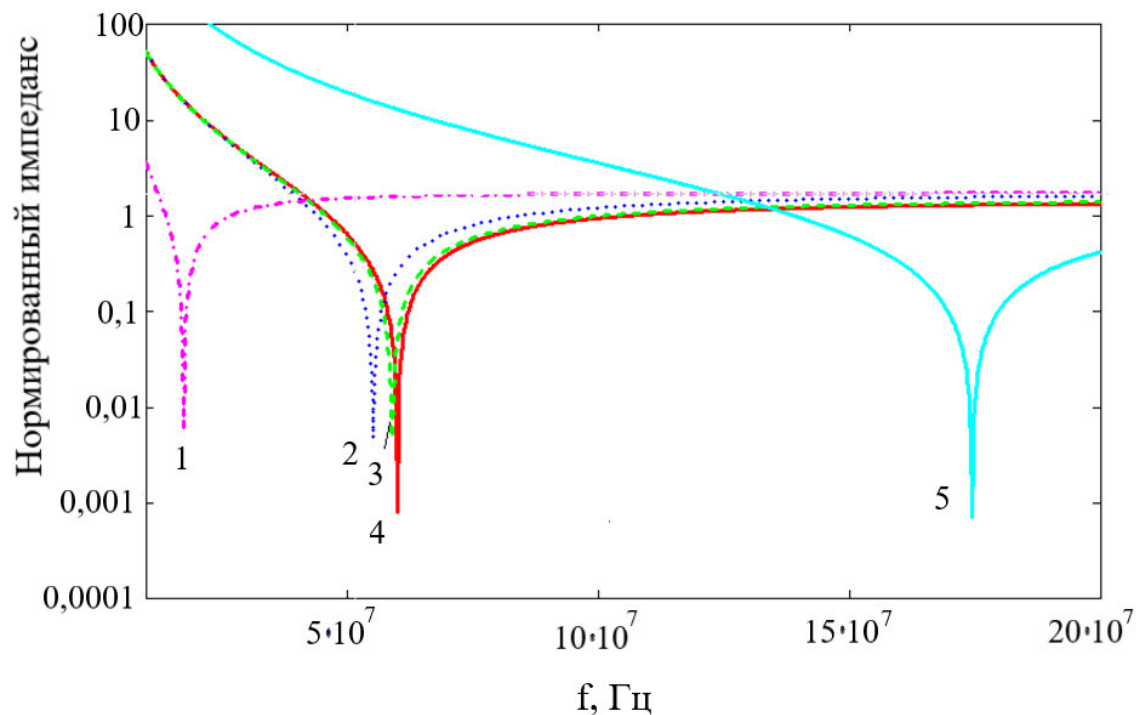


Рисунок 1.49 - График изменения нормированного импеданса разорванной катушки

индуктивности при разном коэффициенте  $k = N / N_{\max}$  и  $Cg$ :

1 –  $k = 0,7$ ,  $Cg = 5 \cdot 10^{-15} \Phi$ , 2 –  $k = 0,7$ ,  $Cg = 5 \cdot 10^{-14} \Phi$ ,

3 –  $k = 0,5$ ,  $Cg = 5 \cdot 10^{-14} \Phi$ , 4 –  $k = 0,9$ ,  $Cg = 5 \cdot 10^{-14} \Phi$ ,

5 –  $k = 0,7$ ,  $Cg = 5 \cdot 10^{-15} \Phi$

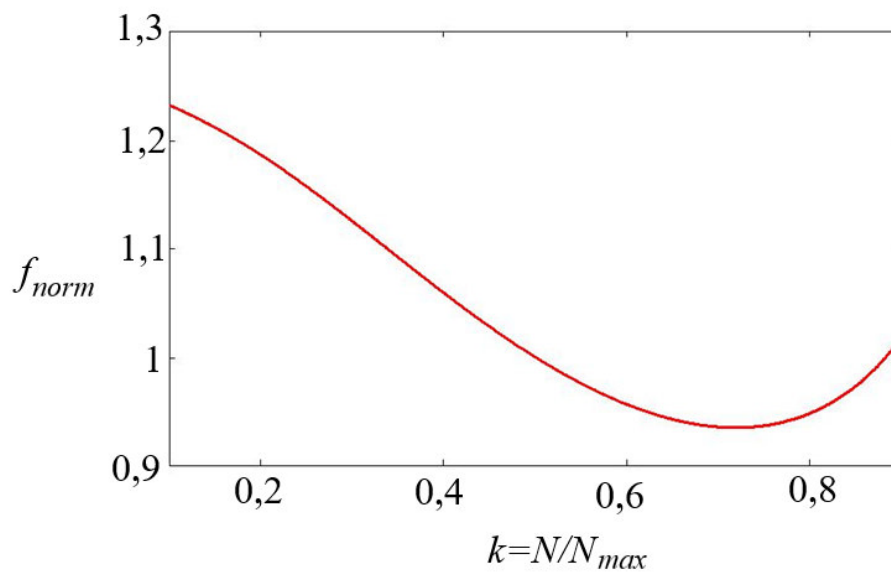


Рисунок 1.50 - График нормированной резонансной частоты

$$f_{\text{norm}} = f_0(k) / f_0(k = 0,5)$$

### Описание модели первичного преобразователя с учетом паразитных параметров

Каждая реальная катушка индуктивности обладает паразитными параметрами: электрической емкостью и сопротивлением, которые можно оценить согласно следующим выражениям [258, 259] (рисунок 1.51):

$$R = \frac{K \cdot \pi \cdot a \cdot n \cdot R_{sh}}{W},$$

$$K = 1 + 0,333 \cdot \left(1 + \frac{S}{W}\right),$$

$$C_3 = 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot D_0 + 0,06$$

где  $K$  - поправочный коэффициент, учитывающий сжатие тока в углах проводника,  $S$  - зазор между витками индуктивности, [мкм],  $R_{sh}$  - сопротивление квадрата пленки, Ом/□,  $C_3$  - паразитная межвитковая емкость, [пФ].

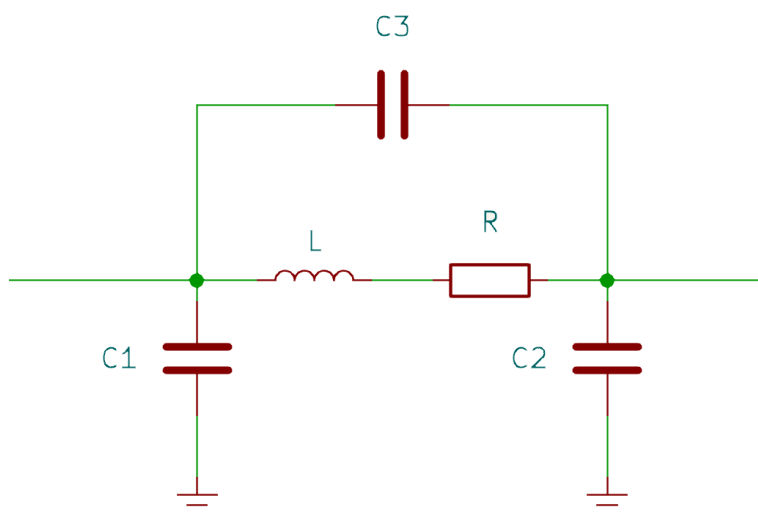
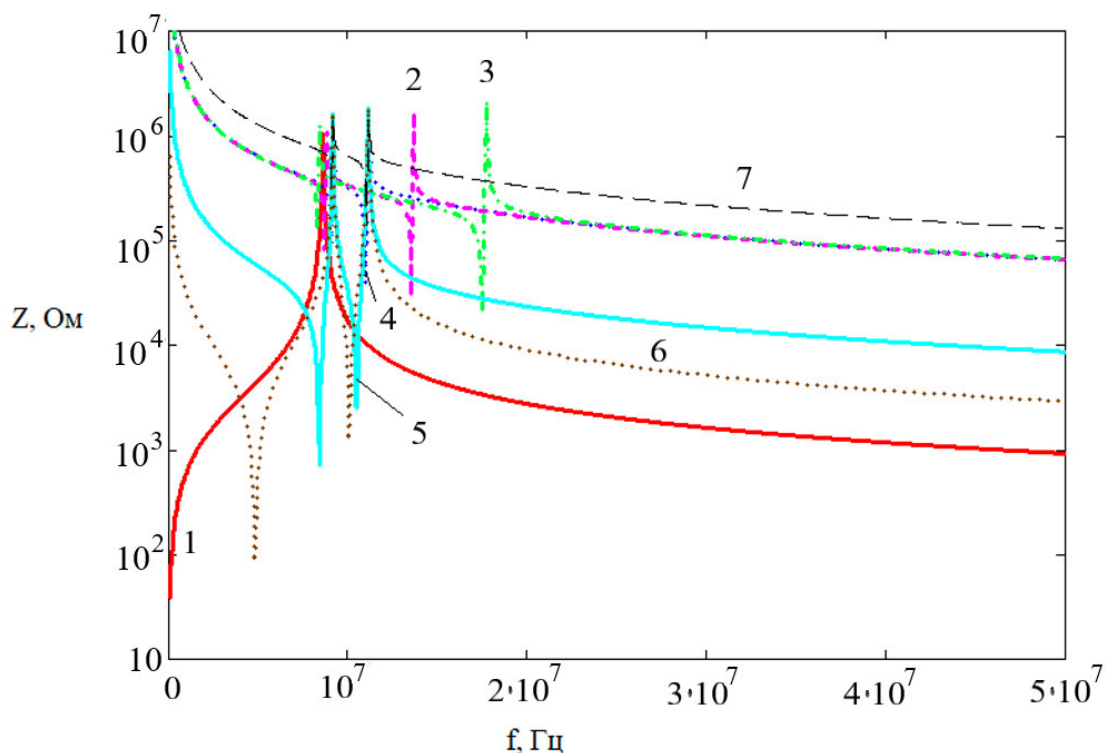


Рисунок 1.51 - Эквивалентная схема индуктивности с учетом паразитных параметров

Результаты моделирования зависимости импеданса катушки индуктивности с учетом паразитных параметров в зависимости от частоты представлены на рисунке 1.52, которые показали, что из-за паразитных элементов появляется дополнительный резонанс на амплитудной – частотной характеристике.



1- индуктивность без разрыва; 2- $k=0,9, Cg=5 \cdot 10^{-14} \Phi$ ; 3- $k=0,5, Cg=5 \cdot 10^{-14} \Phi$   
; 4- $k=0,7, Cg=5 \cdot 10^{-14} \Phi$ ; 5- $k=0,7, Cg=5 \cdot 10^{-13} \Phi$ ; 6- $k=0,7, Cg=5 \cdot 10^{-12} \Phi$ ;  
7- $k=0,7, Cg=2,5 \cdot 10^{-14} \Phi$

Рисунок 1.52 – График зависимости импеданса от частоты

### Результаты эксперимента

Для проведения испытаний была изготовлена экспериментальная установка на основе опытного образца круглой катушки индуктивности диаметром 100 мм (рисунок 1.53) (ширина металлического полоска составила ~200 мкм, ширина между полосками ~250 мкм) и векторного анализатора LiteVNA64 для определения АЧХ и ФЧХ, подключенного к персональному компьютеру, а также программного обеспечения NanoVNA-App. Результаты измерений сохранялись в базу данных на ПК, а затем были проанализированы с помощью программы GNU Octave.

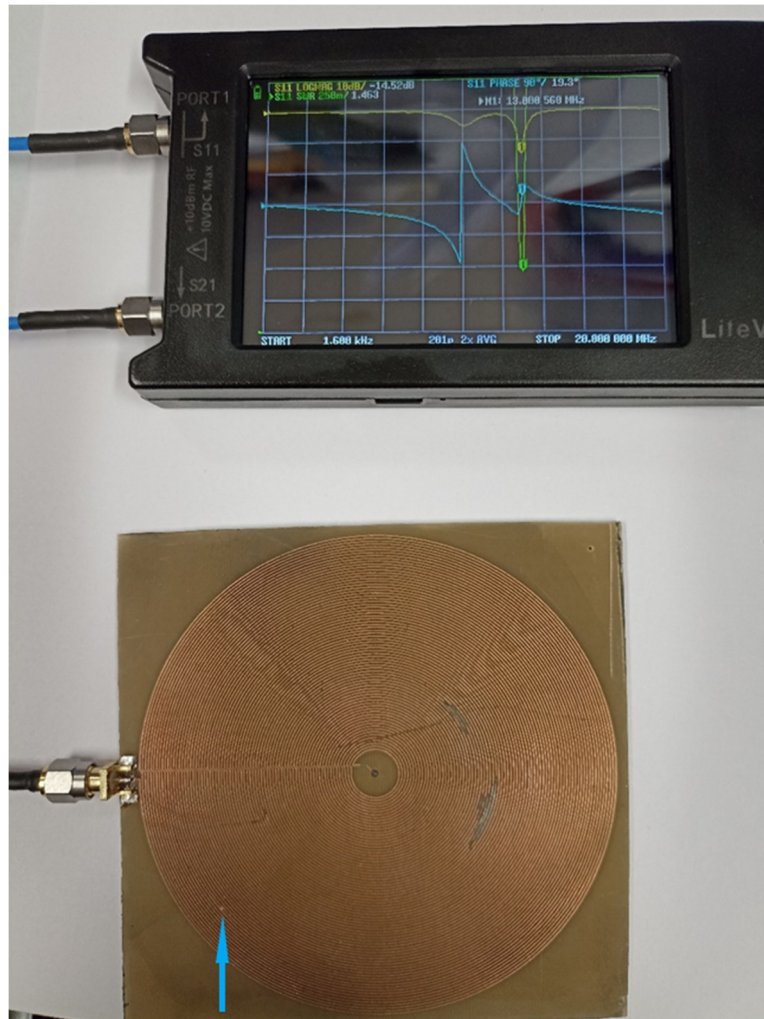


Рисунок 1.53 - Фотография испытаний с прототипом датчика на основе катушки индуктивности (место разрыва показано стрелочкой). Разрыв производился путем разрезания дорожки скальпелем.

На рисунке 1.54 представлена укрупненная фотография разрыва, полученная с помощью скальпеля.

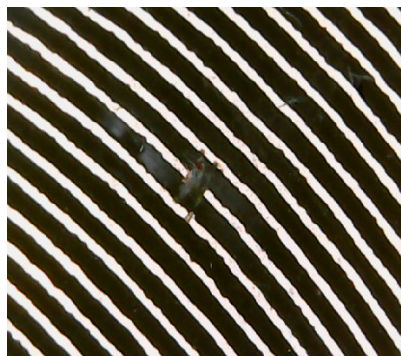


Рисунок 1.54– Фотография места разрыва

Полученные значения АЧХ и ФЧХ пленочной катушки индуктивности при разных значениях разорванного металлического полоска представлены на рисунках 1.55, 1.56 соответственно. Нумерация витков ведется начиная с внешнего диаметра катушки.

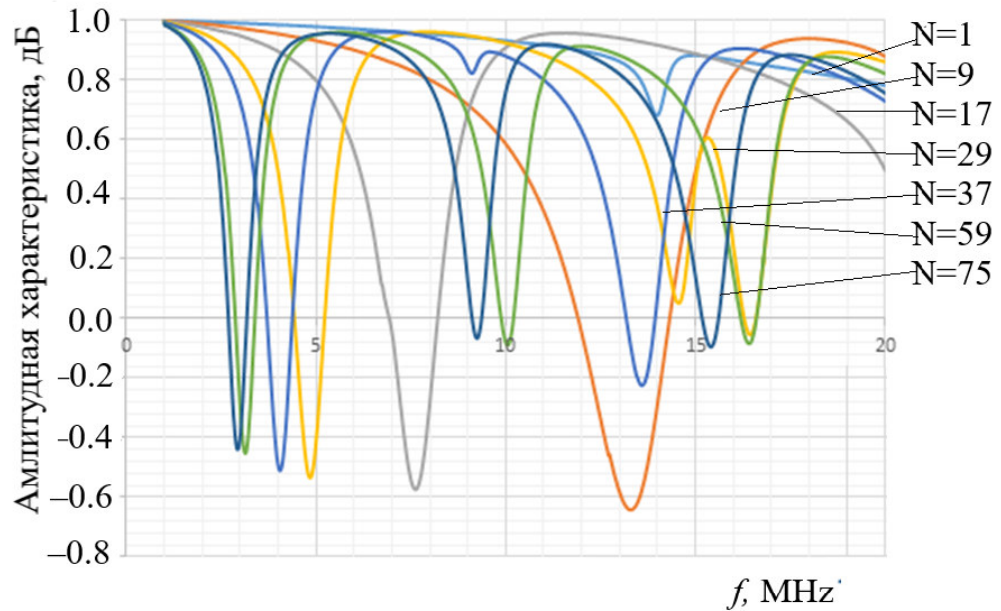


Рисунок 1.55 - АЧХ в зависимости от номера разорванного витка

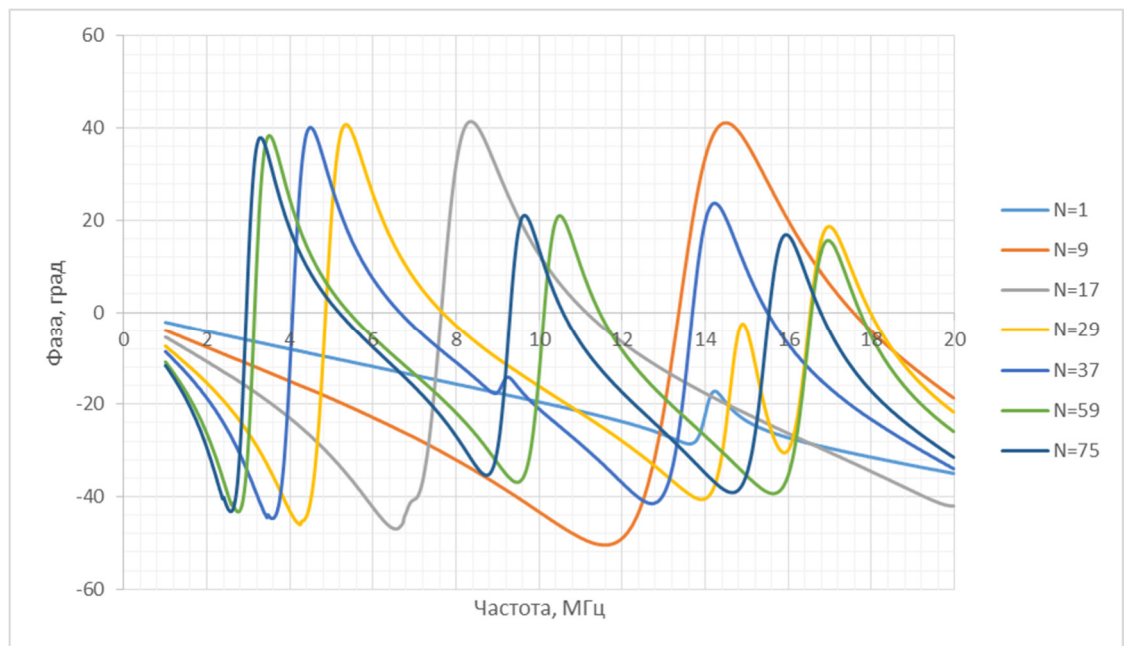


Рисунок 1.56 - ФЧХ в зависимости от номера разорванного витка

На рисунке 1.57 приведены графики зависимости положения пика первого резонанса (Рез.1) и второго резонанса (Рез.2) в зависимости от положения точки разрыва, а также аппроксимация степенными функциями.

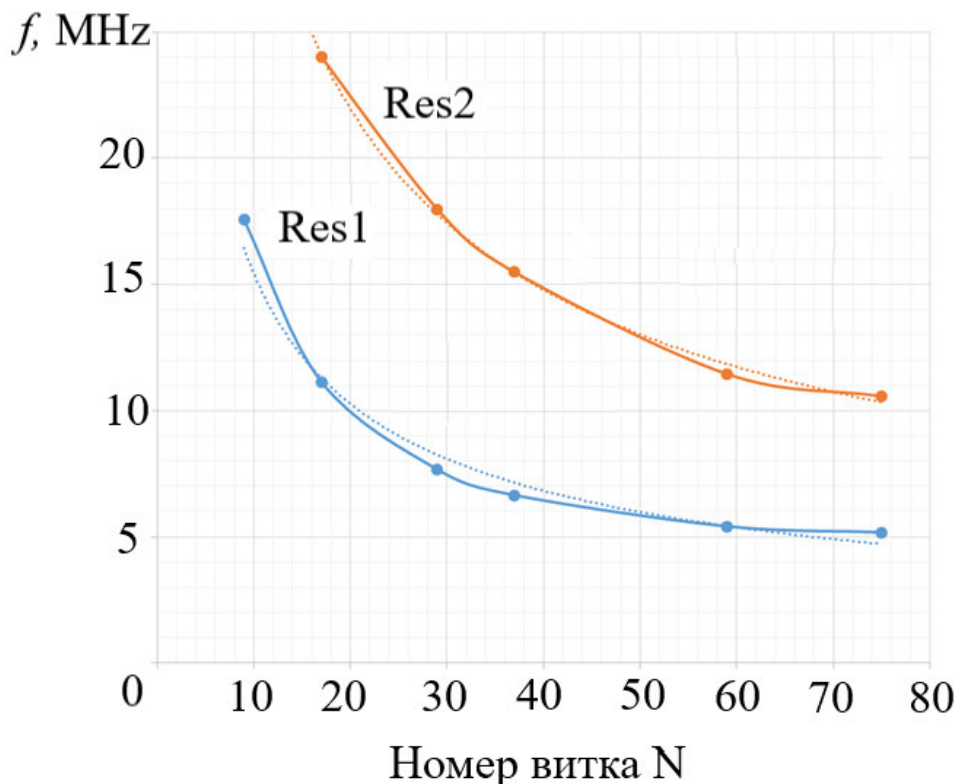


Рисунок 1.57- Зависимость резонансной частоты датчика от положения точки разрыва: Res1 -  $f = 59,886 \cdot N^{-0,589} (R^2 = 0,9784)$ ; Res2 -  $f = 121,34 \cdot N^{-0,571} (R^2 = 0,9959)$

Эксперимент показал, что график зависимости резонансной частоты датчика от положения точки разрыва хорошо аппроксимируется функцией вида  $f = \frac{k}{N^\alpha}$ , где, N – номер витка, считая от внешней стороны катушки; k – константа (k=59,89 для первого резонанса, k=121,34 для второго резонанса;  $\alpha$  – показатель степени ( $\alpha = 0,589$  для первого резонанса,  $\alpha = 0,571$  для второго резонанса). При малых N (5-15) изменение резонансной частоты достигает 1МГц на виток, что позволяет с большой точностью определять не только радиальное положение области попадания частицы, но и сектор (часть длины дуги, когда N не является целым числом). При больших N (60-75) изменение резонансной частоты имеет порядок 20 кГц, что также позволяет определить сектор попадания частицы, однако с меньшей точностью.

В работе предложено использование пленочной катушки индуктивности в качестве датчика высокоскоростных микрочастиц. Подобная конструкция позволяет избежать использования большого количества мультиплексоров, которые обычно используются в датчиках подобного типа. Представленные результаты компьютерного и лабораторного моделирования данной конструкции показали, что пленочная катушка пригодна для

регистрации микрочастиц размерами от 100 мкм, что определяется точностью ее изготовления, на космических аппаратах типа CubeSat.

Анализ полученных данных показал, что место разрыва можно определить согласно анализу сдвига резонансной частоты АЧХ пленочной катушки индуктивности. При этом надежное определение места разрыва становится возможным при номере разорванного витка большем 5.

### **1.7 Выводы к главе 1**

Анализ литературных источников и существующих конструкций приборов для регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора показал, что принцип большинства их основан на использовании одного физического эффекта (ионизация, кратерообразование, пьезоэффект, фотоэмиссия), что не позволяет в полной мере оценить причину возникновения регистрируемого физического эффекта. Существующие методы не учитывают комплексное влияние формы частицы, ее заряда и угла падения на регистрируемые сигналы, а также отсутствуют систематизированные рекомендации по выбору физических эффектов и проектированию аппаратуры для конкретных условий эксплуатации.

Учет проблем массогабаритных ограничений и необходимости увеличения чувствительной площади датчиков для малых космических аппаратов типа CubeSat потребовал спроектировать новые типы первичных преобразователей на основе пленочных микрополосковых линий передач с использованием частотного метода анализа. Разработанные математические модели на основе T- и S-матриц микрополосковых линий передачи позволили установить зависимость резонансной частоты коэффициента передачи от положения места разрыва металлического полоска, которое может быть вызвано соударением микрочастицы с чувствительной поверхностью датчика. Это позволяет определять место удара частицы без применения большого количества мультиплексоров и многоканальной электроники.

Экспериментальные исследования экспериментальных установок на основе датчиков в виде «змейки» и спиральной катушки индуктивности (диаметр 100 мм, ширина дорожки 200-300 мкм) подтвердили работоспособность предложенного частотного метода. Полученные результаты могут быть использованы при создании малогабаритных датчиков для мониторинга космического мусора и микрометеороидов на борту CubeSat.

В работе представлены практические рекомендации по проектированию аппаратуры для регистрацию высокоскоростных микрочастиц.

## **Глава 2. Приборы ионизационного типа для регистрации высокоскоростных микрочастиц**

### **2.1 Общие принципы построения приборов ионизационного типа для регистрации пылевых микрочастиц**

#### **2.1.1 Система электродов ионизационных датчиков микрометеороидов и частиц космического мусора**

Для измерения параметров высокоскоростных микрочастиц (микрометеороидов и частиц космического мусора) в околоземном пространстве используется аппаратура, основанная на самых различных физических эффектах [5\*, 174\*]. Одним из наиболее чувствительных методов измерения параметров микрометеороидов является ионизационный метод. При этом основными измеряемыми параметрами являются скорость, масса и элементный состав микрочастиц.

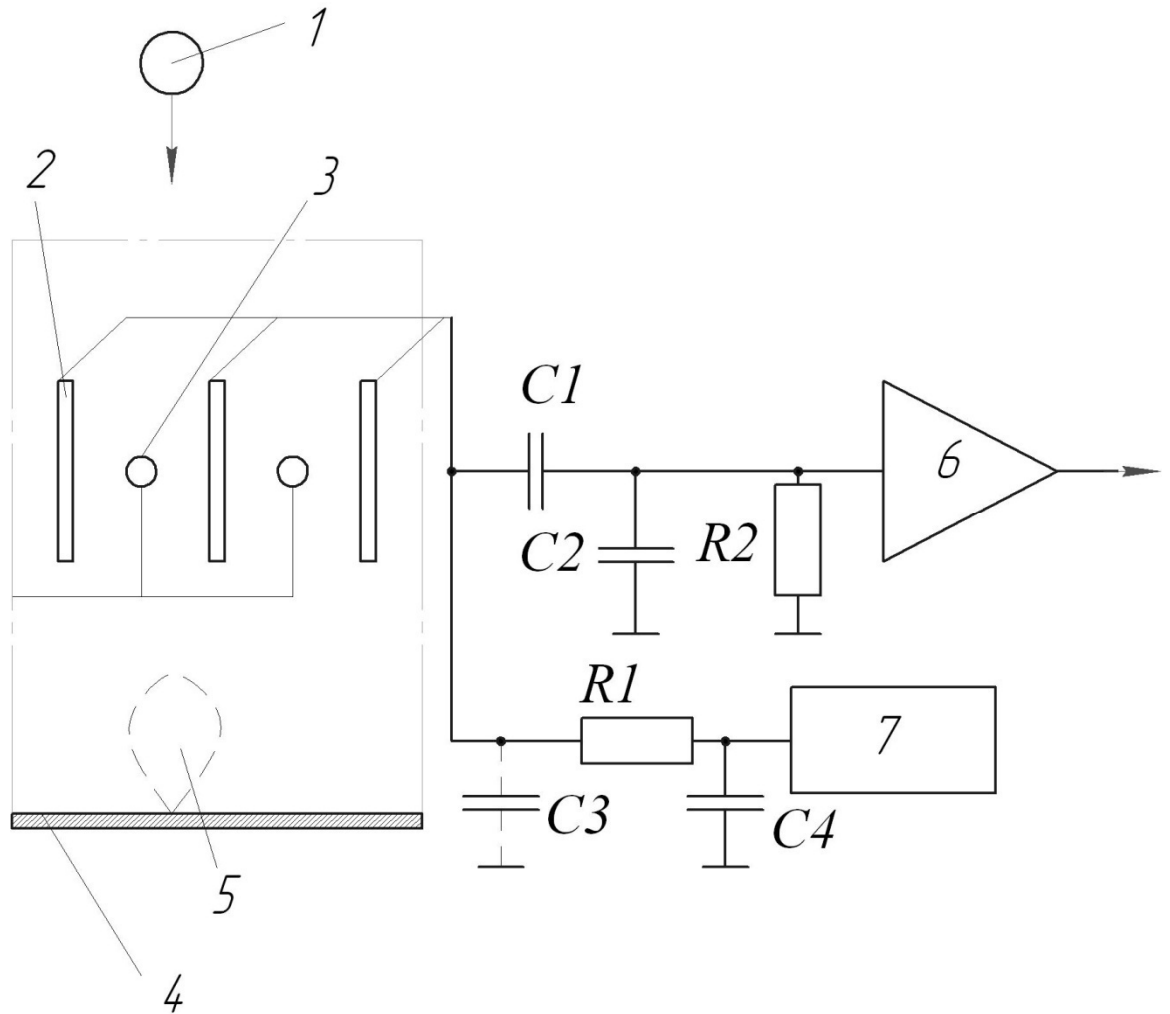
Для измерения элементного состава высокоскоростных микрочастиц используют времяпролетные масс-спектрометры. Тем не менее, установка масс-спектрометров на космические аппараты для измерения параметров высокоскоростных микрочастиц в некоторых случаях сопряжена с определенными сложностями: ценной, трудностью изготовления, массой и габаритами аппаратуры. В этом случае удобно использовать более простые по конструкции датчики высокоскоростных микрочастиц, которые, однако не обладают возможностью измерять элементный состав этих микрочастиц.

#### **Описание принципа работы датчиков**

Микрометеороиды и частицы космического мусора, находясь в околоземном пространстве, заряжаются до некоторого потенциала под действия факторов космического пространства [93]. Величина данного потенциала определяется формой поверхности и размерами микрочастицы.

На рисунке 2.1 показан пример обобщенной структурной схемы датчика микрометеороидов ионизационного типа. Он состоит из мишени, в которую ударяется высокоскоростная микрочастица, системы электродов и электроники, которая измеряет сигнал с системы электродов. Система электродов состоит из измерительных электродов и заземленных электродов.

Рассмотрим принцип работы датчика (рисунок 2.1). Когда заряженная микрочастица 1 пролетает через систему электродов 2 и 3 на измерительных электродах 2 наводится импульс напряжения, параметры которого можно рассчитать с использованием теоремы Рамо-Шокли [98, 102\*].



1 – микрочастица; 2 – измерительный электрод; 3 – заземленный электрод; 4 – мишень; 5 – плазменное облако, образовавшееся при ударе; 6 – усилитель; 7 – источник высокого напряжения;  $C1 = 0,22$  мкФ – разделительная емкость;  $C2$  – входная емкость усилителя;  $C3$  – паразитная емкость проводов (порядка 10 пФ);  $C4$  – фильтрующая емкость источника напряжения;  $R1$  – высокоомное сопротивление;  $R2$  – входное сопротивление усилителя (порядка 10 МОм)

Рисунок 2.1 – Схема измерения

При высокоскоростном ударе микрочастицы в мишень 4 образуется “плазменное облако” [102\*]. Скорость ионов после удара распределяется по частицам согласно распределению Максвелла-Больцмана [2]:

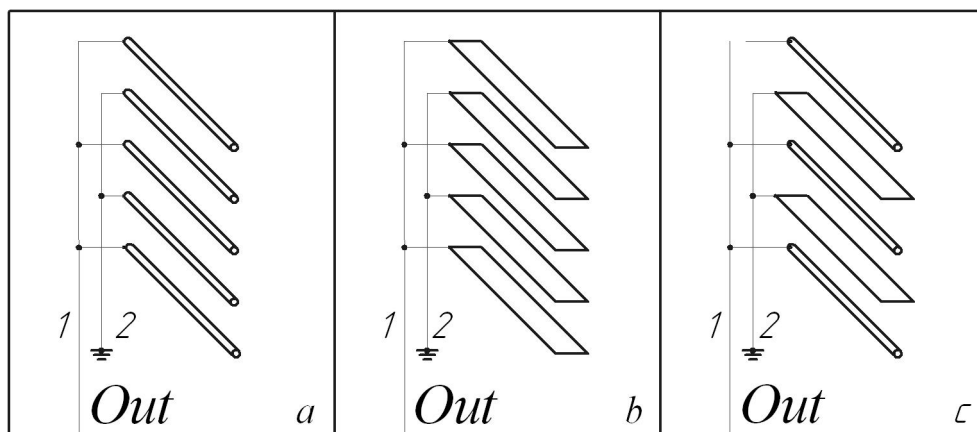
$$f(W) = 4\pi \left( \frac{m_i}{2\pi \cdot k \cdot T} \right)^{3/2} \cdot V^2 \cdot \exp \left( - \frac{m_i \cdot V^2}{2 \cdot k \cdot T} \right),$$

где  $m_i$  – масса  $i$  – иона,  $k$  – постоянная Больцмана,  $V$  – скорость ионов,  $T$  – температура образовавшегося “плазменного облака”, которую можно определить исходя из скорости и массы микрочастицы.

Наиболее вероятную скорость иона массой  $m_i$  можно определить согласно выражению:

$$V_{Bi} = \sqrt{\frac{2 \cdot k \cdot T}{m_i}}$$

Рассмотрим более внимательно систему электродов датчика микрометеороидов и частиц космического мусора, которые были использованы в разработках соискателя. С точки зрения приемника ионов желательно, чтобы площадь приема ионов была как можно больше, с точки зрения усиления сигнала желательно, чтобы входная емкость была минимальной. Данные требования являются взаимоисключающими, поскольку рост емкости конденсатора напрямую обусловлен увеличением поверхности его электродов. На рисунке 2.2 представлены различные системы электродов, которые использовались для построения датчиков высокоскоростных микрочастиц.



1 – Измерительные электроды; 2 - заземленный электрод

Рисунок 2.2 – Варианты реализации системы электродов (a, b, c)

Здесь не рассматриваются сеточные электроды, которые используются только для измерения наведенного импульса напряжения. Более подробно с ними можно познакомиться в работах [269, 270].

Конструкция на рисунке 2.2а представляет собой металлические параллельные нити. Такая конструкция обладает относительно небольшим весом и емкостью, мало затеняет поверхность космического аппарата. Подобные системы достаточно удобно использовать в качестве электродов для контроля, например, ионных выбросов при высокоскоростном ударе о поверхность солнечных батарей [162\*]. Недостатком является то, что система электродов представляет собой нежесткую конструкцию, что приводит к тому, что вибрации, возникающие на космическом аппарате из-за работы аппаратуры, могут привести к сильному колебанию нитей, и как следствие помехам.

Следует отметить, что одним из вариантов уменьшение входной емкости в подобных системах является подключение усилителя к каждому измерительному электроду-нити. Это приводит к некоторым трудностям при изготовлении и эксплуатации подобного типа датчиков: повышенное энергопотребление, габариты, сложность настройки большого числа усилителей.

Конструкция на рисунке 2.2b представляет собой параллельно включенные металлические электроды в виде плоских пластин. Преимуществом такой конструкции является хорошая собираемость вылетающих ионов, даже при относительно небольшом напряжении на измерительных электродах. Недостатком является большая емкость, чем у конструкции на рисунке 2.2a [102\*].

Конструкция на рисунке 2.2c представляет собой чередование параллельных электродов в виде пластин и заземленных металлических проводников [271\*]. Данная конструкция экспериментально показала, что входная емкость на ~25% меньше, чем первая конструкция.

В качестве материала электродов - проводников рекомендуется выбирать материал с маленьким температурным коэффициентом линейного расширения, чтобы нити не провисли при нагреве в космическом пространстве. В связи с этим рекомендуется их делать из вольфрама или тантала. Недостатком является повышенное сопротивление по сравнению с медным проводом.

Рассмотрим простую модель возникновения помех в измерительных усилителях, вызванных колебаниями системы электродов. Для этого рассмотрим конструкцию, показанную на рисунке 2.2c. В модели рассматривается участок, где земляной электрод ограничен двумя плоскопараллельными электродами, которые имеют большую жесткость, чем металлические нити, и поэтому пренебрежем колебанием данных пластин.

Заряд, который находится на пластине, можно рассчитать согласно выражению:

$$Q = U_0 \cdot C_0,$$

где  $U_0$  - постоянное напряжение для сбора ионов, подаваемое на пластину, значение  $C_0$  емкости вычислим согласно модели провода над полубесконечной плоскостью [272] (более точное значение можно оценить с использованием численных методов расчета):

$$C_0 = \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot L}{\ln\left(\frac{2h}{R}\right)} = 2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot L \cdot \frac{A}{2},$$

где  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость,  $\varepsilon_0$  - диэлектрическая постоянная,  $L$  - длина провода,  $h$  - расстояние между проводником и пластиной,  $R$  - радиус провода,  $A = \frac{2}{\ln\left(\frac{2h}{R}\right)}$ .

Тогда суммарная емкость определится как

$$C = \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot L}{\ln\left(\frac{2(h+y)}{R}\right)} + \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot L}{\ln\left(\frac{2(h-y)}{R}\right)},$$

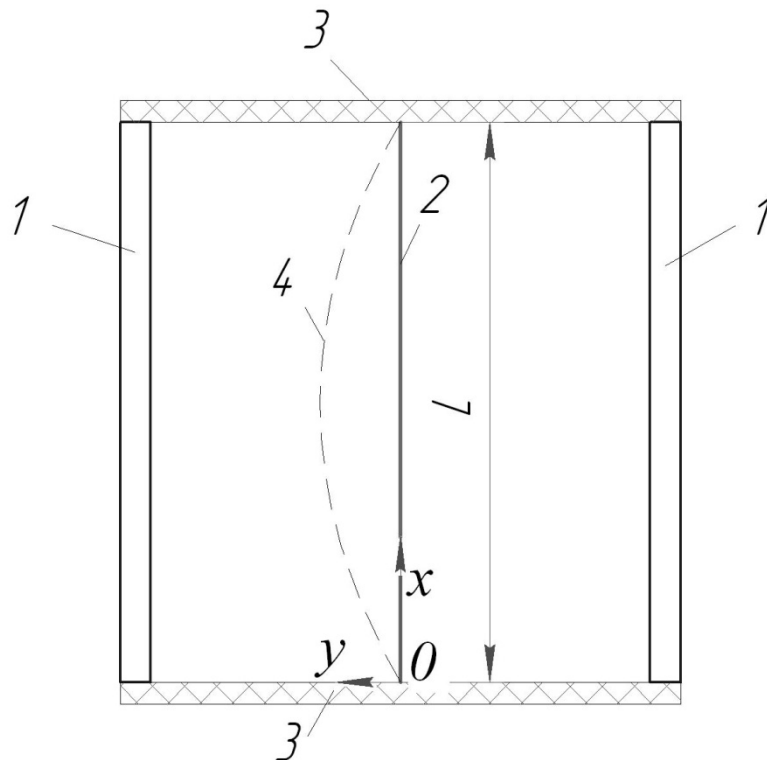
где  $y$  - смещение провода относительно центрального положения при неточной установке провода по центру.

При этом надо отметить, что минимальное значение будет достигнуто при  $y = 0$ .

Функцию для расчета емкости  $C$  можно разложить в ряд Тейлора:

$$C \approx 2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot L \cdot \left( A + \frac{1}{h^2} \frac{A^2 \cdot (A+1)}{16} y^2 \right).$$

При воздействии внешней силы провод начинает колебаться между двумя пластинами (рисунок 2.3).



1 – измерительные электроды, 2 – земляной электрод в положении покоя; 3 – крепление электродов; 4 - отклонение электрода от положение покоя

Рисунок 2.3 – Колебание струны

Колебание струны приводит к изменению емкости системы электродов и как следствие изменяется заряд на пластине:

$$Q + \Delta Q = U_0 \cdot (C + \Delta C).$$

Емкость участка провода  $\Delta l$  можно рассчитать согласно выражению:

$$C_i = \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \Delta l}{\ln\left(\frac{2(h+y)}{R}\right)} + \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \Delta l}{\ln\left(\frac{2(h-y)}{R}\right)} = 2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \Delta l \left( \frac{1}{\ln\left(\frac{2(h+y)}{R}\right)} + \frac{1}{\ln\left(\frac{2(h-y)}{R}\right)} \right);$$

$$C_i \approx 2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot (A + B \cdot y^2) \Delta l$$

$$B = \frac{1}{h^2} \frac{A^2 \cdot (A+1)}{16}$$

$$C = \int_0^L (A + B \cdot y^2) \Delta y$$

В нити возникают колебания стоячих волн, колебания которых описываются согласно выражению [272]:

$$y = Y_{\max} \cdot \sin(k \cdot x) \sin(\omega \cdot t),$$

где  $Y_{\max}$  - максимальная амплитуда колебаний.

Резонансные частоты для нити можно определить согласно выражению:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{2L} \sqrt{\frac{T}{\rho_l}},$$

где  $T$  - сила натяжения струны,  $\rho_l$  - масса провода на единицу длины,  $n$  - натуральное число.

$$\begin{aligned} C &= (2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0) \int_0^L (A + B \cdot (Y_{\max} \cdot \sin(k \cdot x) \sin(\omega \cdot t))^2) dx = \\ &= (2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0) \cdot \left( A \cdot L + B \cdot Y_{\max}^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) \cdot \frac{1}{k} \left( \frac{kL}{2} - \frac{1}{4} \sin(2kL) \right) \right) = [\sin(2kL) = 0] = \\ &= 2C_0 \left[ 1 + Y_{\max}^2 \frac{1}{h^2} \frac{A \cdot (A+1)}{64} \right] - 2C_0 \cdot Y_{\max}^2 \frac{1}{h^2} \frac{A \cdot (A+1)}{64} \cdot \cos(2\omega \cdot t). \end{aligned}$$

Данное выражение соответственно необходимо помножить на число повторяющихся структур, показанных на рисунке 2.3. При  $\omega = 0$ , выражение преобразуется в выражение для емкости при нулевом смещении провода от центрального положения.

При гармоническом воздействии в выходном напряжении появляются составляющие с частотой в два раза больше резонансных частоты колебания нити. Данные результаты надо учитывать при учете негативного воздействия колебаний.

### 2.1.2 Расчёт силы тока в измерительной цепи детектора высокоскоростных микрочастиц

В [273-275] приведены расчёты силы тока, наведённого пролётом внешнего точечного заряда через плоский вакуумный конденсатор, включенный в состав последовательной  $RCL$ -цепи, в отсутствие источника напряжения.

Согласно теореме Рамо–Шокли заряд  $Q$ , движущийся между пластинами плоского конденсатора, наводит в его внешней цепи электрический ток  $i_a$  [274, 275]:

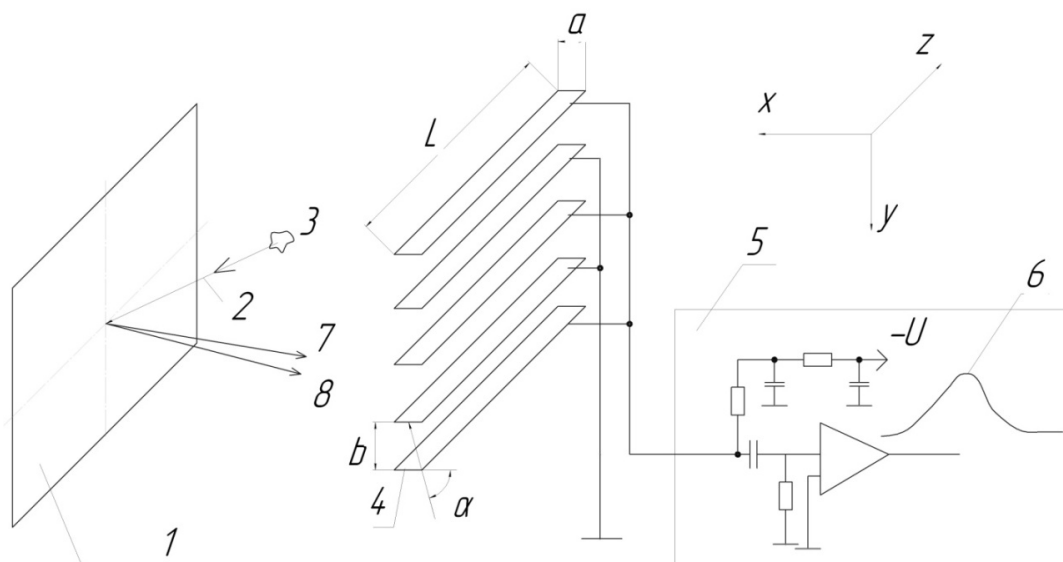
$$i_a = QV/h,$$

где  $V$  – проекция вектора скорости на направление перпендикулярное к пластинам плоского конденсатора;  $h$  – расстояние между пластинами.

Результаты этих исследований для создания полупроводниковых детекторов микрочастиц предполагают использовать в [276, 277]. Однако если такой детектор, например, детектор микрометеороидов, содержит приёмник в виде конденсатора с плоскими параллельными пластинами, то необходимо подключать к ним источник напряжения [2, 278] и в этом случае использовать выражения из [274, 275] становится затруднительно.

Рассмотрим образование тока в измерительной цепи детектора микрометеороидов (рисунок 2.4). Микрочастица  $3$  с высокой скоростью ударяется в мишень  $1$ , при этом в зоне контакта микрочастицы и мишени происходит образование положительно заряженных ионов и электронов. Мишень подключена к нулевому потенциалу, а на измерительные электроды  $4$  через фильтр подаётся напряжение  $U$ . В результате влияния электрического поля положительно заряженные ионы движутся от мишени к электродам, с которых можно считывать полезный сигнал  $6$ , усиленный зарядочувствительным усилителем.

При косом ударе в электрод, находящийся под нулевым потенциалом, материал микрочастица может преобразоваться в низкотемпературную плазму. Плазма под действием электрического поля конденсатора будет двигаться в сторону измерительных электродов, находящихся под отрицательным потенциалом. При этом влиянием электрического поля нельзя пренебречь.



1 – мишень; 2 – траектория движения высокоскоростной микрочастицы; 3 – высокоскоростная микрочастица; 4 – измерительные электроды (двухфазная штыревая решётка); 5 – схема входной цепи приёма сигнала с измерительных электродов; 6 – форма импульса; 7, 8 – направление разлёта ионов

Рисунок 2.4 - Блок-схема детектора микрометеороидов ионизационного типа

**Модель расчёта ионизационного тока в измерительной цепи детектора высокоскоростных микрочастиц.** Рассмотрим случай, когда на конденсатор подаётся напряжение порядка 300 В. Пренебрежём сопротивлением цепи подачи питания, так как номиналы резисторов в ней составляют порядка 10 МОм.

Эквивалентная схема для расчёта силы тока в измерительной цепи представлена на рисунке 2.5 При этом сделано следующее допущение –размеры плоских параллельных пластин бесконечно большие, т. е. неоднородностью электрического поля, а также пространственным распределением заряда между обкладками конденсатора  $C$  можно пренебречь.

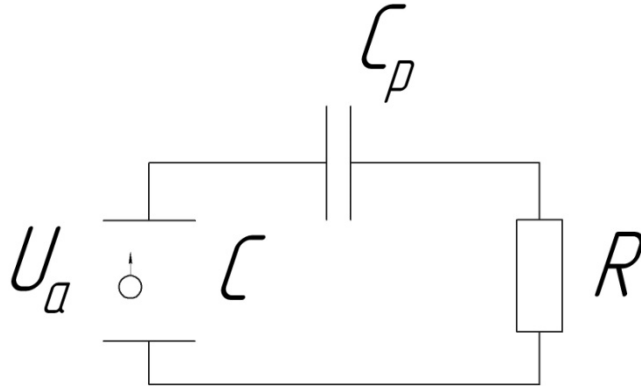


Рисунок 2.5 – Эквивалентная схема входной цепи измерительного тракта в процессе пролета заряженной частицы (иона) в поле плоского конденсатора

Рассмотрим электрический импульс, который образуется в измерительной цепи при пролёте одиночного заряда [275]. Пусть частица движется от одной обкладки конденсатора  $C$  к другой, тогда, сила тока в измерительной цепи определяется по формуле

$$i_a(t) = [QV(t)/d] - C(dU_a/dt) = U_a/R,$$

где  $t$  – текущее время;  $C$ ,  $d$  – ёмкость и расстояние между мишенью и электродами, соответственно (см. рис. 2.4);  $R$  – входное сопротивление усилителя;  $U_a$  – напряжение между обкладками.

Полученные линейные однородные уравнения первого порядка описывают ток в цепи во время пролёта заряженной частицы между обкладками, и в момент времени, когда движение частицы закончено:

$$\frac{d}{dt}i_a(t) + \frac{1}{RC}i_a(t) = \frac{QV(t)}{RCd}, 0 < t < T_C; \quad (2.1)$$

$$\frac{d}{dt}i_a(t) + \frac{1}{RC}i_a(t) = 0, t > T_C, \quad (2.2)$$

где  $T_C = md \left[ \sqrt{V_0^2 + (2QU_a/m)} - V \right] / (QU_a)$  – время движения частицы между двумя обкладками конденсатора (рисунок 2.5);  $V_0$ ,  $m$  – начальная скорость и масса заряженной частицы, соответственно.

Частное решение (2.1), (2.2) получим из условия непрерывности  $i_a(t = T_C - 0) = i_a(t = T_C + 0)$  токов.

Тогда функция тока измерительной цепи (1), (2) будет иметь следующий вид:

$$i_a(t) = \left\{ A - B - (A - B - Dt) \exp \left[ t / (RC) \right] \right\} \exp \left[ -t / (RC) \right] \text{ для } 0 < t < T_C;$$

$$i_a(t) = \left\{ A - B - (A - B - DT_C) \exp\left[\frac{T_C}{RC}\right] \right\} \exp\left[-\frac{(T_C + t)}{RC}\right] \quad \text{для} \\ t \geq T_C;$$

где  $A = (Q^2 U_a RC) / (d^2 m)$ ;  $B = dmQV_0 / (d^2 m RC)$ ;  $D = Q^2 U_a / (d^2 m)$ .

Энергия электрического поля больше кинетической энергии частицы, поэтому формулу для силы тока в измерительной цепи можно упростить

$$i_a(t) = A \left[ 1 - \left( 1 - \frac{t}{RC} \right) \exp\left(\frac{t}{RC}\right) \right] \exp\left(-\frac{t}{RC}\right) \quad \text{для } 0 < t < T_C; \quad (2.3)$$

$$i_a(t) = A \left\{ 1 - \left( 1 - \frac{T_C}{RC} \right) \exp\left(\frac{T_C}{RC}\right) \right\} \exp\left(-\frac{T_C + t}{RC}\right) \quad \text{для } t \geq T_C. \quad (2.4)$$

Из (2.3), (2.4) следует, что от параметров частицы (массы и скорости) зависит амплитуда тока в измерительной цепи, а также момент прилёта частицы на электроды (рисунок 2.4). Форма электрического импульса в измерительной цепи от единичного заряда представлена на рисунке 2.6.

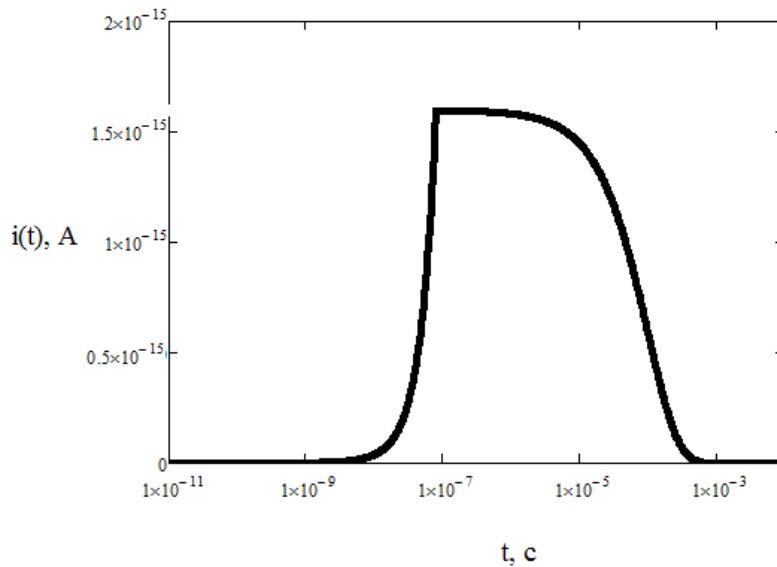
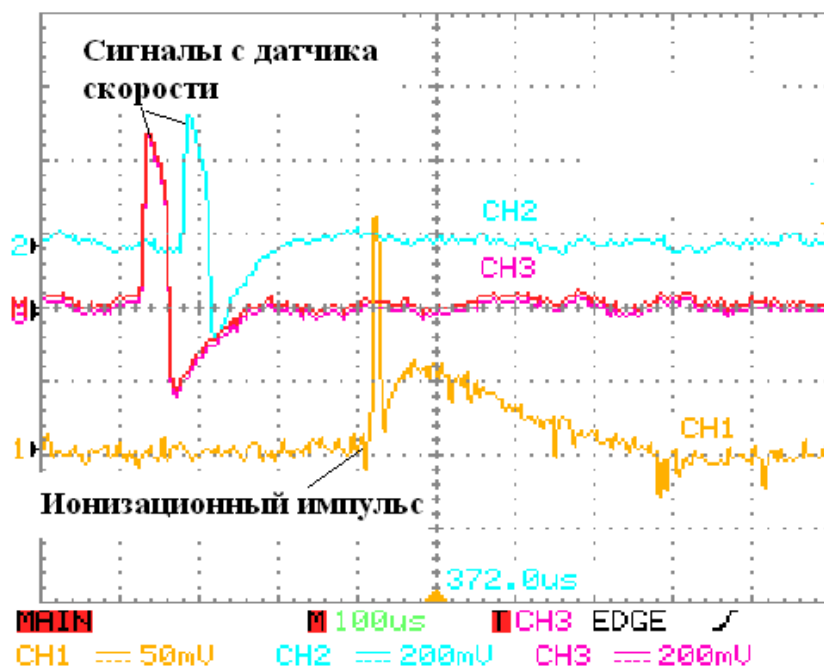


Рисунок 2.6 – Форма импульса тока в измерительной цепи от единичного заряда при  $R=10\text{МОм}$ ,  $C=100\text{ пФ}$ ,  $d=2\text{ см}$

Зависимости (2.3), (2.4) применимы для одиночного заряда. Обобщим их для множества заряженных частиц.



CH1- ионизационный импульс и наведенный заряд, CH2, CH3 – сигналы с измерителя вектора скорости

Рисунок 2.7 - Осциллограмма напряжения

**Модель расчёта электрического импульса от плазменного сгустка в измерительной цепи детектора высокоскоростных микрочастиц.** Модель ионизационного преобразователя предназначена для получения электрического импульса как функции конструктивных параметров преобразователя, параметров частицы и шумовых характеристик, являющихся результатом воздействия на преобразователь внешних факторов космической среды.

Пусть в момент времени  $t_0$  в некоторой области пространства существует плазменный сгусток радиуса  $R_0$  с числом заряженных частиц (ионов)  $N_0$ . Состояние сгустка описывает функция распределения  $f$  [2]:

$$\iiint f(R_0, V_0, P) dR_0 dV = N_0,$$

где  $V_0$  – скорость частиц плазменного сгустка;  $P$  – параметры, характеризующие свойства сгустка: скорость расширения и т.д. При  $t=t_0$  частицы разлетаются в вакууме из точек  $\mathbf{R}_0$  с начальными скоростями  $V_0$ . Частицы поглощаются поверхностью электродов, вторичных частиц не возникает.

Для расчёта конструкции детектора микрометеороидов ионизационного типа и полученных с его помощью сигналов, используем модель образного источника с функцией распределения Максвелла по скоростям. Условие квазинейтральности плазменных сгустков, выполняется, если все электроны и ионы описываются одинаковой функцией распределения. Для плазменного сгустка микрочастицы

$$f_{ci} = \frac{N_{0i}}{\pi^{3/2} V_{м.ч.}^3} \exp(-(V_0 - V_c)^2 / V_{м.ч.}^2) ,$$

где  $N_{0i}$  – число частиц  $i$ -го вида;  $V_{м.ч.} = V/(1+a)$ ;  $V$  – скорость микрочастицы;  $a = \sqrt{\rho_c/\rho_m}$ ;  $\rho_c$ ,  $\rho_m$  – плотности частицы и мишени, соответственно;  $V_0$  – скорость частицы;  $V_c = -(aV/(1+a))$  (ось  $z$  совмещена с направлением удара).

Для плазменного сгустка,двигающегося от мишени

$$f_{mi} = \frac{N_{0i}}{\pi^{3/2} V_{м.ч.}^3} \exp(-(V_0)^2 / V_{м.ч.}^2) ,$$

где  $N_{mi}$  – число частиц  $i$ -го вида вещества мишени;  $V_{м.ч.} = -(aV/(1+a))$ .

Импульс измеряемого тока

$$J(t) = J_c(t) + J_m(t) ,$$

где  $J_c(t)$ ,  $J_m(t)$  – токи, обусловленные вторичными заряженными частицами и заряженными частицами вещества мишени, соответственно.

В зависимости от конструкции электродов сбор ионов на них происходит по-разному. Рассмотрим простой одномерный случай – все образовавшиеся ионы собираются измерительным электродом. Так как ионов множество, то суммарный ток можно вычислить по формуле

$$I_{\Sigma}(t) = \iint f(V_0) i_a(V_0, m, t) dV_0 dm .$$

При обработке информации влияние электрического поля на параметры частицы можно не рассматривать. Существенным недостатком конструкции преобразователя является низкая чувствительность в диапазоне субмикронных частиц и низких скоростей (менее 5 км/с) из-за использования приёмников в виде сетки, плоскопараллельных пластин, штыря и т.д.). Для увеличения чувствительности необходимо применять в качестве приёмника вторично-электронный умножитель или микроканальную пластину.

Исследования ионизационных импульсов возникающих при высокоскоростном соударении микрочастицы с мишенью описаны в [2, 34].

**Модель расчёта ионизационного тока пластин без учёта влияния электрического поля.** Модель работы детектора высокоскоростных микрочастиц

основана на использовании выражения для силы тока в цепи приёмника, выполненного по схеме двухфазной решётки в виде системы плоскопараллельных пластин (рисунок 2.4) или системы тонких проводников [2, 277]. В такой схеме электрическое поле между мишенью и приёмником практически отсутствует и сбор ионов происходит независимо от места соударения микрочастицы.

Нечётные пластины имеют положительный потенциал, чётные – отрицательный. Мишень находится на расстоянии  $d$  от приёмника ионов (измерительных электродов) (рисунок 2.4). Процент попадания ионов на него зависит от многих параметров которые необходимо учитывать. Это скорость ионов  $L$ , ширина пластин  $a$  и длина электродов приёмника ионов, расстояние  $b$  между элементами, напряжение  $U_0$  между ними и т.д.

Пусть в начальный момент времени  $t=0$  в точке с координатами  $(x_0, y_0, z_0)$  находится  $N_0$  ионов (общее количество ионов в облаке плазмы), имеющих максвелловское распределение по скоростям. Определим количество ионов  $N=N(t)$  и  $dn/dt$  в приёмнике ионов.

Введём безразмерные скорости  $Vbx=Vx/V$ ;  $Vby=Vy/V$ ;  $Vbz=Vz/V$  и  $T_{и} = d/Vbx$  – характерное время пролёта ионов от мишени до измерительных электродов.

При переходе к безразмерным величинам введём новые обозначения:

$$\Omega = d/b; \lambda = a/b; x = x/b; \varphi = y/b; y_0 = Nb/2; \beta_0 = y_0/b.$$

Сделаем допущение о максвелловском распределении ионов по скоростям у поверхности мишени в момент соударения. Тогда выражение для количества ионов в приёмнике будет иметь вид:

$$dN = N_0 \exp\left(\frac{-Vx^2 - Vy^2 - Vz^2}{V^2}\right) dVxdVy dVz \left/ (\pi^{3/2} W^3) \right.$$

Для рассматриваемой системы  $0 \leq Vbx \leq \infty$ ;  $-\infty \leq Vby \leq \infty$ ;  $-\infty \leq Vbz \leq \infty$ .

От составляющей скорости иона  $z$  зависит вероятность его попадания на приёмник ионов, однако не зависит время такого попадания. Учтём это, и проинтегрируем функцию распределения по  $z$  составляющей скорости. После преобразования получим

$$\frac{dN}{N_0} = \exp(-Vbx^2 - Vby^2) \left[ \operatorname{erf}\left(\frac{z-z_0}{d} Vbx\right) + \operatorname{erf}\left(\frac{z_0}{d} Vbx\right) \right] dVxdVy.$$

Время прилёта ионов на электроды определим из следующего выражения:

$$t_{\Sigma} = T_{и} + \tau,$$

где  $\tau$  – время взаимодействия иона с электрическим полем.

Время взаимодействия  $\tau$  определим согласно выражению:

$$\tau = \frac{-\Omega Vbx + \sqrt{(\Omega Vbx)^2 - (\beta_0 + \Omega Vbx / Vby - K) \text{sign} \Omega^2}}{\text{sign}(\Omega^2 Vbx / 2)},$$

где  $Vbx = 2eU_0/mV^2$   $K = \text{ent} \left[ \Omega \frac{Vbx}{Vby} + \beta_0 \right]$ .

Уравнения для заряда и времени запишем в виде

$$Q = \frac{1}{2\pi} \iint \exp(-Vbx^2 - Vby^2) \left[ \text{erf} \left( \frac{z - z_0}{d} Vbx \right) + \text{erf} \left( \frac{z_0}{d} Vbx \right) \right] dVxdVy$$

Тогда ток определим как  $i = dQ/dt$ .

### Краткие выводы.

Получены аналитические выражения для силы тока в последовательной  $RC$ -цепи в зависимости от параметров высокоскоростной микрочастицы, а также зарядов в приёмнике ионов и времени их разлёта в пространстве мишень-приёмник ионов (измерительных электродов). Представленные материалы могут быть использованы для проектирования ионизационных детекторов высокоскоростных микрочастиц, а также пылеударных масс-спектрометров [277, 279\*-282\*].

## 2.2 Описание конструкции прибора МЕТЕОР, установленного на малый космический аппарата АИСТ, и результаты космического эксперимента с ним

В настоящее время разработчиками космической техники уделяется большое внимание созданию малых космических аппаратов (МКА) [162\*, 283\*]. Также спутники необходимы для отработки различных технических решений и проведения научных исследований в дальнем и ближнем космосе, что позволяют привлечь молодых исследователей к современным направлениям космического приборостроения.

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-1Т (АИСТ), являющийся совместной разработкой Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет) и ЦСКБ “ПРОГРЕСС” (г.

Самара) (рисунки 2.8, 2.9). Технические характеристики орбиты, на которой функционирует спутник приведены в таблице 2.1 [284]:

Таблица 2.1 – Технические характеристики орбиты АИСТ-1Т

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

На МКА АИСТ была установлена аппаратура МЕТЕОР, разработанная соискателем и состоящая из 6 многопараметрических датчиков (МТ) (рисунки 2.10, 2.11), 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. Каждый из датчиков МТ располагался на отдельной грани МКА.

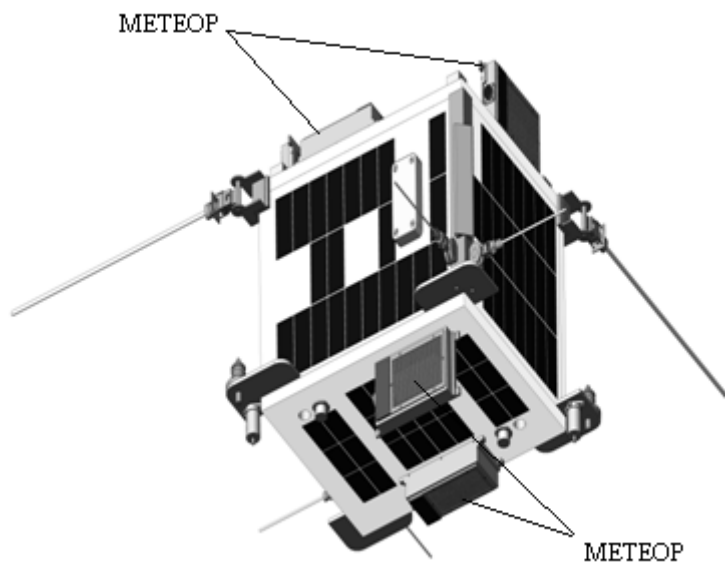
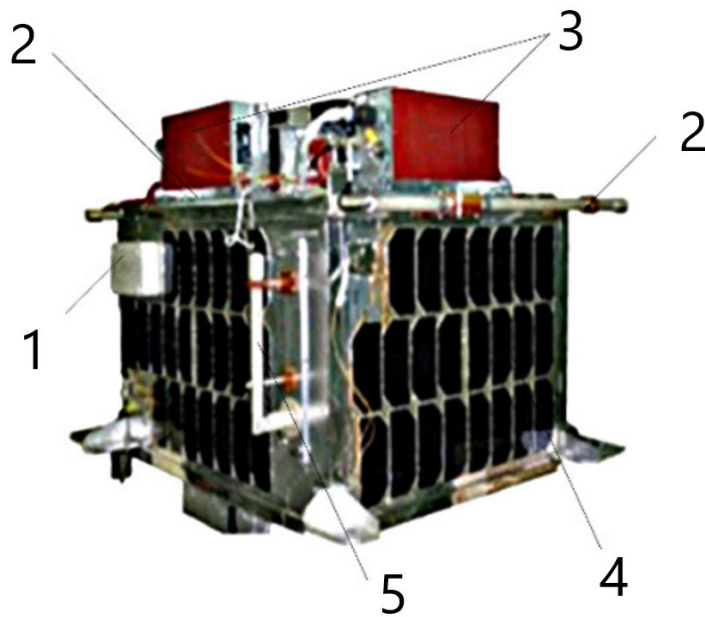


Рисунок 2.8 - Модель МКА АИСТ



- 1 — антенна навигационной аппаратуры; 2 — антенное приемное устройство командно-управляющей навигационной системы;  
 3 — научная аппаратура «МЕТЕОР»; 4 — солнечная батарея; 5 — антенное передающее устройство командно-управляющей навигационной системы

Рисунок 2.9- Фотография МКА АИСТ [285]

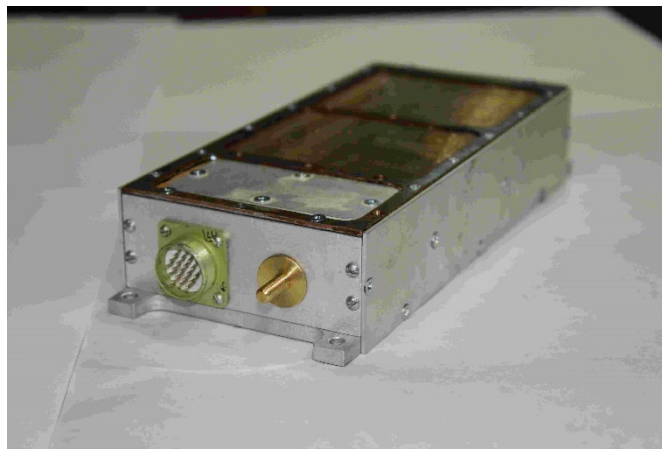


Рисунок. 2.10- Многопараметрический датчик МТ

Каждый из многопараметрических датчиков МТ аппаратуры МЕТЕОР содержит датчик температур, датчик высокоскоростных пылевых частиц, солнечный датчик и датчик электризации (рисунок 2.11).

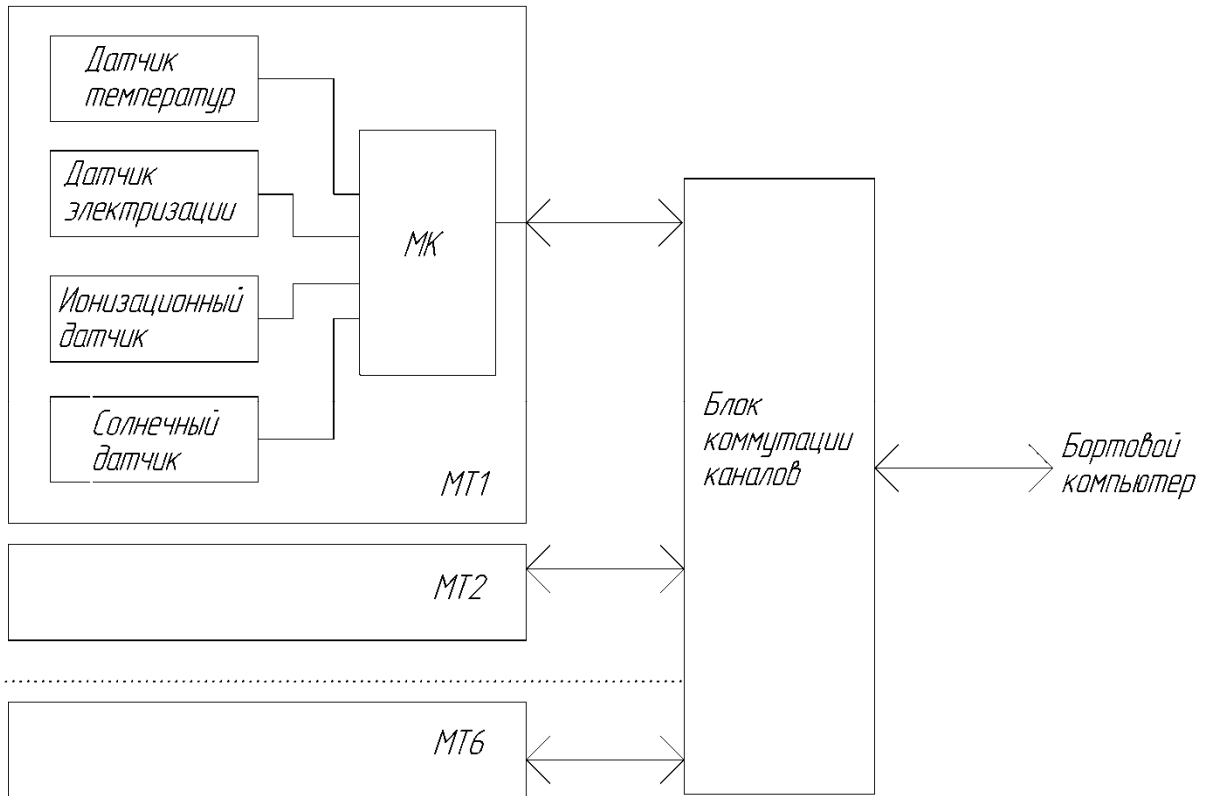


Рисунок 2.11 - Структурная схема аппаратуры МЕТЕОР

**Датчик высокоскоростных пылевых частиц** (микрометеороидов) использует эффект ионизации вещества частицы и мишени [239\*], площадь мишени составляет примерно  $84 \text{ см}^2$ .

Мишень подключена к нулевому потенциалу, а на измерительные электроды через фильтр подается напряжение  $-200\text{В}$ . В результате влияния электрического поля положительно заряженные ионы летят в сторону измерительных электродов, с которых сигнал снимается с помощью зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ).

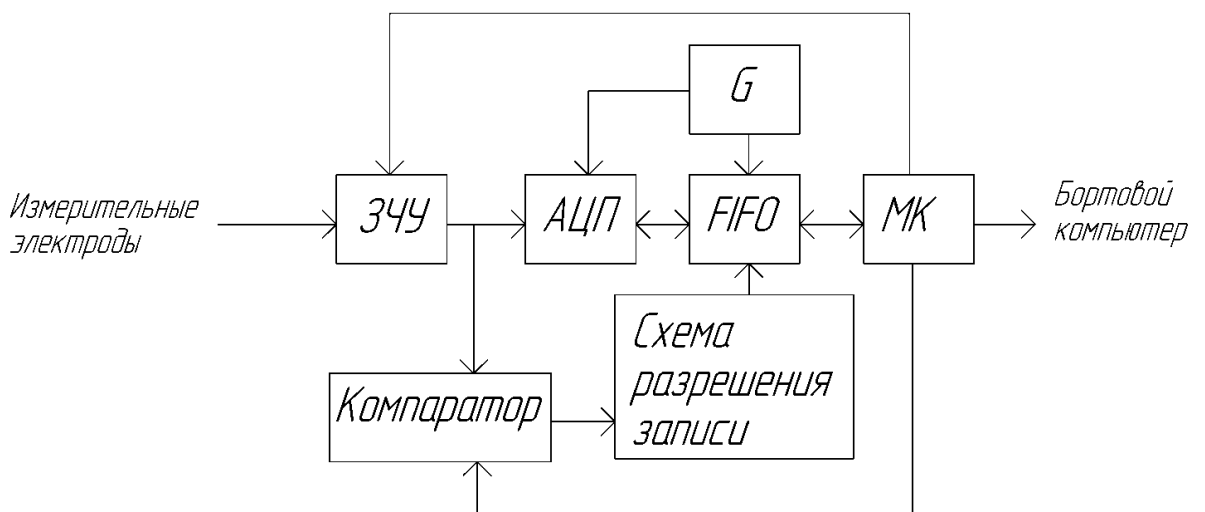
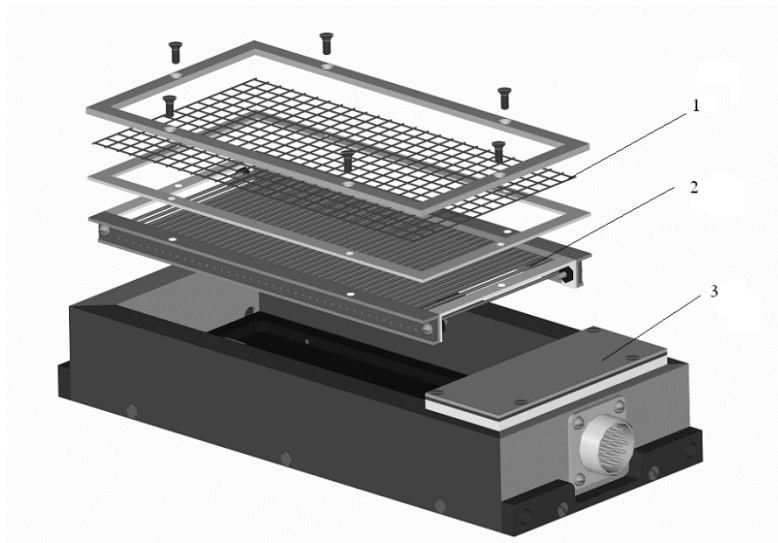


Рисунок 2.12 - Структурная схема датчика микрометеороидов и частиц космического мусора

ЗЧУ имеет перестраиваемый коэффициент усиления (100 или 1000), переключение коэффициента усиления осуществляется микроконтроллером (МК) ATmega 325. При приходе сигнала на ЗЧУ происходит срабатывание компаратора, запускающего схему разрешения записи, что приводит к записи полученной информации в память FIFO (SN74V263). В схеме использован АЦП параллельного типа с частотой тактирования от тактового генератора 8 МГц. 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 2.13 показаны способы крепления измерительных электродов и сетки заземления.



1 – Сетка заземления, 2 – измерительные электроды, 3 – верхняя обкладка датчика электризации

Рисунок 2.13- Конструкция ионизационного датчика аппаратуры МЕТЕОР

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 2.14, которые выполнены на микросхеме AD7415 с диапазоном рабочих температур  $-40...+125^{\circ}\text{C}$  и типичной точностью  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  при  $+40^{\circ}\text{C}$

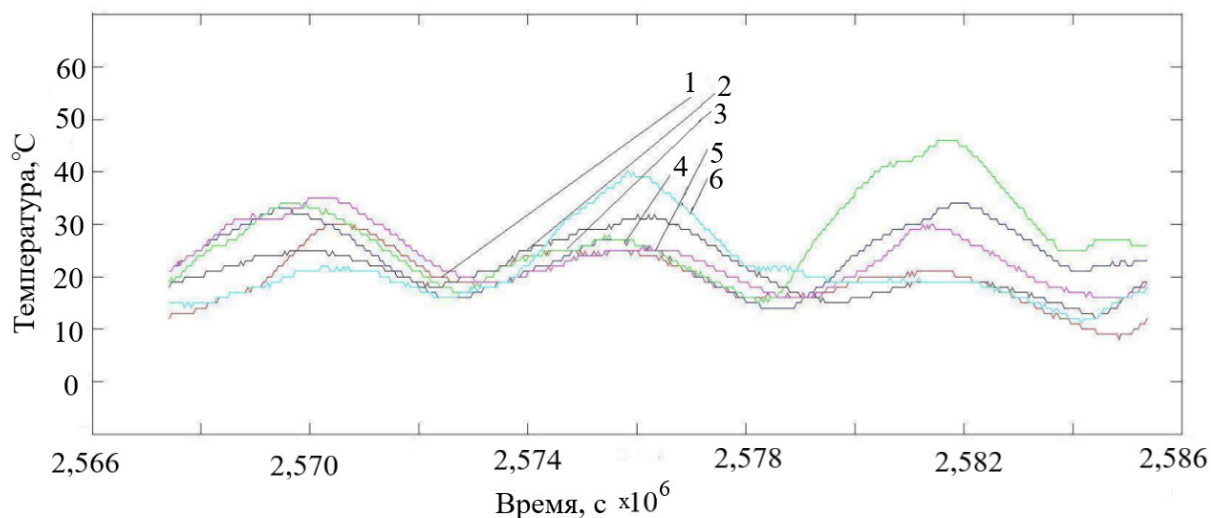


Рисунок 2.14 - Данные с температурного датчика в зависимости от времени

Согласно рисунку 2.14 максимальная температура составила  $47^{\circ}\text{C}$ , а минимальная температура  $10^{\circ}\text{C}$ . 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 [34]. 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 [34] (рисунок 2.15).

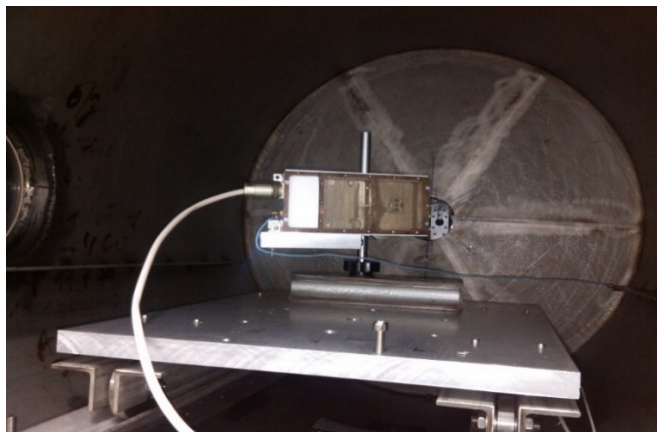


Рисунок 2.15 - Многопараметрический датчик аппаратуры МЕТЕОР в вакуумной камере ускорителя микрочастиц

Была проведена серия экспериментов с ионизационным датчиком, результаты которых приведены на рисунках 2.16, 2.7. На рисунке 2.16 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 [34, 286\*- 289\*].

Данные, полученные с датчика в результате космического эксперимента, 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:

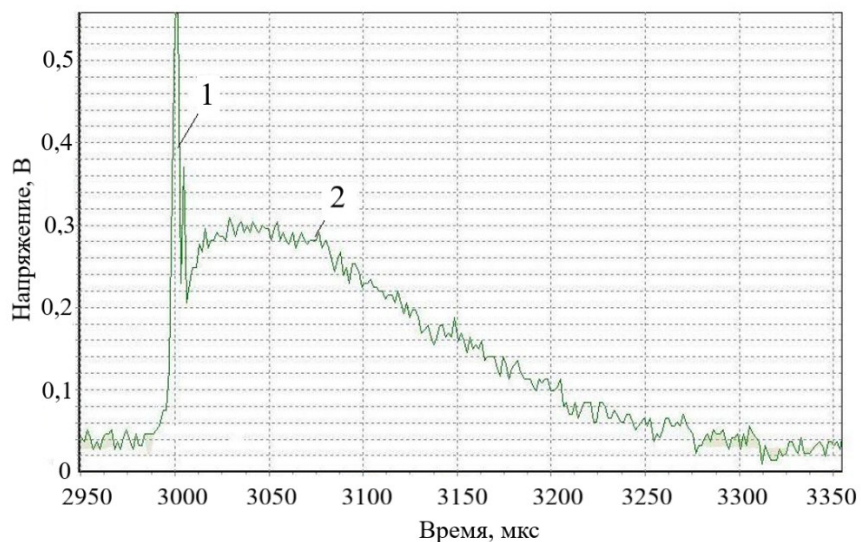
$$V_0 = \frac{L}{k \cdot \tau_\phi},$$

где  $\tau_\phi$  - передний фронт импульса,  $k = 0,8$  - коэффициент пропорциональности,  $L = 1$  см - расстояние между измерительным электродом и мишенью.

Далее вычисляется масса частицы согласно формуле [34]:

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

где  $c$ ,  $\alpha$  - const,  $R_{BX}$  - сопротивление входного усилителя,  $K_{\delta\eta}$  - коэффициент усиления,  $T_\delta$  - время дискретизации отчетов,  $U(T_i)$  - выборка в  $i$  - момент времени,  $N_{\max}$  - число дискретных отсчетов, характеризующих длительность входного импульса.



1 – зарядовая составляющая, 2 – ионная составляющая

Рисунок 2.16 - Ионный импульс

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 2.17.

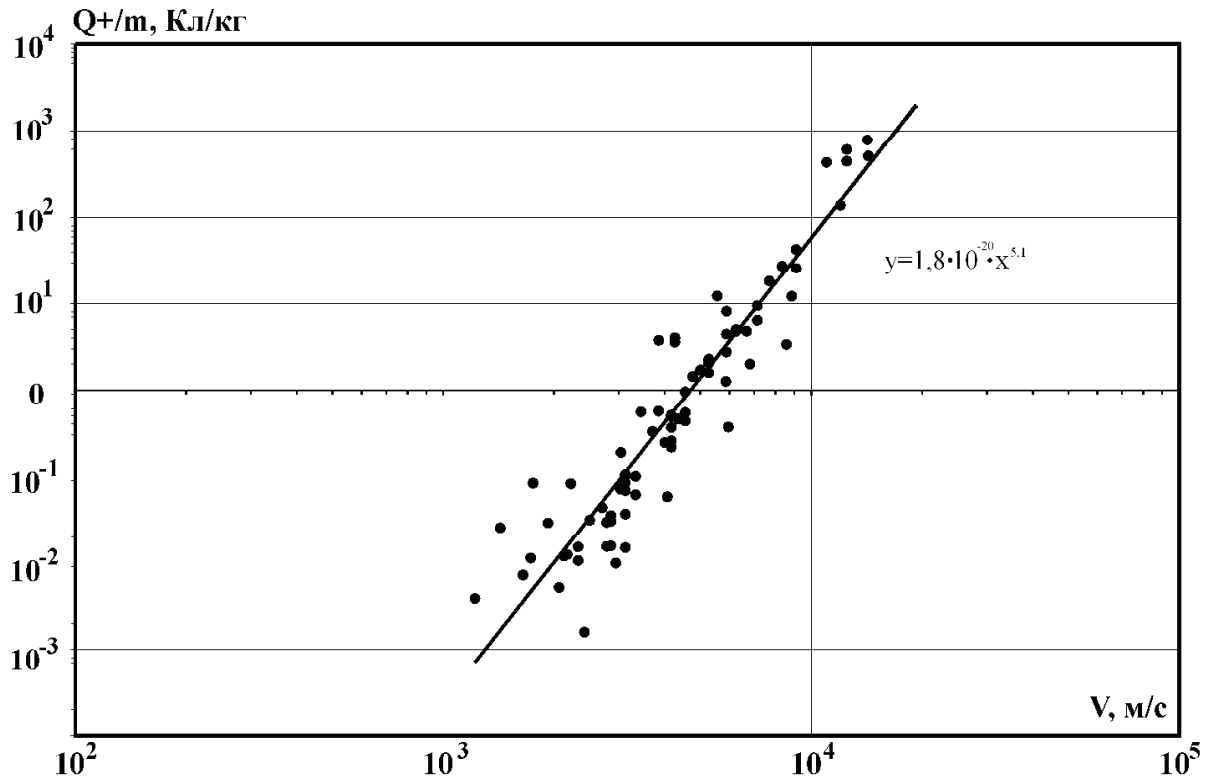


Рисунок 2.17 - Зависимость  $Q^+/m$  от скорости частицы

Из-за недостаточной энергии на борту МКА АИСТ, датчики за месяц полета проработали суммарно 12 часов, остальное время МКА АИСТ занимался реализацией других научных и служебных задач. В результате работы аппаратуры МЕТЕОР за указанное время было зарегистрировано несколько высокоскоростных частиц (микрометеороиды).

**Датчик электризации** служит для оценки возможных потоков заряженных частиц на поверхность МКА и динамики изменения поверхностного заряда [290\*].

Датчик электризации представляет собой конденсаторный датчик С (рисунок 2.18), 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 2.18), при этом происходит протекание тока от конденсатора С 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 С через резисторы R1 и

$R_2$ , поэтому можно пренебречь изменением напряжения на конденсаторе вследствие разряда.

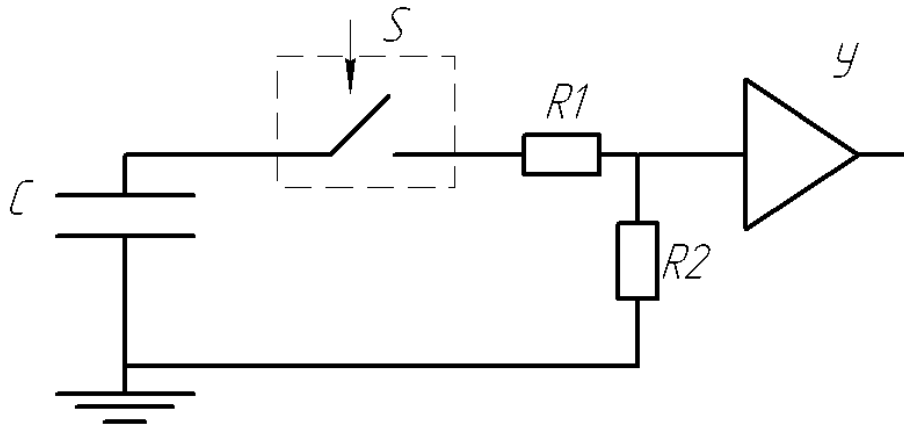


Рисунок 2.18- Функциональная схема датчика электризации

На рисунке 2.19 представлена зависимость потенциала от времени, полученная на одном из датчиков электризации аппаратуры МЕТЕОР в процессе 6 часового функционирования. Как видно из рисунка 2.19 потенциал на пластине имеет отрицательное значение, модуль которого уменьшается при повороте датчика на Солнце, что связано с эффектом фотоэлектронной эмиссии, вызванной ультрафиолетовым излучением [291].

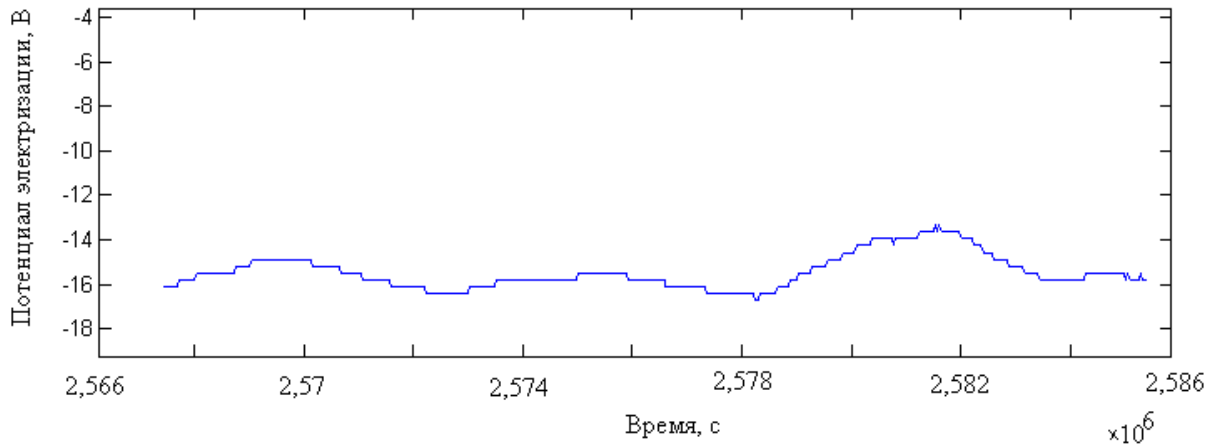


Рисунок 2.19 - Значение потенциала электризации на одном из датчиков

**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 2.20). Световой поток измеряется каждым фотодиодом по отдельности и анализируется уже МК датчика МЕТЕОР.

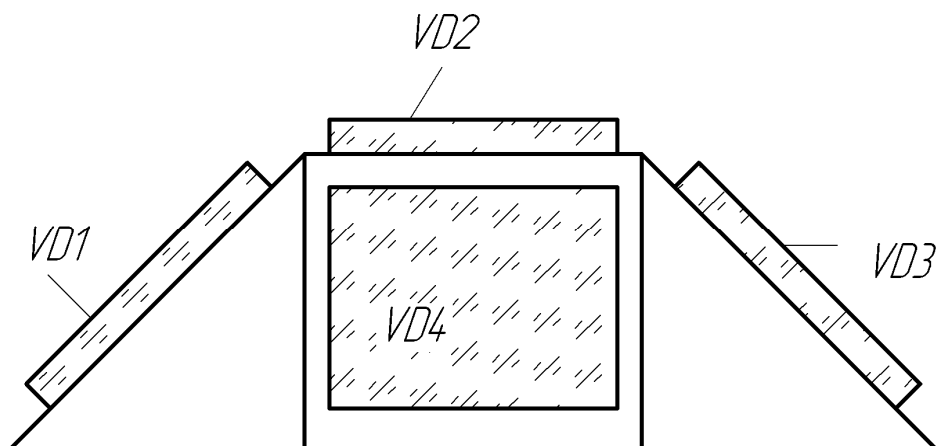


Рисунок 2.20 - Солнечный датчик: VD1, VD2, VD3, VD4, (VD5 находится на заднем плане рисунка) - фотодиоды

На основании данных с фотодиодов высчитываются углы (рис.2.21), определяющие положения источника света относительно датчика МЕТЕОР.

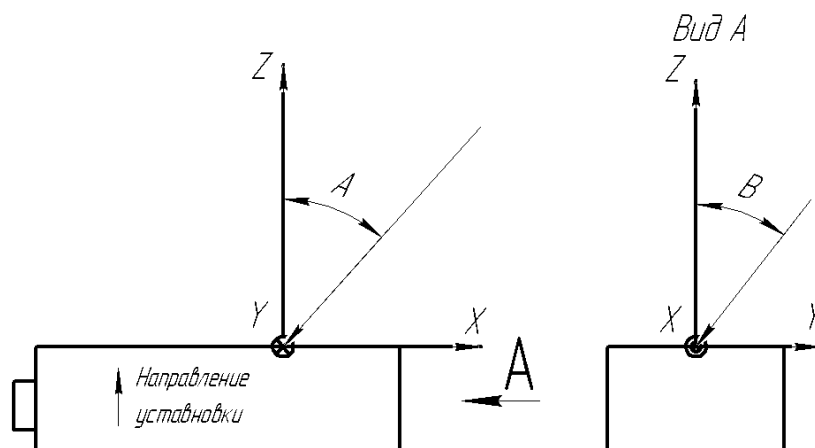


Рисунок 2.21 - Характерные углы, по которым оценивается положение датчика МЕТЕОР на Солнце

Результаты измерения представлены на рисунке 2.22. Согласно полученным данным также наблюдается периодичность изменения углов в зависимости от периода вращения МКА АИСТ вокруг земли и относительно центра масс.

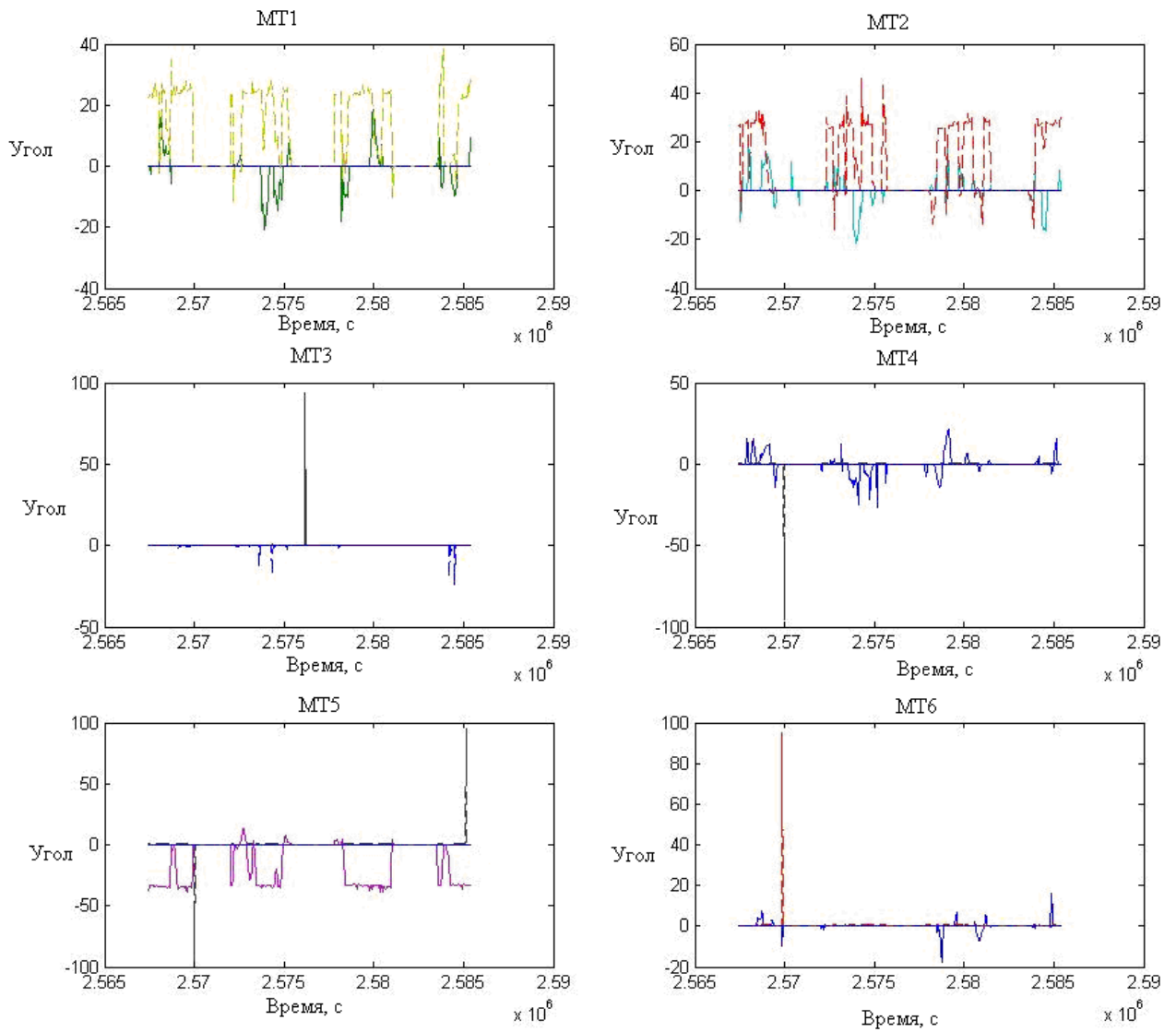


Рисунок 2.22 - Угол А ("—"), угол В("— -") для каждого из шести датчиков

### Результаты космического экспериментов с датчика микрометеороидов в течении года

Данные, полученные с датчика высокоскоростных микрочастиц, представленные в цифровой форме (рисунок 2.23), сильно зашумлены, что обусловлено внутренними и внешними шумами датчика. Эти шумы сильно затрудняют обработку экспериментальных данных и правильность оценки параметров высокоскоростных микрочастиц, поэтому для обработки использовалась цифровая фильтрация сигнала [292\*].

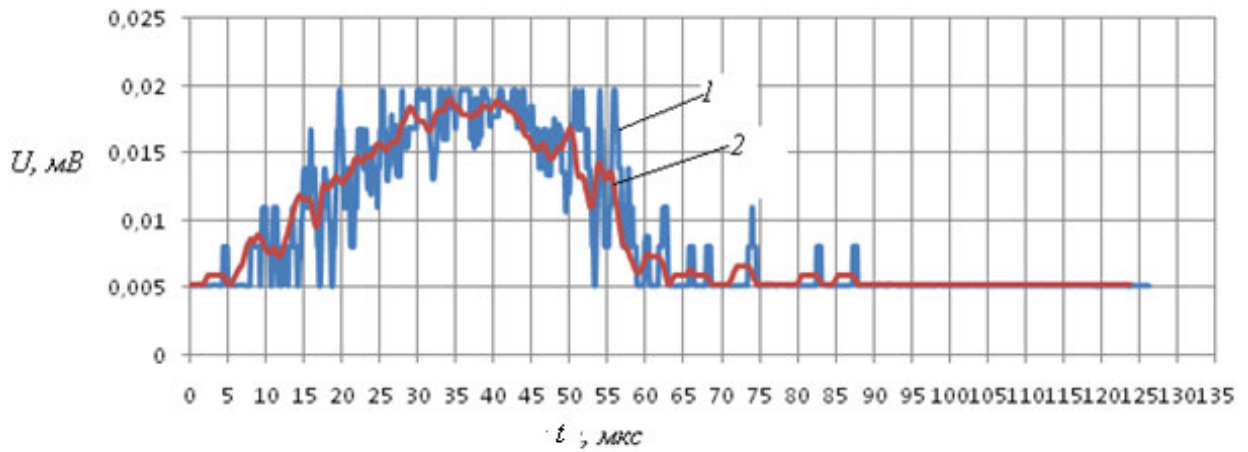


Рисунок 2.23 – Типовой сигнал с ионизационного датчика: 1 – измеренный сигнал, 2- сигнал после цифровой фильтрации

В процессе функционирования МКА АИСТ-1Т были зафиксированы случаи регистрации высокоскоростных частиц датчиками МТ (рисунки 2.24, 2.25).

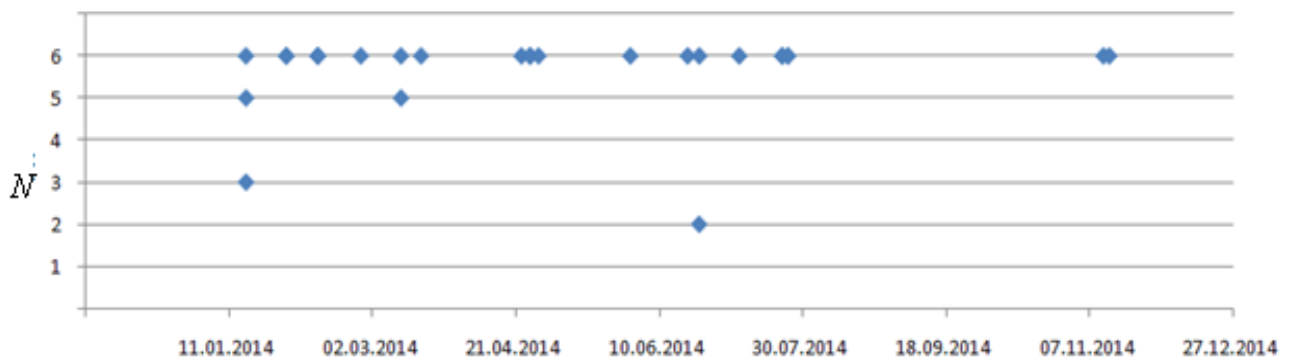


Рисунок 2.24 - Распределение частиц во времени в зависимости от номера датчика

В среднем за месяц работы было зарегистрировано две частицы при площади мишени для регистрации  $185 \text{ см}^2$  на один датчик. Как видно из рисунка 2.25 основная масса регистрируемых частиц обладала массой менее  $3 \cdot 10^{-7} \text{ г}$  и была зарегистрирована датчиком МТ6.

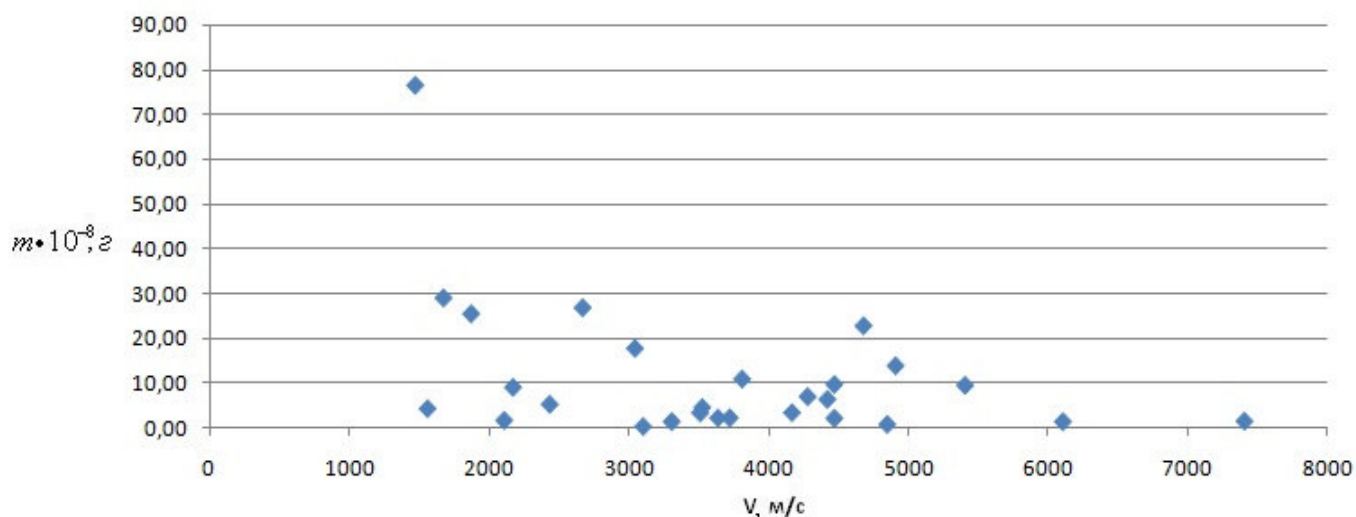


Рисунок 2.25– Соотношение между массой и скоростью зарегистрированных микрочастиц

### Краткие выводы

Научная аппаратура “МЕТЕОР” испытывалась на электростатическом ускорителе высокоскоростных частиц и в космических условиях полета МКА “АИСТ-1Т”, при этом было зафиксировано несколько высокоскоростных частиц (предположительно - микрометеороидов).

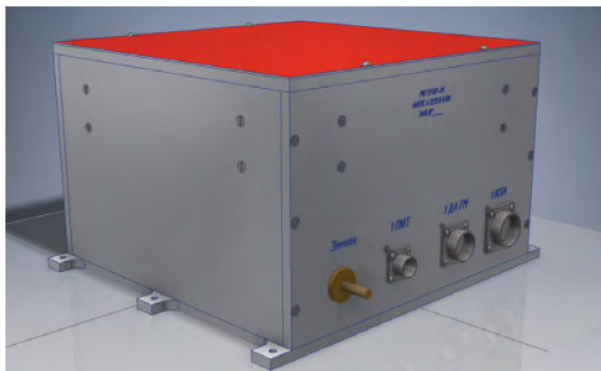
Датчики Солнце испытывались на стенде с источником света и в космических условиях. Получены временные зависимости угловых координат датчиков Солнца, расположенных на шести сторонах космического аппарата, которые позволяют скорректировать результаты стендовых испытаний.

Датчики потенциала электризации, расположенные на шести поверхностях МКА зафиксировали значения отрицательного потенциала в диапазоне  $-14\text{В} \div -16\text{В}$ .

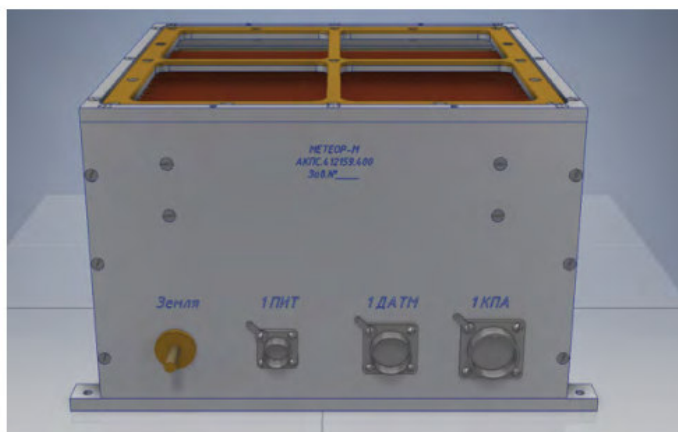
Разработанные датчики МТ позволили зарегистрировать параметры микрометеороидов и частиц космического мусора на околоземной орбите. Ионизационный метод является одним из самых чувствительных методов измерения [5\*, 34, 284, 291, 293], но также в связи с этим обладает и повышенной чувствительностью к внешним шумам. Использование одного метода измерения для оценки параметров микрометеороидов и частиц космического мусора возможно, но затрудняет интерпретацию полученных данных. В связи с этим рекомендуется для датчиков высокоскоростных микрочастиц использовать комбинированные методы, для однозначной регистрации микрометеороидов.

### 2.3 Прототип датчика ионизационного типа

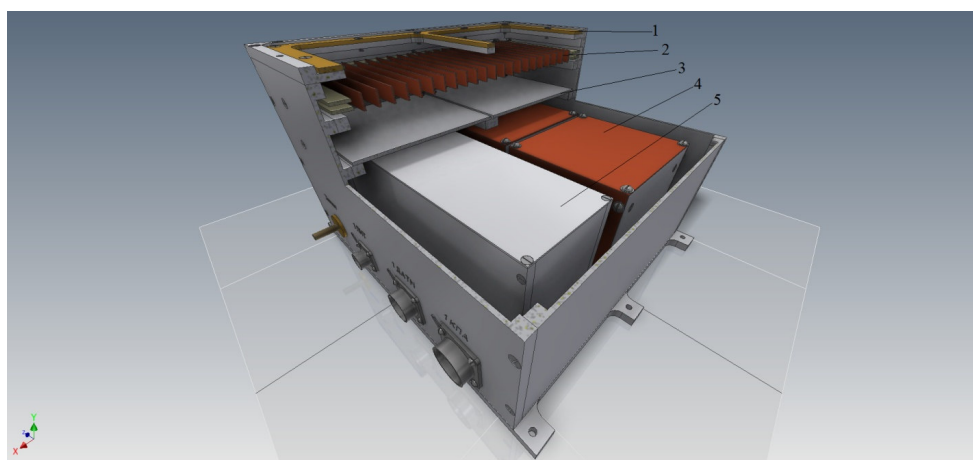
С целью повышения вероятности обнаружения высокоскоростных микрочастиц и повышения сбора ионов, соискателем был разработан прибор (детектор) на основе ионизационного принципа измерения с пластинчатыми электродами (рисунки 2.26-2.28) [102\*, 294\*, 295]. Была разработана и изготовлена конструкция и блок электроники прибора.



а)



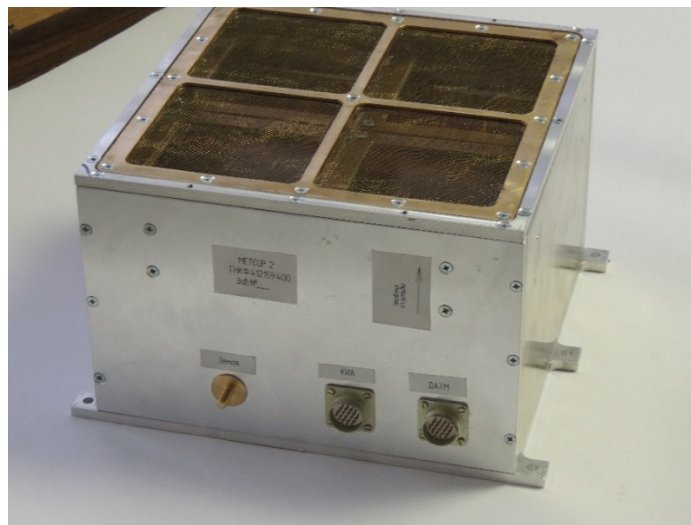
б)



в)



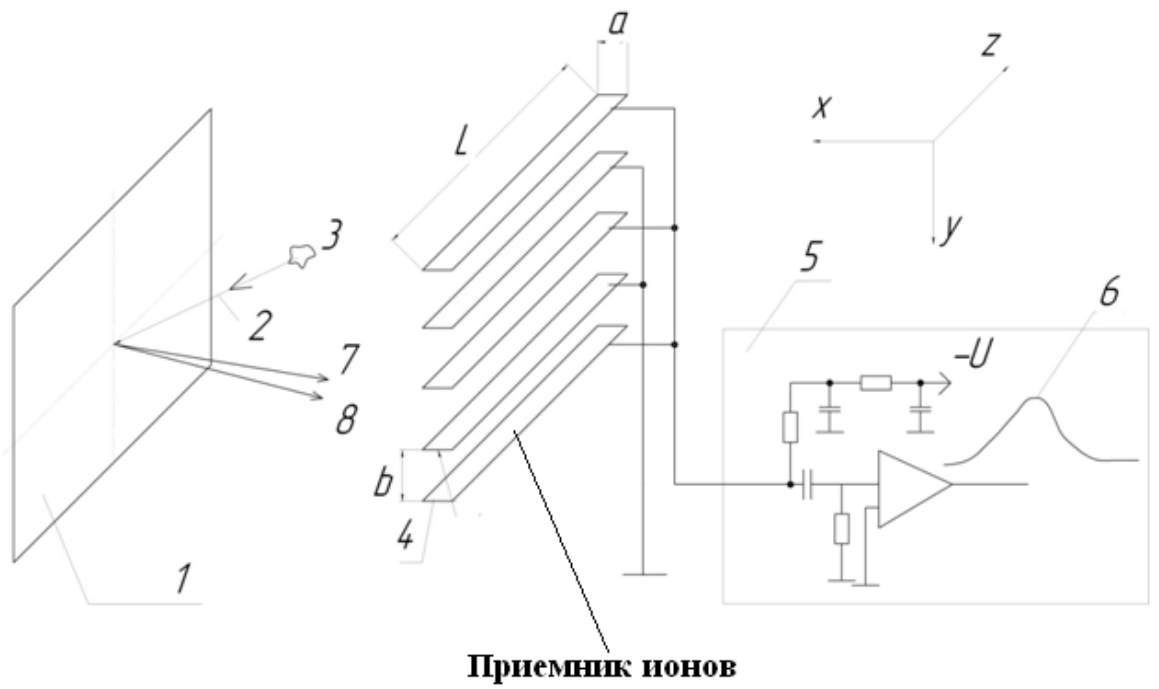
г)



д)

1-место крепления защитной сетки (заземленной на корпус детектора), 2- электроды, 3 - мишень, 4 - блок аналоговой части, 5 - блок цифровой части

Рисунок 2.26 – Прибор для регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора [295]: а, б, в -3Д модель прибора, г- фотография прибора с закрытой крышкой, д – фотография с открытой крышкой



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, 7,8 разлет ионов

Рисунок 2.27 – Схематическое изображение ионизационного детектора

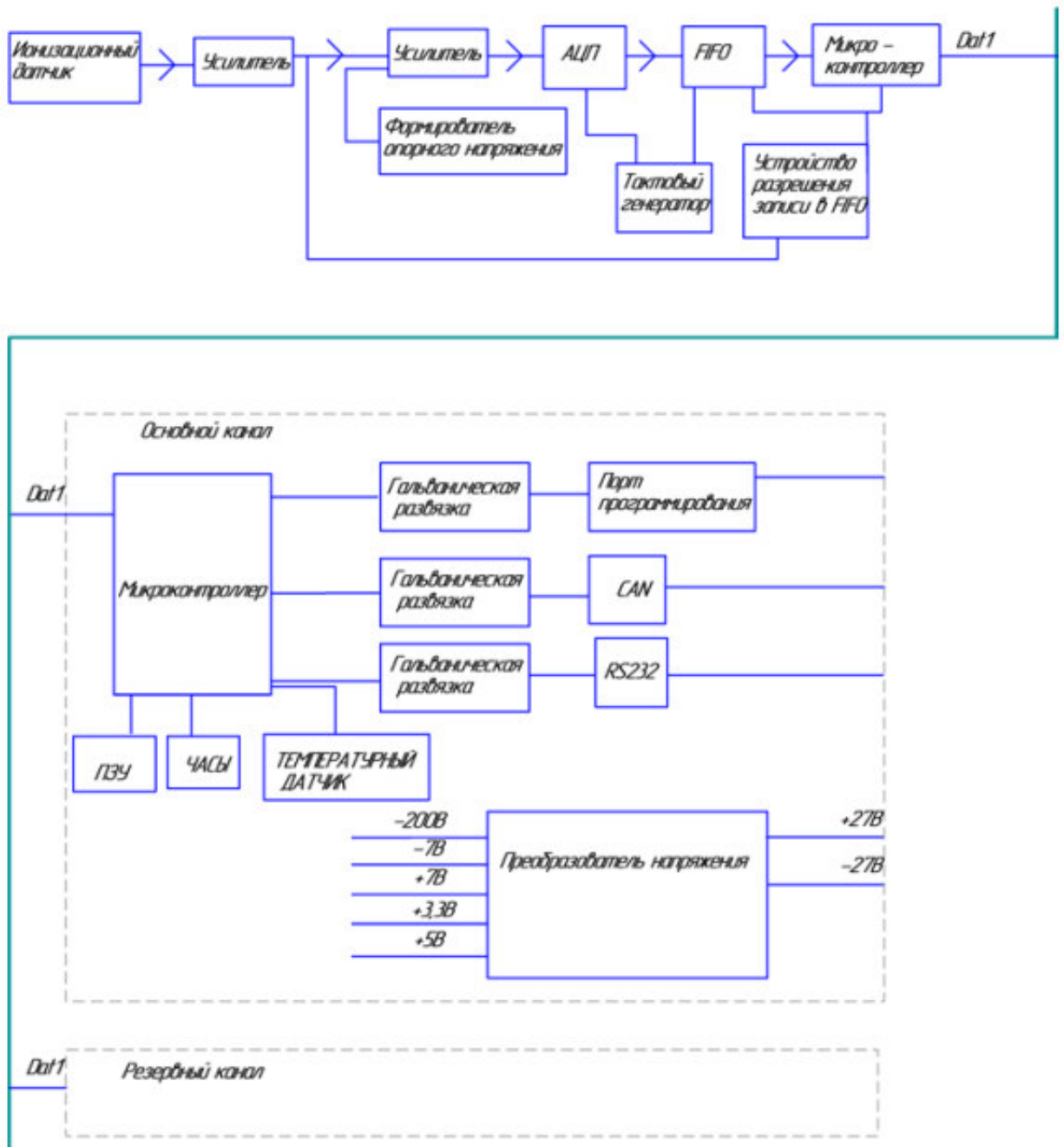


Рисунок 2.28 - Структурная схема НА

В космическом пространстве микрометеороиды и частицы космического мусора в большинстве случаев имеют некоторый заряд, который появляется на их поверхности вследствие воздействия на них факторов космического пространства (электронов, протонов). Поэтому, когда частицы пролетают через систему электродов приемника ионов, на них наводится заряд, пропорциональный заряду частицы. Пылевая частица 3 с высокой скоростью ударяется в мишень 1, при этом происходит образование ионов и электронов в зоне контакта микрочастицы и мишени. Мишень подключена к нулевому потенциалу, а на измерительные электроды через фильтр подается напряжение порядка -200В. В результате

влияния электрического поля, положительно заряженные ионы летят в сторону измерительных электродов 4, с которых сигнал снимается с помощью ЗЧУ.

В основе ионизационного метода измерения физических параметров космических частиц при высокоскоростном ударе лежит явление образования и эмиссии заряженных частиц (ионов, электронов) вещества ударника и мишени. Механизм данного явления в различных диапазонах скоростей различен и в рамках одной модели описание его не представляется возможным [47\*, 34].

Для диапазона скоростей 0,5...7 км/с справедливы модели термоэлектронной эмиссии и поверхностной ионизации [296], для диапазона 15...40 км/с принимается модель объемной ионизации; для скоростей выше 40...50 км/с – модель Томаса-Ферми. Наименее изученным остается ударное взаимодействие в интервале скоростей 6...15 км/с, решение поставленной задачи для которого сопряжено с целым рядом трудностей (учет сложных фазовых переходов вещества ударника и мишени и т.п.).

Суммарный заряд, образованный при высокоскоростном ударе ионов, можно вычислить согласно формулы [125\*, 297]:

$$Q^+ = C_1 \cdot m^\alpha \cdot V^\beta,$$

где  $\alpha = 0,9 \pm 0,1$ ,  $\beta = 2,8 \pm 0,5$ ,  $C_1$  - постоянная, зависящая от свойств материала мишени и конструкции ионизационного детектора,  $m$ ,  $V$  - масса и скорость частицы при ударе соответственно.

Скорость частицы определяется по измеренной длительности  $T$  наведенного в приемнике ионов заряда

$$T = C_2 \cdot V^{-1}$$

где  $C_2$  - постоянная, зависящая от конструкции ионизационного детектора.

Таким образом, информационный сигнал будет состоять из двух составляющих: наведенного заряда  $S_1$  и ионизационного импульса  $S_2$ , точные значения будут связаны с геометрией конкретного прибора (рисунок 2.29). При этом длительность наведенного заряда может составлять порядка 10-70 мкс, длительность ионизационного импульса порядка 150-600 мкс. Эксперименты для испытания таких детекторов проводят на ускорителях частиц [298]. В процессе лабораторного эксперимента на ускорителе микрочастиц было замечено, что много частиц с относительно небольшими скоростями наводили большой по амплитуде заряд на электроды. Это в первую очередь связано с тем, что эти частицы обладали большой массой, а значит, заряжались в инжекторе до большего значения

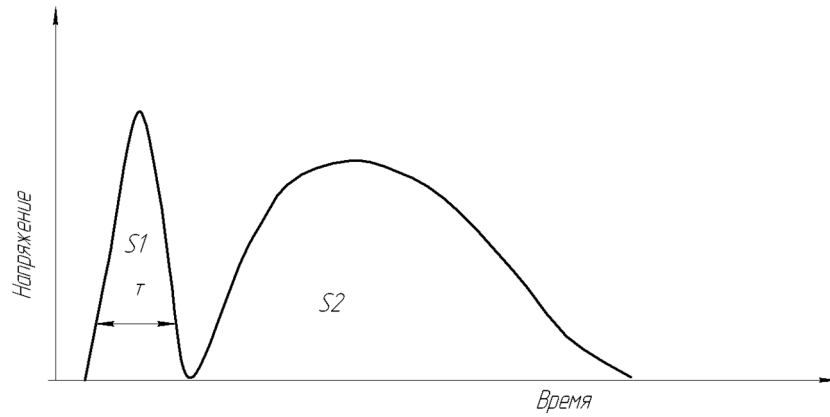


Рисунок 2.29– Сигнал на входе усилителя: S1- наведенный заряд, S2- ионизационный импульс

Исполнение приемной части детекторов может варьироваться в широких пределах, однако это сказывается исключительно на коэффициенте сбора ионов. Для подавления внешних шумов приемник ионов экранируется заземленной сеткой 1.

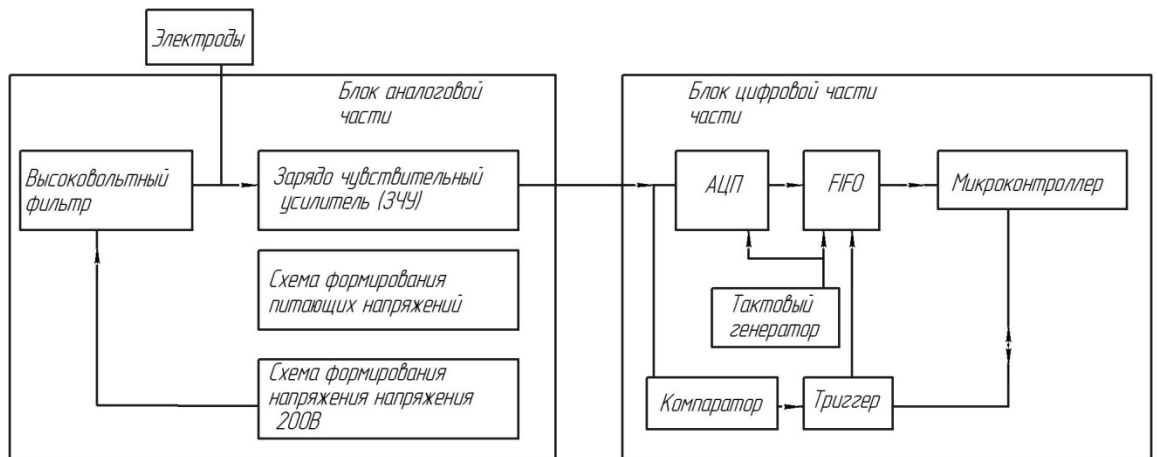


Рисунок 2.30 - Структурная схема блока обработки детектора

Согласно структурной схеме (рисунок 2.30) сигнал с электродов, усиленный ЗЧУ, поступает на АЦП конвейерного типа, которое преобразует полученный сигнал в цифровой код. Как только сигнал с ЗЧУ превышает заданное значение, при сравнении на компараторе, срабатывает триггер, который запускает запись в FIFO память, откуда потом с помощью микроконтроллера происходит считывание информации и передача ее пользователю.

### Модель расчета детектора

Рассмотрим конструкцию детектора с приемником ионов, выполненных в виде плоских пластин. Принцип измерения детектора основан на сборе ионов на электродах, поэтому для начала рассчитаем электростатическое поле в приемнике ионов. Электростатическое поле задается уравнением Лапласа [299]:

$$\Delta\varphi = 0,$$

где  $\varphi$  - потенциал электрического поля.

Численный расчет электростатического поля производился по пятиточечной схеме (рисунок 2.31) итерационным способом методом Якоби [299, 300]. При этом взяты следующие допущения: на границах потенциал поля равен 0В, что соответствует корпусу прибора, который заземляется.

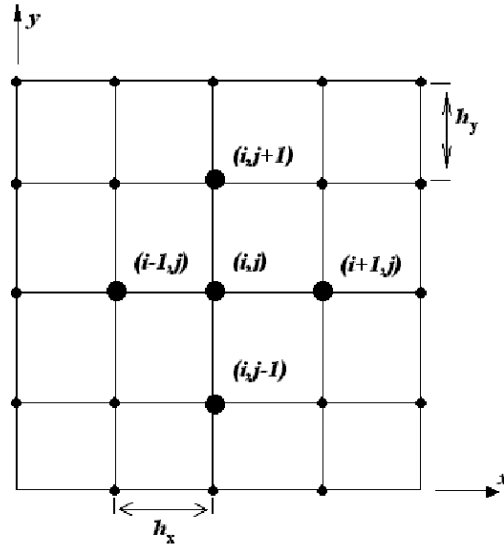


Рисунок 2.31 - Пятиточечная прямоугольная сетка [300]

$$\varphi_{i,j}^{(p+1)} = \frac{1}{4} \left( \varphi_{i-1,j}^{(p)} + \varphi_{i,j-1}^{(p)} + \varphi_{i,j+1}^{(p)} + \varphi_{i+1,j}^{(p)} \right),$$

где верхний индекс указывает на номер итерации.

На рисунке 2.32 представлены эквипотенциальные поверхности электростатического поля внутри прибора.

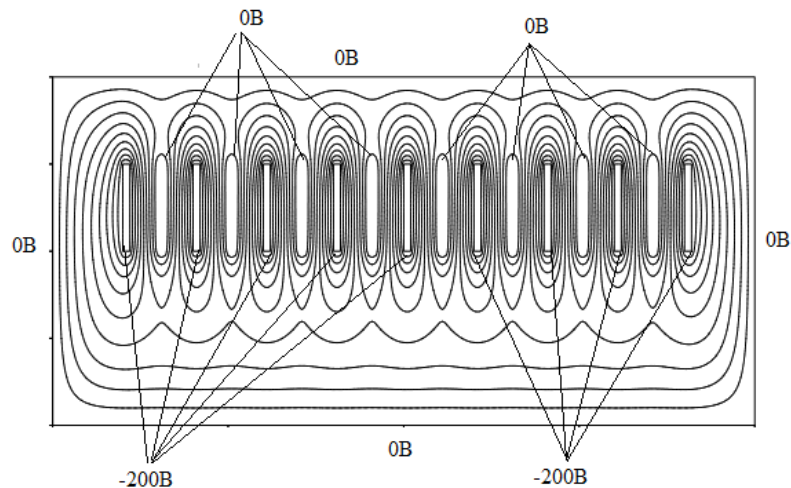


Рисунок 2.32 – Структура электростатического поля внутри блока при 9 электродах, находящихся под потенциалов -200 В и при 8 электродах, находящихся под потенциалом 0 В

Электроды под нулевым потенциалом необходимы для того, чтобы создать большую напряженность электрического поля, тем самым увеличив сбор ионов.

После расчета электростатического поля производится анализ множества траекторий полета частиц с точки зрения оценки сбора ионов электродами.

В период функционирования детектора возможны несколько ситуаций:

1) Частица пролетает через электроды и ударяет в мишень, при этом имеется наведенный импульс и ионный импульс.

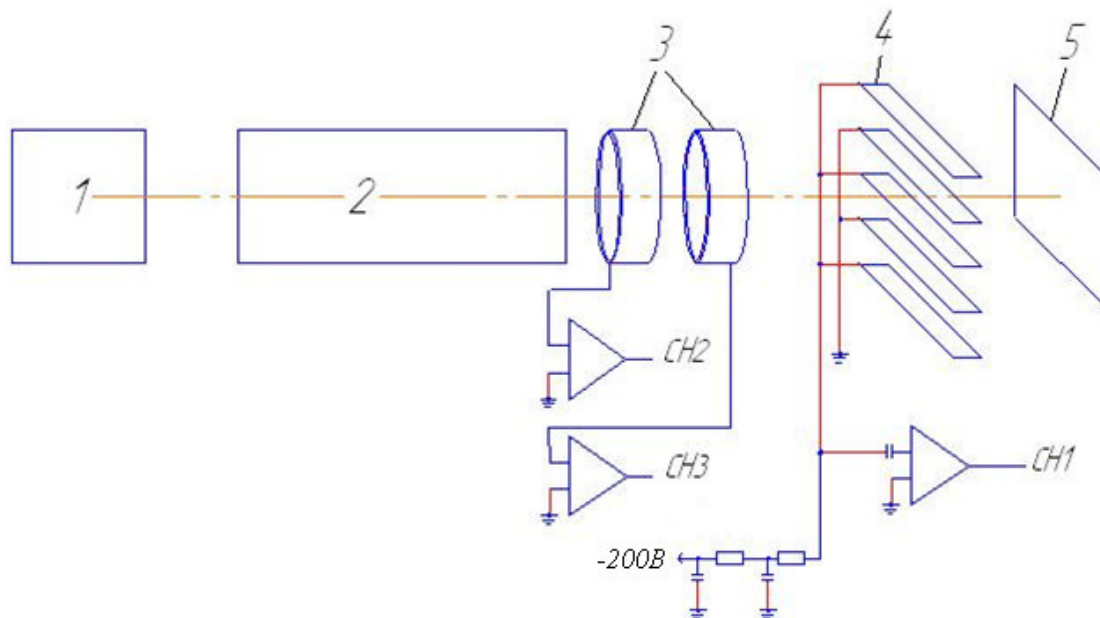
2) Частица ударяет в электрод под потенциалом  $-200$  В. В этом случае наблюдается скачок потенциала на входе усилителя

3) Частица ударяет в электрод под  $0$  потенциалом. В этом случае ионы практически полностью собираются электродом под потенциалом  $-200$ В за счет большей напряженности поля.

При относительно небольших скоростях микрочастиц (менее  $500 \div 600$  м/с) процесс ионообразования мал и ионный импульс не наблюдается.

### Методика проведения экспериментов

Для исследования был использован экспериментальный стенд на основе электростатического ускорителя частиц (рисунок 2.33) [298].



1 – Инжектор; 2 – Линейный электростатический ускоритель; 3 – кольца Фарадея; 4 – измерительные электроды (двухфазная штыревая решетка); 5 – мишень

Рисунок 2.33 - Блок – схема измерения

Принцип проведения эксперимента следующий (рисунок 2.33). Микрочастица заряжается в инжекторе. Потом под действием электростатического поля микрочастица

ускоряется до скоростей порядка 500-2500 м/с. Далее микрочастица ударяется в мишень 5, при этом происходит образование положительно заряженных ионов и электронов в зоне контакта микрочастицы и мишени. Мишень подключена к нулевому потенциалу, а на измерительные электроды через фильтр подается напряжение порядка -200В. В результате влияния электрического поля положительно заряженные ионы летят в сторону измерительных электродов 4, с которых сигнал снимается с помощью ЗЧУ [162\*].

Измерения проводились на электростатическом ускорителе [298]. В данном ускорителе микрочастицы из алюминия размерами от 1 до 10 мкм ударяли по мишени из медной фольги, нанесенной на слой диэлектрика. Медь содержит меньше примеси, чем алюминий, поэтому и ионизация наблюдается не каждый раз. Так как каждая частица в процессе работы ускорителя заряжается, то при пролете собирающих электродов на них наводится импульс тока (наведенный заряд). Так как скорости микрочастиц относительно небольшие, то процесс ионизации протекает слабо, практически нет объемной ионизации, а существует только поверхностная [47\*]. В экспериментах амплитуды сигналов на выходе ЗЧУ составляли 50÷250мВ в диапазоне скоростей частиц 500÷2500 м/с, что соответствует зарядам частиц ионов  $10^{-14} \div 10^{-15}$  Кл и менее.

#### **Анализ результатов экспериментов**

В ходе эксперимента, где по первому каналу регистрировался сигнал с измерительных электродов, по второму — с кольца Фарадея №2, а по третьему — с кольца Фарадея №1, был зафиксирован ряд последовательных сценариев развития процесса:

- 1) Микрочастица ударяется в кольцо Фарадея (рисунок 2.34);
- 2) Микрочастица ударяется в собирающие электроды (рисунок 2.35) (при этом частица сообщает электроду заряд, находящийся на ней и наблюдается скачок напряжения на выходе ЗЧУ);
- 3) Микрочастица пролетает через собирающие электроды при этом, наводя на них заряд и не наблюдается ионизационный импульс (рисунок 2.36);
- 4) Микрочастица пролетает через собирающие электроды при этом, наводя на них заряд и наблюдается ионизационный импульс (рисунок 2.37). По нашему мнению, это наиболее информативный случай.

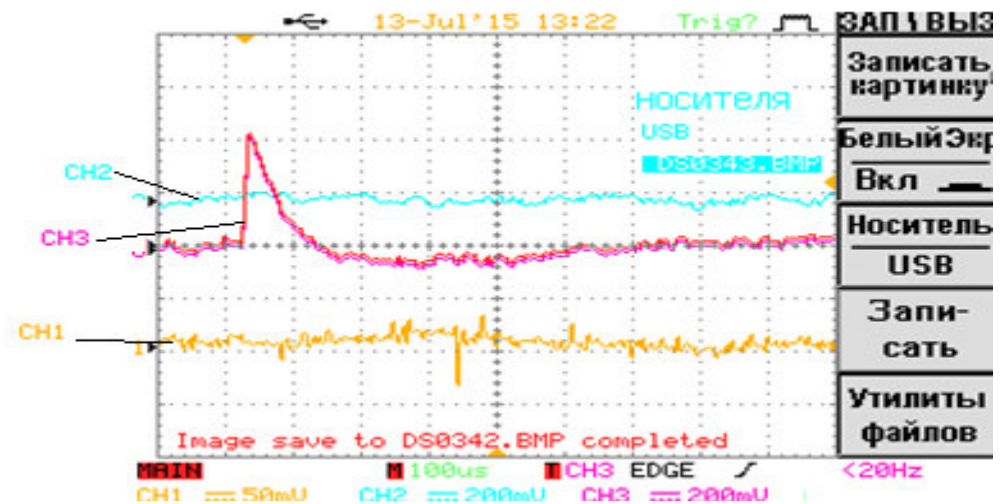


Рисунок 2.34 - Осциллограмма, когда микрочастица ударяется в кольцо Фарадея

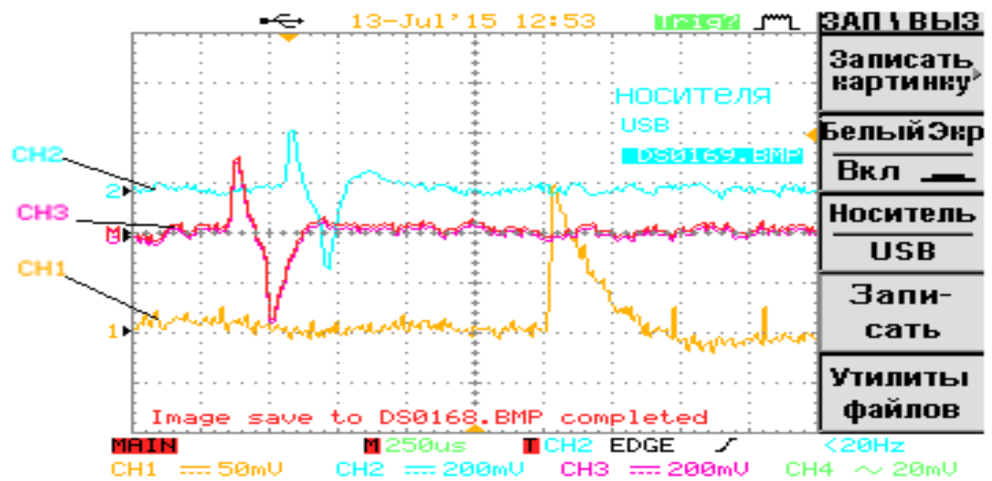


Рисунок 2.35 - Микрочастица ударяется в собирающие электроды

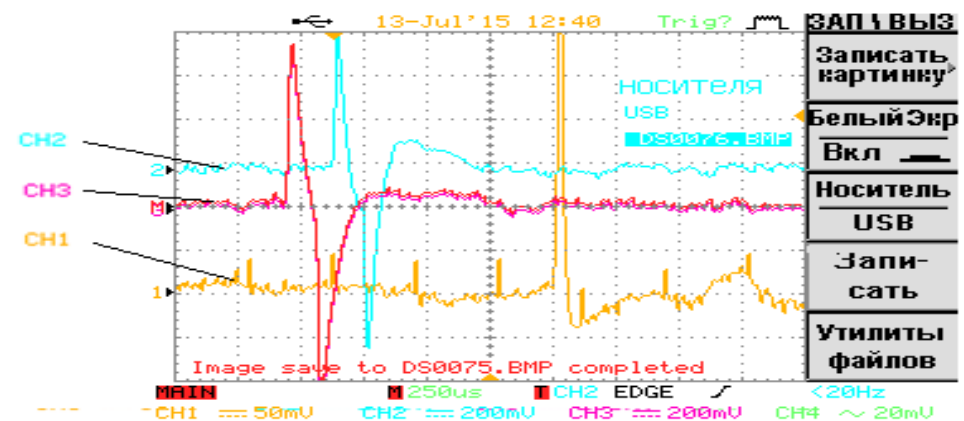


Рисунок 2.36 - Микрочастица пролетает через собирающие электроды, при этом наводя на них заряд, при этом не наблюдается ионизационный импульс

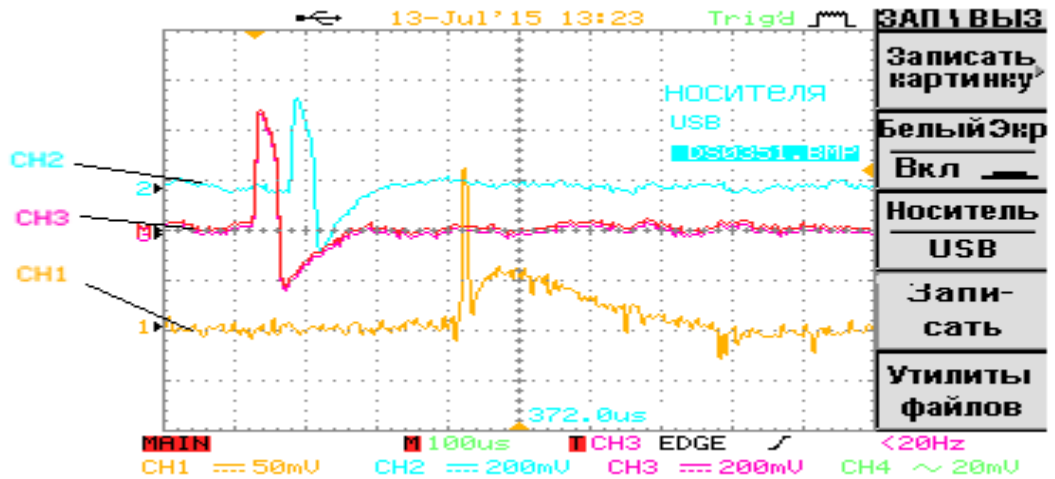


Рисунок 2.37 - Микрочастица пролетает через собирающие электроды, при этом наводя на них заряд, при этом наблюдается ионизационный импульс

Скорость высокоскоростной частицы была оценена по наведенному заряду путем сравнения длительности наведенного импульса и скорость частицы (рисунок 2.38).

Определить массу микрочастицы можно согласно экспериментально полученным данным, представленным на рисунке 2.39.

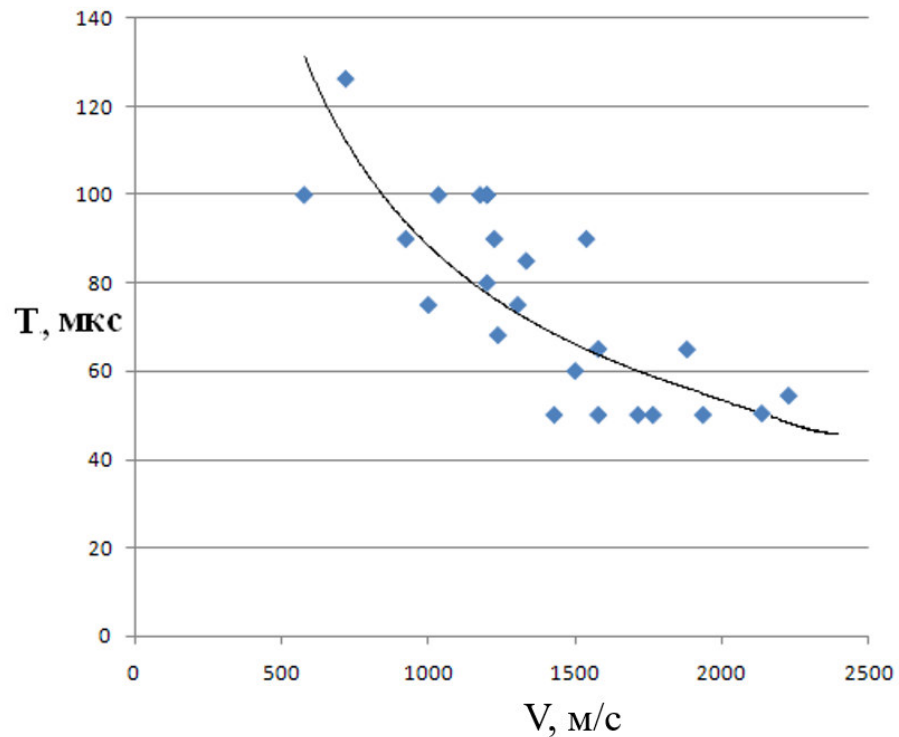
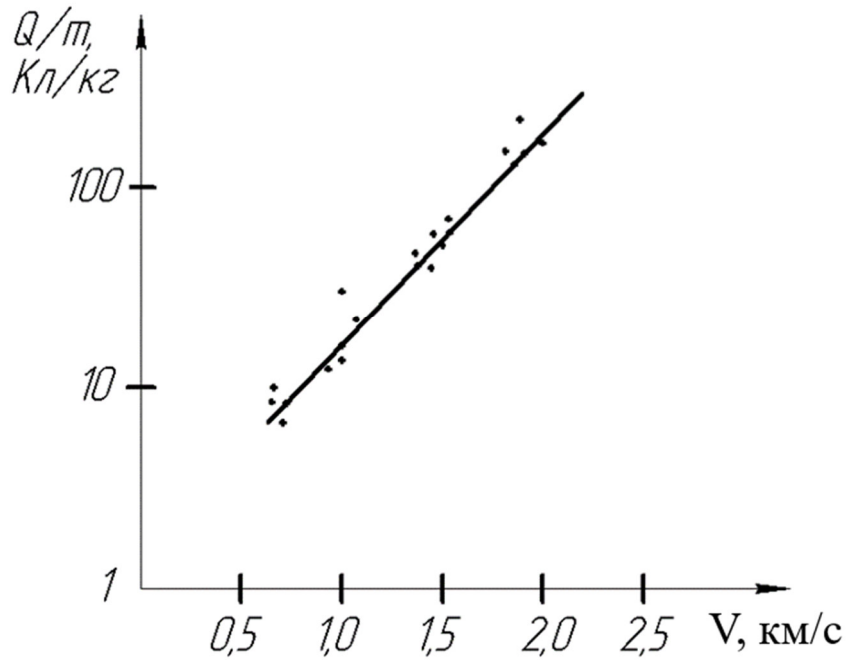


Рисунок 2.38- Графики зависимости длительности пролетного импульса от скорости частицы  $T = 12500 / V$

Рисунок 2.39 - График зависимости  $Q/m$  от скорости частицы

### Краткие выводы

Рассмотрена конструкция и принцип действия прибора для измерения параметров высокоскоростных микрочастиц ионизационного типа. Представленные экспериментальные результаты показывают многообразие форм импульсов тока с приемника ионов при различных соударениях высокоскоростных микрочастиц с элементами конструкции детектора (мишенью, электродами).

В диапазоне скоростей частиц  $500 \div 2500$  м/с минимальные величины сигналов с указанного типа приемника находятся на уровне шумов как 2 к 1, что затрудняет анализ характеристик объекта исследования. Эксперименты по регистрации зарядов при ударе соответствуют расчетным результатам поверхностной ионизации. Минимально регистрируемые заряды ионов находятся на уровне  $10^{-14} \div 10^{-15}$  Кл. Чувствительность детектора зависит от емкости приемника ионов и свойств мишени. Увеличение входной емкости детектора приводит к снижению уровню входных помех, при этом уменьшается коэффициент усиления входной цепи.

Ионизационный детектор позволяет определить скорость и массу частицы по двум зависимостям  $T=f(V)$  и  $Q^+ = C_1 \cdot m^\alpha \cdot V^\beta$ .

## 2.4 Наведенный импульс в ионизационном датчике

Наведенный сигнал используется очень часто для измерения параметров высокоскоростных микрочастиц.

В работе [94] приведена конструкция прибора, состоящего из позиционно чувствительной электродной системы. Типичный датчик для измерения траектории имеет четыре плоскости электродов, состоящие из 16 проволочных электродов каждый. Электроды каждой из плоскости направлены параллельно в одной плоскости и ортогонально относительно электродам соседних плоскостей. Датчик обладает высокой прозрачностью и механической прочностью, большой чувствительной областью. Недостатком такого прибора является большое количество усилителей и конструктивная сложность прибора [301\*].

В устройстве, приведенном в работе [95], дополнительно введен источник напряжения с целью измерения массы высокоскоростных микрочастиц путем контроля отклонения их траектории под действием электрического поля.

В работе [97] описано устройство для измерения двух составляющих вектора скорости при условии, что при измерении пренебрегают третьей составляющей вектора скорости. Такое устройство можно использовать для измерения потоков микрочастиц, летящих с заранее заданного направления.

В работе [103] описан новый подход к измерению траектории заряженной частицы пыли. Для вычисления скорости, траектории частиц используется анализ формы наведенного сигнала. В детекторе используется два полукруглых сеточных электрода. Моделирование, проведенное авторами, показывало, что выбранная концепция измерения является эффективным методом для маломощных и легких датчиков измерения траектории движения микрочастиц.

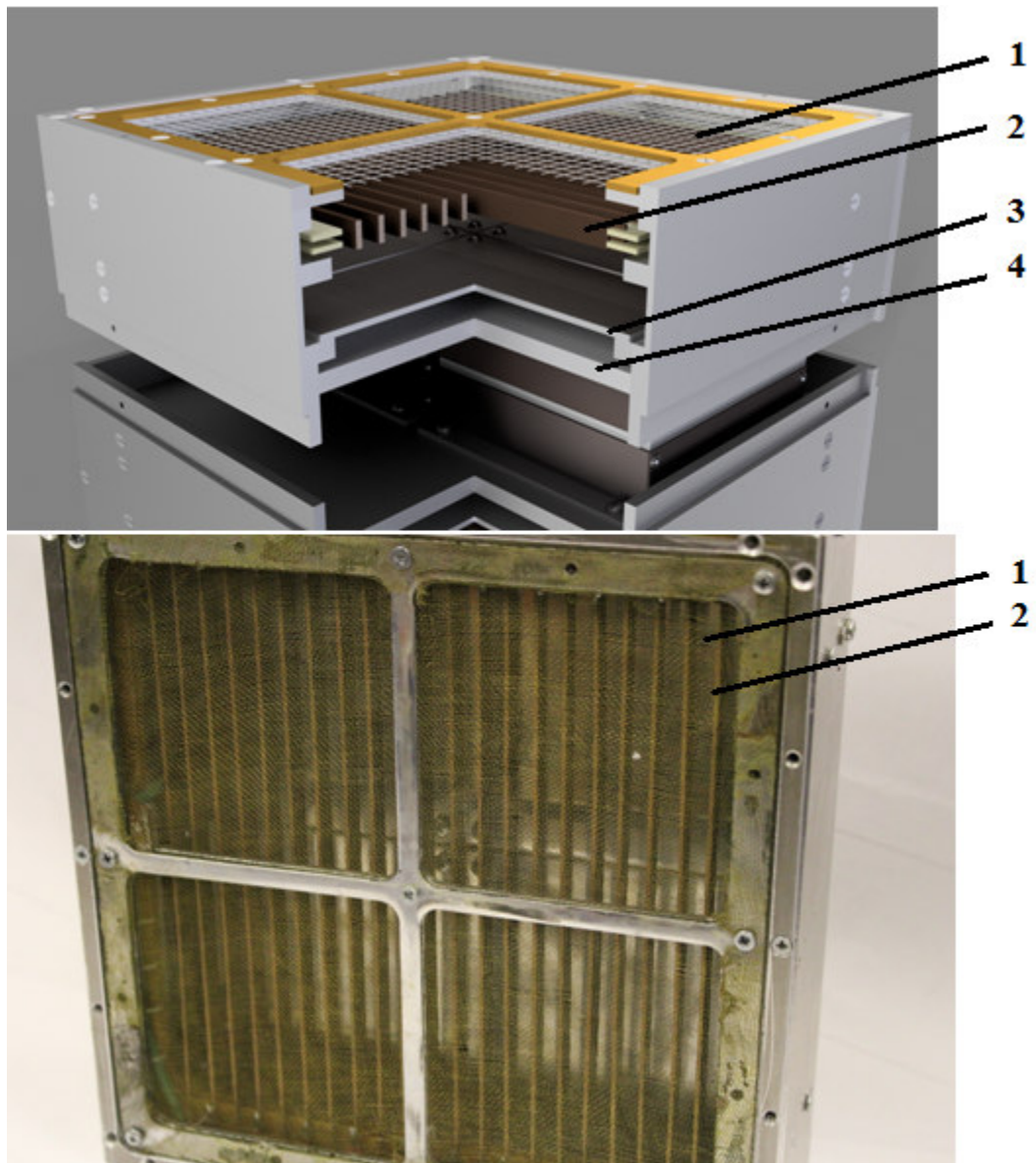
В представленных работах [93, 95-97, 302] приведены множество конструкций измерителей вектора скорости, обладающие как преимуществами, так и своими недостатками: необходимость использования большого количества усилителей [94], использование стороннего отклоняющего поля, измерение только двух составляющих вектора скорости. В работе [103] приведена плоская конструкция измерителя вектора скорости, что является с нашей точки зрения наиболее перспективным направлением для использования в космическом приборостроении, хотя при таком способе, скорее всего, будет снижена точность измерения из-за особенностей обработки информации. Подобный же принцип измерения был использован в работе [303]. В качестве измерителей координат пролета микрочастиц в работе [303] используются параллельные электроды в виде проводников, к которым подключены усилители. Для того чтобы правильно оценить

координаты пролета микрочастицы были заранее просчитаны несколько возможных выходных сигналов с измерительных усилителей для различных траекторий движения микрочастиц. Точность измерения составила порядка 0,5 мм.

В работе [102\*] рассмотрена конструкция и принцип работы ионизационного датчика высокоскоростных микрочастиц, который может быть использован для регистрации массы и скорости микрометеороидов и частиц космического мусора в околоземном пространстве [292]. В основу принципа измерения параметров микрометеороидов и частиц космического мусора лежит взаимосвязь параметров разлета плазмы, образовавшейся при высокоскоростном соударении микрочастицы с поверхностью датчика. При этом одним из важных параметров, который оказывает влияние на процессы при высокоскоростном соударении, является угол удара микрочастицы с мишенью [304]. Для расширения функциональных возможностей датчика высокоскоростных микрочастиц ионизационного типа, была поставлена задача проанализировать формы импульсов, снимаемых с измерительных электродах в зависимости от траектории движения заряженной микрочастицы.

#### **Краткое описание датчика высокоскоростных микрочастиц ионизационного типа**

Разработанный датчик представляет собой систему плоскопараллельных электродов (рисунок 2.40), при этом каждый нечетный электрод соединен с напряжением -200В, а четный электрод с напряжением 0В. При пролете микрочастиц (микрометеороидов и частиц космического мусора) через параллельные электроды, на них наводится определенный заряд, а при ударе микрочастиц о мишень происходит процесс ионообразования, если скорость частицы невелика, то процесс ионнообразования наблюдается слабо, либо не наблюдается вообще [102\*, 305\*].



1 – Защитная сетка, 2 – Измерительные электроды, 3 – Мишень, 4 – Корпус прибора

Рисунок 2.40 - Сверху изображена трехмерная модель датчика, снизу фотография датчика

### Моделирование формы импульса

Введем следующие допущения:

- 1) Размеры микрочастицы гораздо меньше размеров измерительных электродов.
- 2) Микрочастицы не ударяют в измерительные электроды. В случае удара об электрод, микрочастицы сообщают ему весь свой заряд [102\*].
- 3) Не учитывается конечность скорости распространения электромагнитных волн.

Заряженная микрочастица (микрометеороид или частица космического мусора), подлетая к измерительным электродам, как упоминалось выше, наводит на них импульс тока. Форма тока можно рассчитать с использованием теоремы Рамо-Шокли [99]. Согласно этой теореме, если в пространстве, в котором располагаются электроды со скоростью  $\vec{V}$  движется заряд  $Q$ , то на  $k$ - электрод наводится ток:

$$i_k(t) = Q \cdot (\vec{V} \cdot \vec{E}_k),$$

где  $\vec{E}_k$  — эффективная (взвешенная) напряжённость поля в точке, где находится заряд  $Q$  в момент времени  $t$ , рассчитанная по схеме: заряд удалён, потенциал проводника, с которого снимается ток, равен 1, потенциал оставшихся проводников равен 0 [98-100, 306].  $(\vec{V} \cdot \vec{E}_k)$  — скалярное произведение вектора скорости и эффективной напряженности.

Если учитывать параметры внешней измерительной цепи, которая подключенная через разделительный конденсатор большой емкости, то получим формулу, связывающий напряжения на нагрузки  $U_n(t)$  с наведенным током  $i_{ind}(t)$  [275, 276]:

$$\frac{d}{dt} U_n(t) + \frac{1}{R_H C} U_n(t) = i_{ind}(t) \frac{1}{C}$$

где  $R_H$  - входное сопротивление усилителя, подключенного к измерительным электродам,  $C$  - суммарная емкость электродов и паразитной емкости нагрузки.

Считаем, что  $R_H$  бесконечно велико (на практике эта величина порядка от 5 до 10 МОм), тогда получаем следующее:

$$\frac{d}{dt} U_n(t) = i_{ind}(t) \frac{1}{C}$$

Или переписать в виде:

$$U_n(t) = Q \cdot \varphi^*(t) \frac{1}{C},$$

где  $\varphi^*(t)$  — эффективный потенциал поля в точке, где находится заряд  $Q$  в момент времени  $t$ .

Таким образом, зная  $\varphi^*(t)$  в определенный момент времени  $t$  и зная  $U_n(t)$ , можно рассчитать заряд частицы  $Q$ .

Тогда получим, что

$$\varphi_{ind}^*(t) = Q \cdot \varphi^*(t),$$

где  $\varphi_{ind}^*(t)$  - потенциал, наведенный на электродах при условии, что емкость  $C=1$ .

Так как в нашем случае рассматривается датчик с электродами в виде пластин, то наведенный импульс напряжения, возбуждаемый на электродах, заряженной микрочастицей, пролетающей между электродами можно описать моделями, разработанными для заряженных частиц в плоском конденсаторе [275, 276]. Тогда получим, что

$$\varphi_{ind}^*(t) = Q \cdot \frac{l}{d},$$

где  $l$  - кратчайшее расстояние от электрода под 0 потенциалом до точки расположения заряженной микрочастицы;  $d$  - расстояние между электродами.

При движении микрочастицы в поле плоского конденсатора изменение координаты микрочастицы параллельно плоскости электродов не приводит к изменению наведенного на электроды заряда, поэтому изменение амплитуды наведенного заряда во время его движения внутри плоского конденсатора связано только с перпендикулярной относительно плоскости электродов составляющей вектора скорости микрочастицы.

### Результаты моделирования

На рисунке 2.41 представлена осциллограмма наведенного импульса, измеренного на ускорителе заряженных микрочастиц согласно методике, приведенной в работе [34].

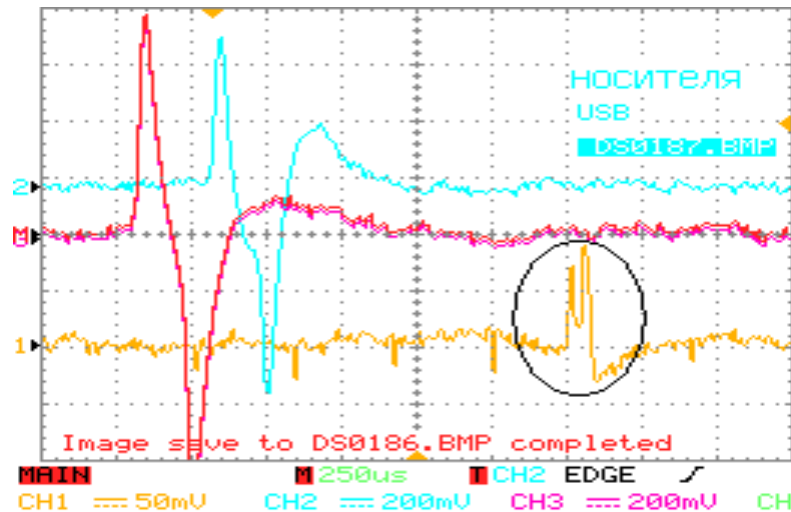


Рисунок 2.41 - Пример наведенного сигнала с датчика (обведен овалом)

Рассмотрим численный способ расчета наведенного на электроды потенциала. Сначала численными методами был рассчитан эффективный потенциал поля внутри прибора (рисунок 2.42). На рисунке 2.42 показаны также обозначения геометрических размеров  $h_1, h_2, h_3, h_4, h_5$ , которые используются в последующих рисунках.

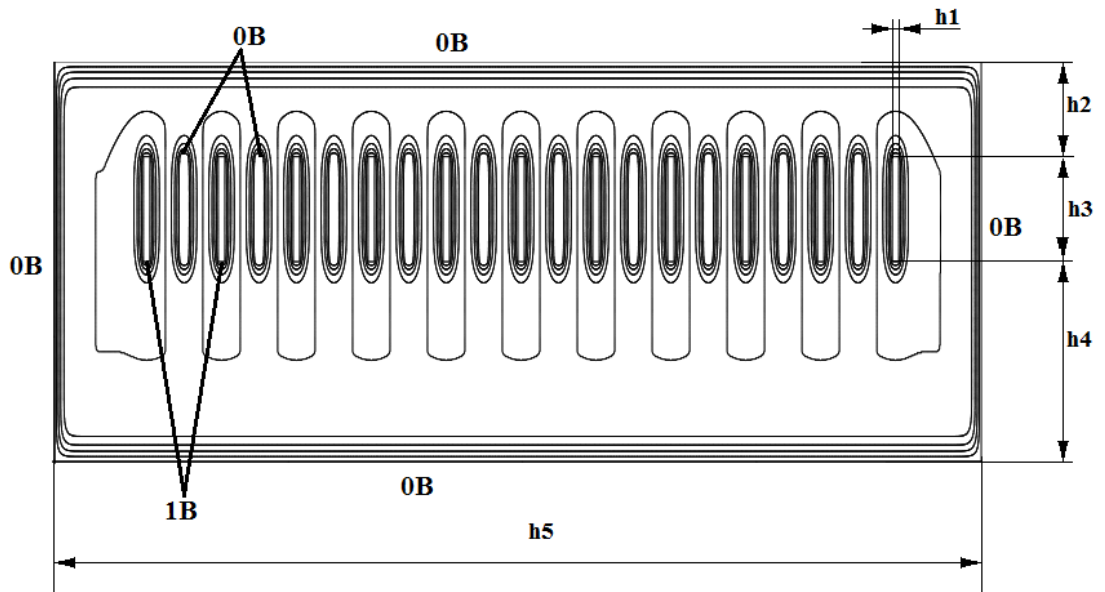


Рисунок 2.42 - Картина распределения электростатического потенциала вблизи измерительных электродов

Как видно из рисунка 2.42 картина эквипотенциальных линий электростатического поля периодична и отличается в основном только на боковых электродах, а значит, на наведенный сигнал в первом приближении оказывает малое влияние значение между какими электродами пролетела микрочастица.

Траектории движения микрочастицы показаны на рисунке 2.43, 2.45. На рисунках 2.44, 2.46 показано ожидаемые осциллограммы, по оси абсцисс отложено произведение скорости микрочастицы на время, при этом было принято, что  $C=1$ ,  $Q=1$ .

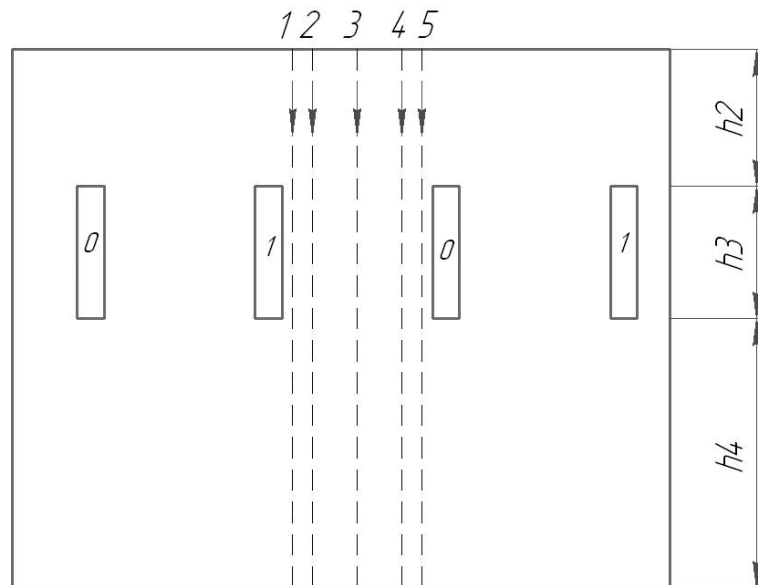


Рисунок 2.43 - Траектории полета микрочастицы в датчике. 0-нулевой электрод, 1 – электрод, на котором измеряется наведенный сигнал

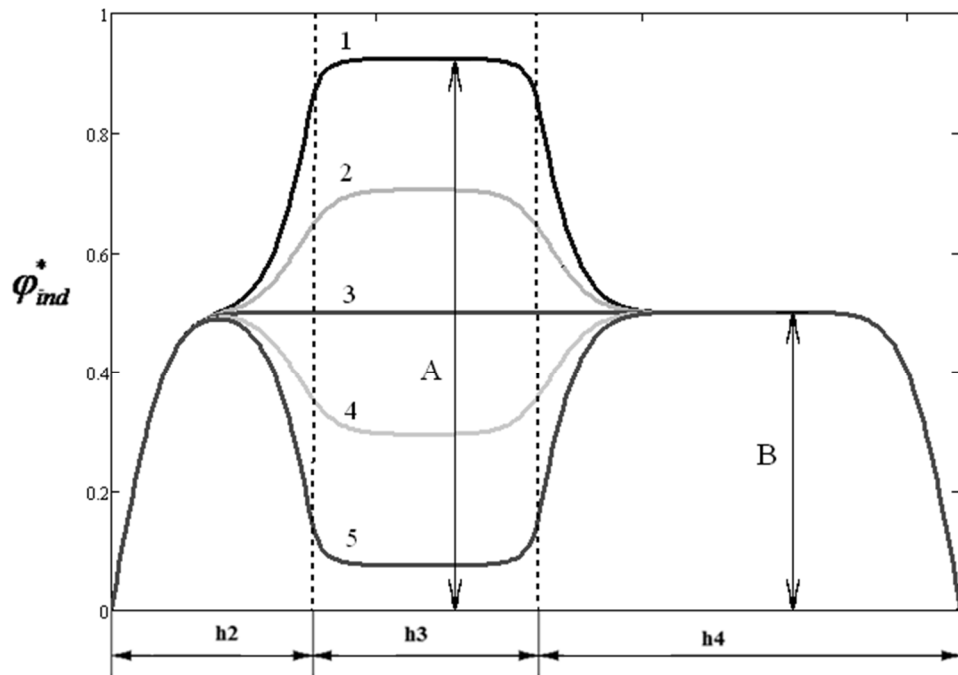


Рисунок 2.44 - Рассчитанные осциллограммы наведенного на электродах потенциала в координатах расстояния (нумерация траекторий соответствует рисунок 2.43)

Согласно рисункам 2.43 и 2.44 определение траектории зависит от отношения  $A/B$ .

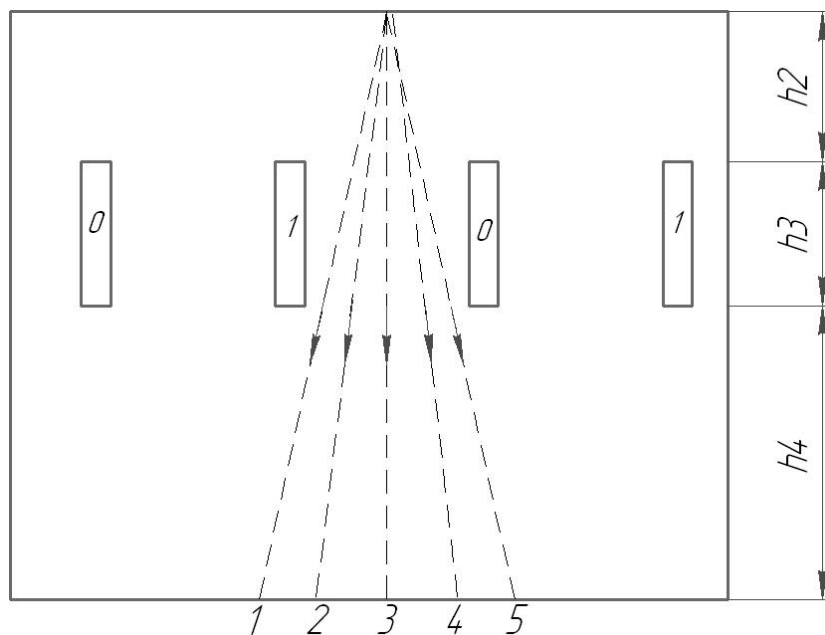


Рисунок 2.45 - Траектории полета микрочастицы в датчике при вариации угла влета (1- (-10 градусов); 2 - (-5 градусов); 3 - (0 градусов); 4 - (+5 градусов); 5 - (+10 градусов)).

0-нулевой электрод, 1 –электрод, на котором измеряется наведенный сигнал

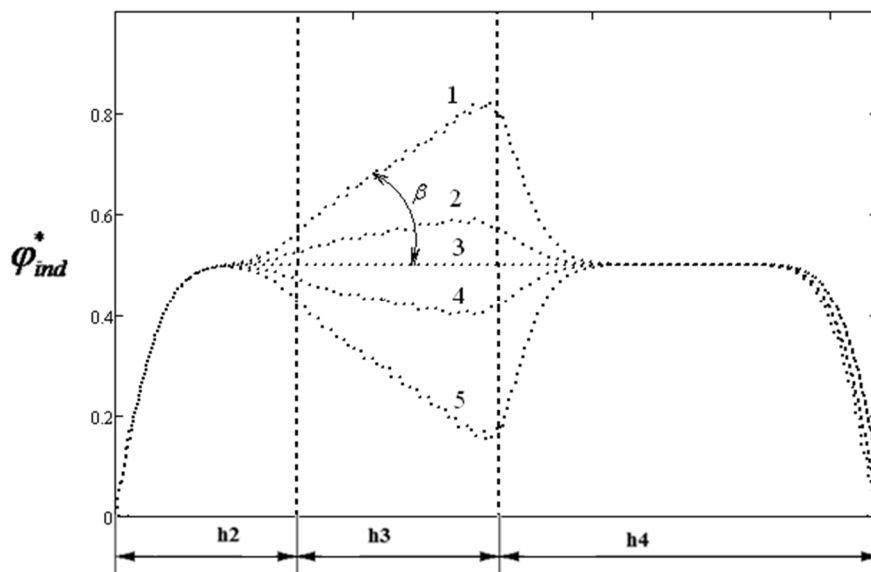


Рисунок 2.46 - Рассчитанные осциллограммы наведенного на электродах потенциала в координатах расстояния (нумерация траекторий соответствует рис. 2.45)

Согласно рисункам 2.45 и 2.46 угол влета микрочастицы соответствует углу  $\beta$ .

Для того, чтобы анализировать наведенный сигнал необходимо его записать в память. В работах [307\*, 308\*] рассмотрена реализация цифрового модуля регистрации сигнала, который позволяет записать сигнал, полученный с входного усилителя (рисунок 2.47).

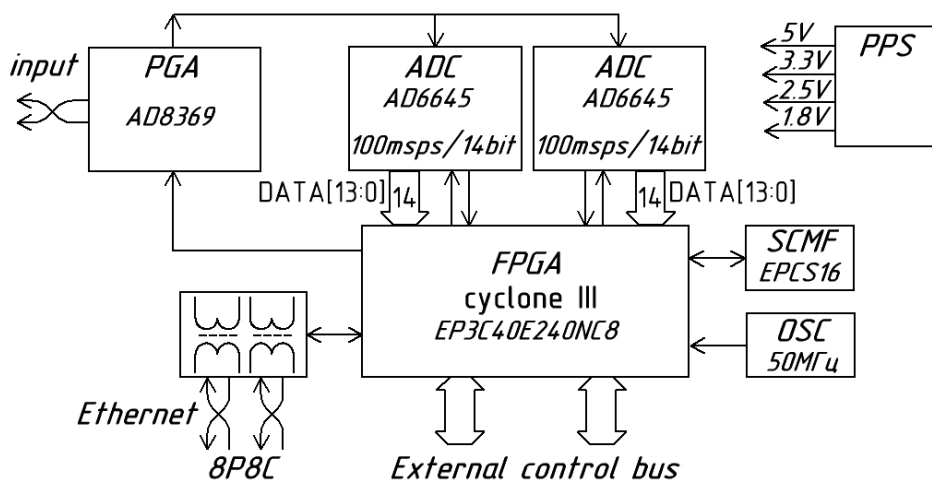


Рисунок 2.47 – Структурная схема модуля регистрации сигнала

Дальнейшим направлением разработки, с нашей точки зрения, является использование синтезированного микроконтроллера внутри ПЛИС, что позволяет упростить схему цифрового модуля регистрации сигнала датчиков микрометеороидов и частиц космического мусора за счет исключения из структуры схемы внешнего

микроконтроллера. Микроконтроллер в составе цифрового модуля регистрации сигнала отвечает за связь с ПК, управление ПЛИС и входным усилителем.

### **Краткие выводы**

Было показано, что траектория движения заряженной микрочастицы влияет на форму наведенного импульса в датчике микрометеороидов и частиц космического мусора ионизационного типа. Для того чтобы оценить заряд микрочастицы надо знать напряжение на выходе измерительной схемы в определенны момент времени и эффективный потенциал в точке пространства, где располагается микрочастица в данный момент времени. Анализ показал, что эффективный потенциал одинаков для любой траектории только в начальный момент влета частицы в зону между сеткой заземления и мишенью.

В проведенных расчетах формы наведенного импульса не учитывается компонента вектора скорости микрочастицы, расположенная параллельно электродам и мишени. Изменение конфигурации системы измерительных электродов, конечно, приводит и к изменению формы импульсов наведенного тока. При этом аналитическое описание наведенного импульса во многих случаях затруднено. Поэтому предлагается использовать численные способы расчета наведенного импульса, как показано в данной работе и работах [307\*, 309].

При анализе реального сигнала возникнет сложность, связанная с зашумленностью сигнала и влиянием параметров измерительных цепей. Предлагается в дальнейшем использовать дополнительную фильтрацию сигнала, а также рассмотреть возможность использование нейронных сетей.

## **2.5 Описание конструкции прибора МЕТЕОР-М ионизационного принципа действия**

В Институте космического приборостроения Самарского университета, в соответствии с международным контрактом с Пекинским институтом инженерии космического пространства, соискателем была разработана и изготовлена научная аппаратура, предназначенная для регистрации и исследования параметров высокоскоростных микрочастиц с использованием ионизационного принципа измерения (рисунки 2.48-2.50) [271\*, 307\*].



Рисунок 2.48 – Фотография научной аппаратуры в вакуумной камере ускорителя  
микрочастиц

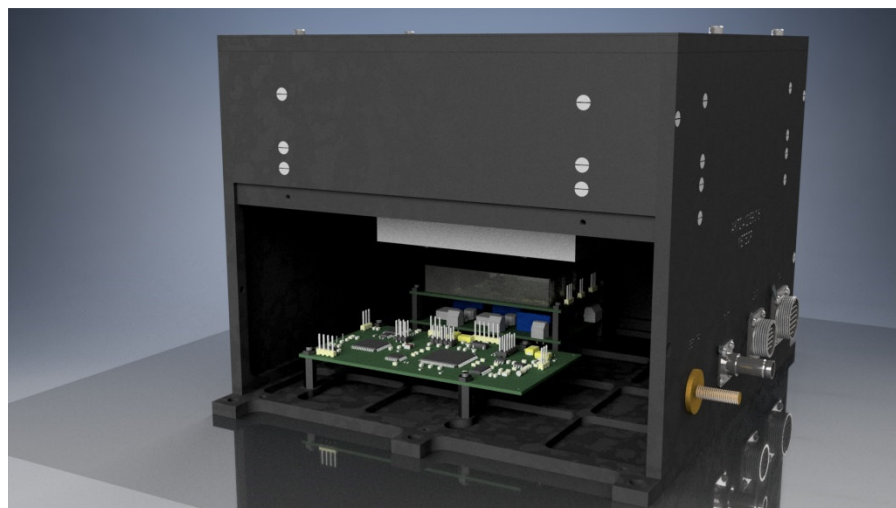
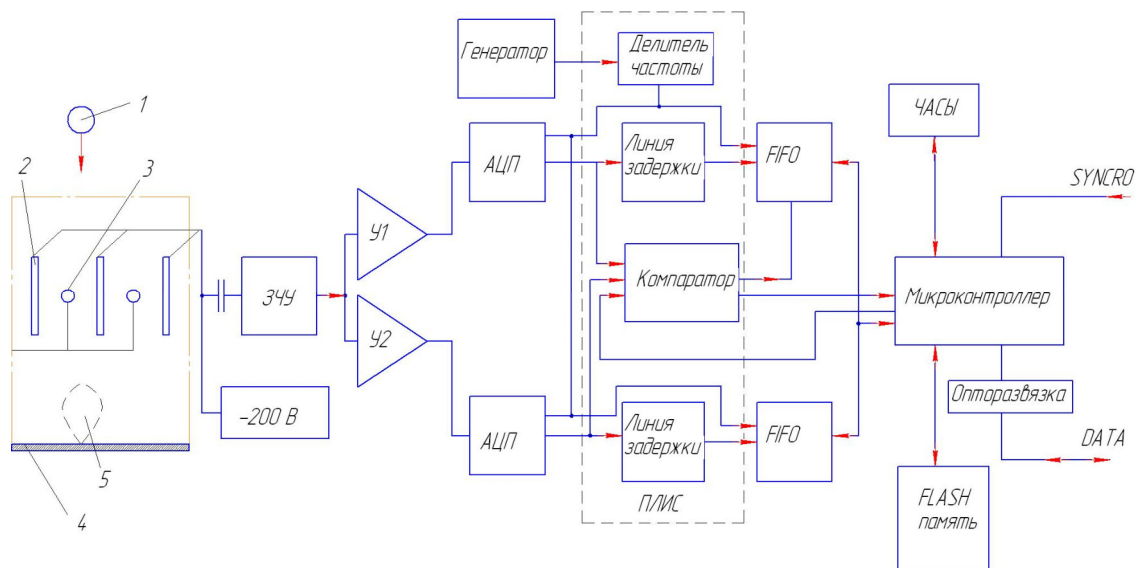


Рисунок 2.49 – 3D – модель научной аппаратуры



1 – микрочастица, 2 – измерительный электрод, 3 – электрод с 0 потенциалом, 4 – мишень, 5 – образовавшаяся после удара плазма, ЗЧУ – зарядочувствительный усилитель, У – усилитель

Рисунок 2.50 – Структурная схема измерительного модуля научной аппаратуры

Рассмотрим более подробно конструкцию измерительного модуля научной аппаратуры, опустив рассмотрение принципа работы служебных модулей (модуля формирования высокого и низкого напряжений). Измерительный модуль научной аппаратуры состоит из двух блоков: первичного преобразователя (приемника ионов) и блока обработки. В первичном преобразователе происходит процесс ионообразования, сбор ионов и усиление принимаемого сигнала.

В космическом пространстве микрометеороиды и частицы космического мусора, в большинстве случаев, имеют некоторый поверхностный заряд, который появляется вследствие воздействия на них факторов космического пространства (электронов, протонов, фотоэмиссионных процессов на поверхности и т.д.). Поэтому, при пролете заряженной микрочастицы 1 через измерительные электроды 2, на эти электроды наводится заряд, пропорциональный заряду и скорости частицы.

Приемник ионов преобразует наведенный заряд в импульс тока. Форму импульса тока можно рассчитать с использованием теоремы Шокли-Рамо [98]. Проведенное численное моделирование [310\*] процесса пролета микрочастицы через приемник ионов показало, что форма наведенного импульса может быть как в виде “одногогорбого” импульса, так и в виде “двухгорбого” импульса. “Двухгорбый” появляется, когда микрочастица пролетает близко к электроду с 0 потенциалом.

После пролета измерительных электродов микрочастица ударяется в мишень 4, при этом в зоне контакта микрочастицы и мишени происходит образование положительно

заряженных ионов и электронов 5. Мишень подключена к нулевому потенциалу, а на измерительные электроды 2 через фильтр подается напряжение порядка минус 200 В. В результате влияния электрического поля, положительно заряженные ионы летят в сторону измерительных электродов 4, сигнал с которых усиливается с помощью ЗЧУ. Выход ЗЧУ подключен к двум разным каналам усиления для того, чтобы имелась возможность одновременно проводить измерения малых и больших сигналов. Сигналы в каждом из каналов оцифровываются с помощью АЦП конвейерного типа и записываются в FIFO память, из которой информация считывается микроконтроллером. Для определения момента удара микрочастицы в мишень (появления сигнала на выходе ЗЧУ) используется цифровой компаратор, выполненной на программируемой логической интегральной схеме (ПЛИС). Порог срабатывания цифрового компаратора регулируется с использованием микроконтроллера. На ПЛИС также реализована задержка сигнала между АЦП и FIFO для того, чтобы цифровой компаратор успел сработать и зафиксировать предысторию сигнала перед его срабатыванием.

В качестве системы электродов в первичном преобразователе - приемнике ионов обычно используют металлические нити или пластины [2]. Согласно [2] система электродов, выполненная из нитей, обладает высокой прозрачностью для пролета высокоскоростной микрочастицы, но малой эффективностью сбора ионов за счет небольшой поверхности металлической нити. Пластины обладают хорошим коэффициентом сбора ионов, но большой собственной емкостью, что приводит к снижению коэффициента усиления приемного тракта.

Особенностью нашей разработки является новая конструкция системы электродов приемника ионов (рисунок 2.51), которая сочетает преимущества обоих типов электродов (нитей и пластин). Измерительный электрод выполняется из пластины, а электрод с нулевым потенциалом выполняется в виде нити. Анализ конструкции показал, что входная емкость приемника ионов уменьшилась примерно на 20%, без уменьшения площади и эффективности сбора ионов. В нашей конструкции металлические нити выполнены из вольфрама, пластины выполнены из двухстороннего фольгированного стеклотекстолита, с закороченными между собой обкладками, ширина пластин 6 мм, толщина - 1 мм и длина - 192 мм.



Рисунок 2.51 – Система электродов научной аппаратуры

#### **Описание и анализ результатов эксперимента**

Связь между конкретными параметрами высокоскоростных микрочастиц и регистрируемыми прибором параметрами устанавливается в результате проведения калибровочных испытаний. Подобные испытания производятся на ускорителях высокоскоростных микрочастиц и более подробно методика эксперимента рассмотрена в работах [34, 311].

В ускорителе использовались микрочастицы ПАП-1 с размерами от 1 до 5 мкм. Ускоритель состоит из инжектора частиц, электростатического ускорителя, электродинамического ускорителя и вакуумной камеры. В инжекторе микрочастицы заряжаются до некоторого положительного заряда, далее под действием постоянного электрического поля микрочастица ускоряется и влетает в электродинамический ускоритель, где происходит дополнительное ускорение частицы под действием переменного электрического поля. Для каждой микрочастицы в электродинамическом ускорителе формируется индивидуальный закон управления ускорителя.

При работе научной аппаратуры на входе ЗЧУ наводятся импульсные помехи, связанные с переключением ускоряющего напряжения (10 - 15 кВ) в ускорителе микрочастиц. Для предотвращения случайного срабатывания модуля измерения по помеховому сигналу используется сигнал синхронизации, передаваемый по оптоволокну с

системы управления ускорителя. Данный сигнал блокирует работу измерительной части научной аппаратуры на время работы переключателей напряжения.

Для представления экспериментальных данных в наглядном виде была написана программа, скриншоты которой представлены на рисунке 2.52. Программа отображает записанные импульсы напряжения в графическом виде.

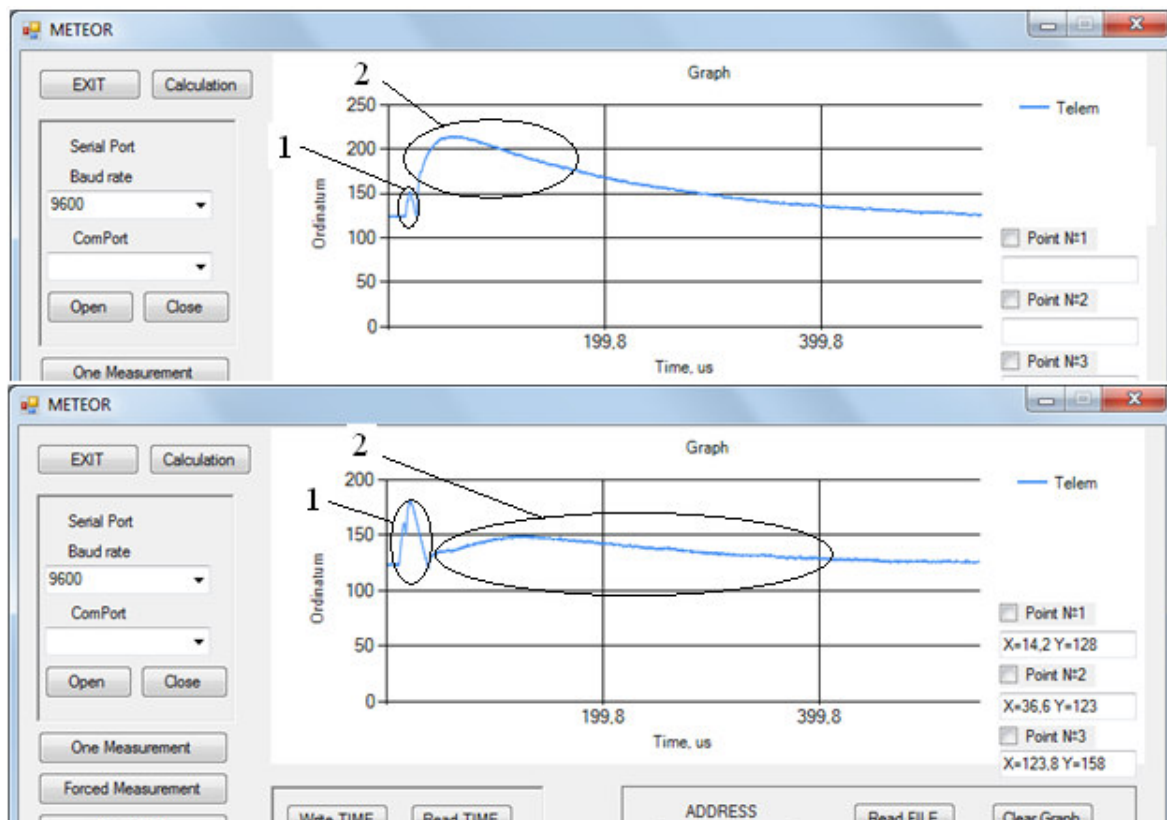


Рисунок 2.52 – Скриншоты программы: 1 – наведенный импульс, 2 –ионизации импульс

Согласно полученным данным (рисунок 2.52) сигнал от высокоскоростной микрочастицы состоит из наведенного (1) и ионизационного (2) импульсов. Была зарегистрирована “одногорбая” и “двугорбая” форма наведенного импульса, что согласуется с проведенными ранее расчетами [305\*, 310\*].

Скорость микрочастицы оценивалась по длительности наведенного импульса. Общее количество образовавшихся ионов пропорционально площади под кривой ионизационного импульса (рисунок 2.51) [34] (приложение Б):

$$Q = \sum_{i=1}^{N_{\max}} U[i] \cdot \Delta T$$

где  $i$  – номер отсчета,  $U[i]$  - значение  $i$  - отсчета,  $\Delta T$  - шаг дискретизации,  $N_{\max}$  - максимальное количество отсчетов.

Массу микрочастиц можно оценить согласно данным, полученных с ускорителя микрочастиц [34]:

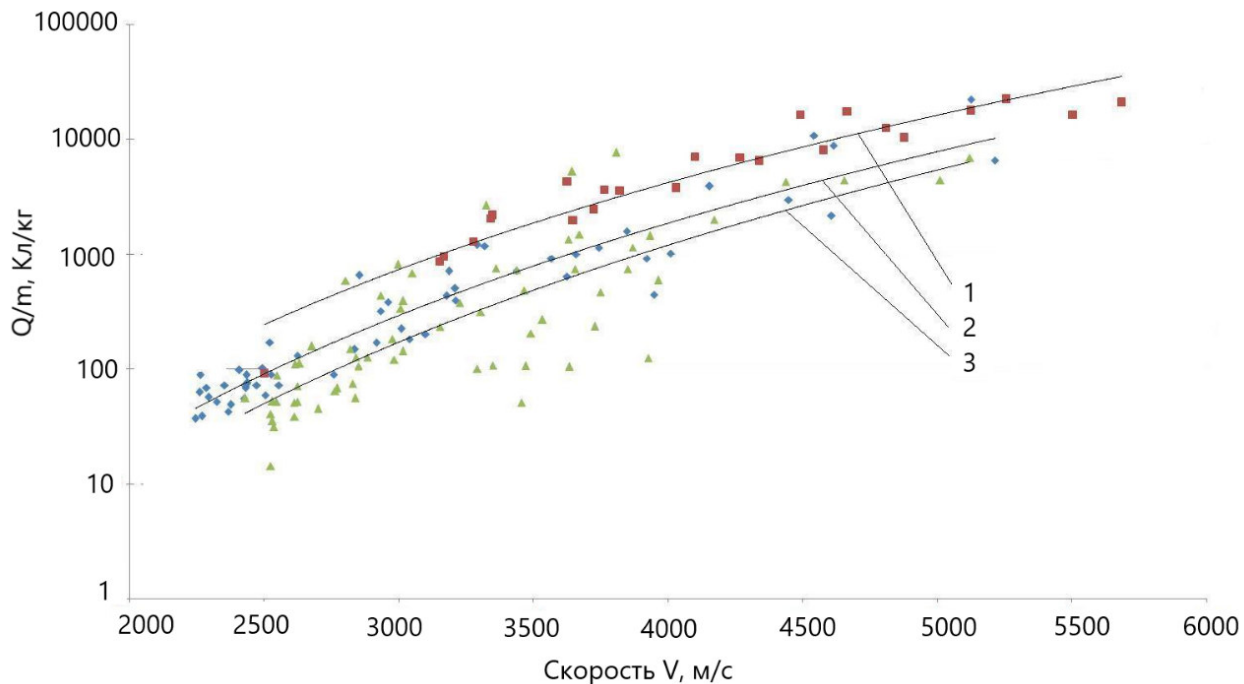
$$m = \rho \cdot \frac{4\pi}{3} \cdot \left( \frac{3\varepsilon\varepsilon_0 E_n}{\rho \cdot Q/m} \right)^3,$$

где  $\rho$  - априори известная или заданная плотность микрочастицы,  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость материала частицы,  $E_n = 2 \cdot 10^9 \text{ В/м}$  - поверхностная напряженность электрического поля,  $Q/m$  - отношение заряда микрочастицы к его массе, измеряется согласно методике приведенной в работе [34].

Была проведена серия экспериментов с мишенями из различного материала (медь, нержавеющая сталь и АМГ-6). Для установления связи между параметрами ускоренной микрочастицы и суммарным зарядом ионов использовалось выражение [2] (рисунок 2.52):

$$Q^+ = C_1 \cdot m^\alpha \cdot V^\beta,$$

где  $\alpha = 0,9 \pm 0,1$ ,  $\beta$ ,  $C_1$ - постоянные, зависящие от свойств материала мишени, ударника и конструкции ионизационного детектора:  $m$ ,  $V$ - масса и скорость частицы при ударе соответственно.



1 – Мишень: Медь, отношение общего заряд, собранных ионов к массе микрочастицы  $Q^+ / m = 6 \cdot 10^{-19} \cdot V^{6,08}$ ; 2 - Мишень: Нержавеющая сталь ЭИ878М,

$Q^+ / m = 1 \cdot 10^{-20} \cdot V^{6,48}$ ; 3- Мишень: АМГ6,  $Q^+ / m = 6 \cdot 10^{-22} \cdot V^{6,75}$

Рисунок 2.52 - Графики зависимости  $Q/m$  от  $V$

### **Краткие выводы**

Анализ полученных данных показал, что комбинированная система электродов для датчиков ионизационного типа позволят сохранить большую площадь сбора ионов и при этом снизить входную емкость научной аппаратуры.

При более высокой плотности материала мишени наблюдается более высокое давление во фронте ударной волны, более высокая температура и большая степень ионизации материала мишени и ударника в зоне удара (кратера). Основную долю ионов составляют ионы материала мишени.

Дальнейший подход в области построения электроники для обработки результатов полученных экспериментальных данных базируется на использовании программно-определяемой радиосистемы (SDR) [436\*]. Использование SDR-платформы в сочетании с одноплатным компьютером (Raspberry Pi 3) позволит упростить аппаратную часть устройства за счет минимизации числа специализированных радиоэлектронных модулей и реализовать интеллектуальную постобработку непосредственно на борту, включая нейросетевую фильтрацию и классификацию событий, что существенно сокращает объем передаваемой на Землю телеметрии и повышает помехоустойчивость измерений.

### **2.6 Выводы к главе 2**

Анализ литературных источников и существующих конструкций ионизационных приборов показал, что системы электродов в виде нитей или плоскопараллельных пластин обладают существенными недостатками: нити обеспечивают низкую эффективность сбора ионов из-за малой поверхности и подвержены вибрациям, создающим помехи, а пластины имеют большую собственную емкость, снижающую коэффициент усиления приемного тракта. При этом в известных моделях расчета выходного сигнала недостаточно полно учитывается влияние траектории движения заряженной микрочастицы на форму наведенного импульса, а также не оценивается вклад колебаний электродной системы в общий уровень шумов измерительной цепи.

Использование теоремы Рамо-Шокли с учетом численного и аналитического расчета электростатического поля для конкретных электродных систем позволило более точно рассчитывать форму наведенного импульса в зависимости от траектории полета микрочастицы, угла ее входа и параметров входной RC-цепи. Это обеспечило возможность интерпретации экспериментально полученных на ускорителе микрочастиц форм сигналов, что повысило достоверность оценки массы и скорости частиц по длительности импульса и дальнейшего расчета зависимости  $Q/m = f(V)$ .

Учет проблем электромагнитной совместимости и помехозащищенности, особенно при работе с ускорителем микрочастиц, потребовал спроектировать прибор "МЕТЕОР-М" с использованием оптического канала синхронизации для блокировки ложных срабатываний от помех переключения ускоряющего напряжения.

Экспериментальные исследования, проведенные на электростатическом и электродинамическом ускорителях, подтвердили работоспособность предложенных конструктивных и схемотехнических решений. Установлены эмпирические зависимости длительности пролетного импульса от скорости частицы и отношения заряда собранных ионов, образовавшегося при высокоскоростном соударении, к массе этой микрочастицы в зависимости от скорости для различных материалов мишени (медь, нержавеющая сталь, АМГ6), что позволяет использовать полученные данные для калибровки аналогичных приборов и интерпретации результатов космических экспериментов.

Приведены результаты космического эксперимента на борту космического аппарата "АИСТ-1Т" с использованием научной аппаратуры "МЕТЕОР", изготовленной в Самарском университете. В ходе этого эксперимента были зарегистрированы высокоскоростные микрочастицы и проведены измерения потенциала электризации поверхности космического аппарата, значения которого коррелируют с освещенностью датчиков Солнцем, что подтверждает влияние фотоэмиссии на электрическое состояние поверхности космического аппарата.

### **Глава 3. Приборы пролетного типа для регистрации высокоскоростных микрочастиц**

Одной из важных задач для оценки воздействия высокоскоростных микрочастиц на поверхность космического аппарата является измерения вектора скорости микрочастиц. Для решения поставленной задачи в мировой практике используются измерители вектора скорости, которые представляют собой либо отдельный прибор, либо прибор, конструктивно соединенный с другим прибором (например, масс-спектрометром) [93-96, 202, 302, 312]. Рассмотрим принцип действия таких приборов. Микрочастицы (космический мусор и микрометеороиды), находясь в околоземном пространстве, заряжаются до некоторого потенциала под действия факторов космического пространства [93]. При пролете через измерительный электрод (обычно измерительная сетка), на нем наводится некоторый потенциал пропорциональный параметрам частицы (скорости и заряду) [96, 103, 222, 302]. Однако имеющиеся конструкции имеют определенные недостатки.

Например, в работе [94] приведена конструкция прибора, состоящего из позиционно чувствительной электродной системы. Типичный датчик для измерения траектории имеет четыре плоскости электродов, состоящие из 16 проволочных электродов каждый. Для измерения вектора скорости используют ортогонально направления проволочек. Датчик обладает высокой прозрачностью и механической прочностью, большой чувствительной областью. Недостатком является сложность конструктивного исполнения и большое количество используемых усилителей, то снижает надежность изделия в целом.

В работе [222] описан прибор (CDA) для измерения двух составляющих вектора скорости при условии, что при измерении пренебрегают третьей составляющей вектора скорости. Недостаток: такой прибор можно использовать только для измерения потоков микрочастиц, летящих с заранее заданного направления.

В работе [103] описан новый подход к измерению траектории заряженной частицы пыли. Форма сигнала используется для вычисления скорости, массы и траектории частиц. Детектор использует два полукруглых электрода сетки, и электроды соединены с дифференциальным входом усилителя. Моделирование, проведенное авторами, показывало, что выбранная концепция измерения является эффективным методом для маломощных и маломассивных датчиков траектории движения микрочастиц. Однако данный метод не прошел экспериментальную апробацию.

### 3.1 Описание принципов измерения составляющих вектора скорости на основе сеточных конструкций

На основе анализа различных конструкций можно сделать вывод, что базовая конструкция для измерения всех компонентов вектора скорости приведена на рисунке 3.1.

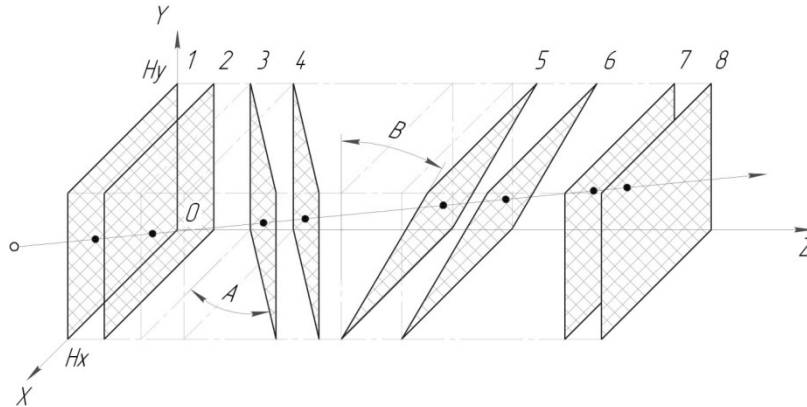


Рисунок 3.1 – Конструкция измерителя вектора скорости [313\*]

На рисунке 3.1 цифрами обозначены номера плоскостей выполненных в виде металлических сеток. Сетки 1 и 8 являются экранирующими сетками, подключена к нулевому потенциалу, 2 - 6 – измерительные сетки, подключенные к входу усилителей. Высокоскоростная частица, пролетая через данные сетки, наводит на каждую измерительную сетку импульс тока, представляющую собой колокообразный импульс. Пик данного импульса соответствует моменту пролета частицы через сетку. Сетки 1,2, 7,8 расположены в плоскостях параллельны плоскости XOY. Сетки 3 и 4 параллельны друг другу и расположены под некоторым углом A плоскости XOY и перпендикулярны плоскости XOZ. Сетки 5 и 6 параллельны друг другу и расположены под некоторым углом B плоскости XOZ и перпендикулярны плоскости XOY.

Можно для упрощения конструкции принять  $A = B$  и данные углы варьировать в диапазоне от 5 до 30 град [95].

Объектом исследования является компоненты вектора скорости  $\vec{V} = \{V_x, V_y, V_z\}$ . Обозначим  $t_n$  - время пролета заряженной частицей n – сетки,  $x_n, y_n, z_n$  - точка пролета заряженной частицей n – сетки (на рисунке 1 обозначен жирной точкой),  $z_{H_n}$  - координата по оси OZ пересечения оси OZ и n – сетки.  $z_{n1}$  – точка пересечения n – сетки оси OZ

Обозначим n – номер сетки,  $t_n$  - время пролета заряженной частицей n – сетки,  $x_n, y_n, z_n$  - точка пролета заряженной частицей n – сетки (на рисунке 3.1 обозначен жирной точкой),  $z_{n1}$  – точка пересечения n – сетки оси OZ. Тогда компоненты вектора скорости микрочастицы можно определить согласно формулам:

$$Vz = (z_6 - z_1) / (t_6 - t_1),$$

$$Vx = (x_3 - x_2) / (t_3 - t_2) = ctgA \cdot (Vz \cdot t_3 - Vz \cdot t_2 + (z_{31} - z_{21})) / (t_3 - t_2),$$

$$Vy = (y_5 - y_6) / (t_5 - t_6) = ctgB \cdot (Vz \cdot t_5 - Vz \cdot t_4 + (z_{51} - z_{41})) / (t_5 - t_4).$$

В большинстве случаев необходимо знать не все три координаты вектора скорости, а только модуль вектора скорости и его наклон к плоскости мишени, в которую ударяет высокоскоростная микрочастица. Предполагая, что плоскость мишень параллельна плоскости ХОУ получим следующие выражения:

$$\text{модуль вектора скорости } V = \sqrt{Vx^2 + Vy^2 + Vz^2};$$

$$\text{угол наклона к плоскости мишени } \gamma = \arccos\left(\frac{(Vx^2 + Vy^2)}{\sqrt{Vx^2 + Vy^2 + Vz^2}}\right).$$

### **Моделирование работы измерителя вектора скорости**

Заряженная микрочастица, подлетая к сектам наводит на них импульс тока. Форма тока можно рассчитать с использованием теоремы Рамо-Шокли [99].

Рассмотрим форму импульса сигнала наведенного на сетки. Для этого примем несколько допущений:

- 1) Микрочастица не ударяет в измерительную сетку.
- 2) Микрочастица пролетает между двумя сетками, напряженность электрического поле между которыми можно принять приближенно равным полю плоского конденсатора в центре сеток.
- 3) Размеры микрочастицы пренебрежимо малы по сравнению с размерами сеток, поэтому примем, что обкладки конденсатора, состоящего из сеток, бесконечно большие и пренебрежем краевыми эффектами на границах сетки.
- 4) Для того, чтобы не проектировать несколько усилителей, достаточно поставить один усилителей на все сетки. Для того, чтобы такая система работала необходимо, чтобы сигнал с одной наведенной сетки был различим на фоне сигналов с других сеток.
- 5) Считаем размер частицы пренебрежимо малым по сравнению с размерами сеткой.

Опишем форму сигнала с измерительных сеток. Измерительные электроды 2-7 в связи с соединением считаем как один электрод и пренебрежем электрической емкостью между ними. Эквивалентная измерительная схема для оценки сигнала с измерительной сетки приведена на рисунке 3.2 [98].

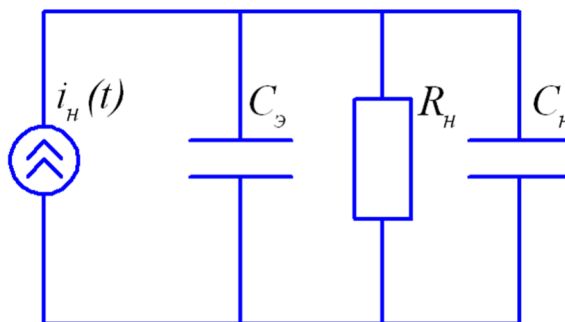


Рисунок 3.2 – Эквивалентная измерительная схема

Считая емкость  $C_H = 0$ , тогда выражение описывающие выходное напряжение можно рассчитать по формуле [275, 276]:

$$\frac{d}{dt}U_H(t) + \frac{1}{R_H C}U_H(t) = i_{ind}(t) \frac{1}{C}$$

Емкость заданного электрода можно рассчитать согласно формуле для многообкладочного конденсатора, где три обкладки.

$$C = \frac{4\pi\varepsilon_0\varepsilon \cdot S \cdot 2 \cdot K}{d_c},$$

где  $K$  – коэффициент, учитывающий, что обкладки представляют собой сетки, а не сплошной слой металла.

Дифференциальное уравнение, описывающее сигнал на выходе измерительной сетки, представляет собой неоднородное уравнение первого порядка. Решим данное уравнение методом Бернулли.

Тогда решение дифференциального уравнения будет иметь вид

$$U_i(t) = \exp\left(-\frac{t}{R_i \cdot C}\right) \cdot \left( \int \frac{i_{ind}(t)}{C} \cdot \exp\left(\frac{t}{R_i \cdot C}\right) dt + C_1 \right),$$

где  $C_1$  - постоянная. Интеграл от приведенного тока достаточно сложно вычислить. С целью упрощения расчетом пренебрежем током, протекающим через  $R_H$ , то есть, считаем, что  $R_H$  имеет очень большой номинал. Поэтому дифференциальное уравнение упроститься к виду

$$\frac{d}{dt}U_i(t) = i_{ind}(t) \frac{1}{C}.$$

Тогда получим следующее выражение:

$$U_i(t) = \int \frac{i_{ind}(t) dt}{C} = \frac{Q_{ind}(t)}{C} + C_2,$$

где  $C_2$  - постоянная интегрирования, учитывающая, что в начальный момент времени напряжение на конденсаторе равняется 0.

Для того чтобы фиксировать моменты пролета частицы через измерительные электроды (сетки) 2-7 необходимо подключать к каждой сетки свой усилитель, что достаточно сильно усложняет конструкцию прибора. В измерителе скорости [95] измерительные электроды объединены, и вектор скорости определяется по началу момента появления наведенного заряда, что позволило упростить конструкцию прибора. Однако прибор [95] позволяет измерять только две компоненты вектора скорости, а третья компонента вектора скорости получается путем поворота измерительной части прибора. При этом, так как измерительные сетки объединены, то пики напряжения достаточно сложно отделимы, что может привести к уменьшению точности измерения, при этом пики различимы при отклонении траектории частицы от центра измерительных сеток, что связано скорее всего с влиянием искажения электрического наведенного поля, вызванного близостью металлических стенок прибора. Для того, чтобы избежать этого предлагается следующая конструкция прибора.

В конструкции (рисунок 3.3) используется всего 6 сеток, при этом сетки 1, 4,5,8 заземлены, а сетки 3 и 6 объединены. Рассмотрим по отдельности пролет микрочастиц через каждый межсеточный интервал.

В момент  $t_1$  частица пролетает сетку 1 и наводит заряд на сетку 3, пролетая сетку и летя к сетки 4 заряд на сетки 3 убывает и в момент времени  $t_4$  становится равным 0. Участок между сетками 4 и 5 не используемый для измерения участок. На участке 5 -6 опять производится наводка заряда на сетку 6 и убывание заряда в промежутке 6-8.

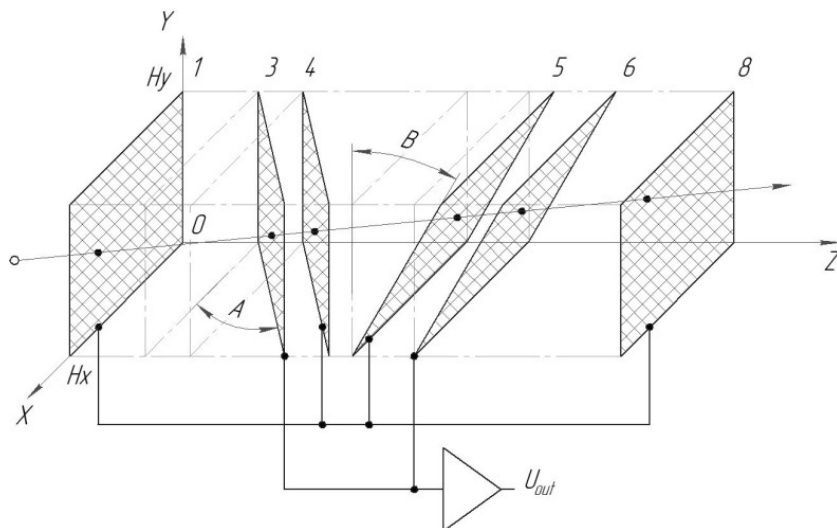


Рисунок 3.3 - Структурная схема датчика измерения скорости частиц

В момент  $t_1$  частица пролетает сетку 1 и наводит заряд на сетку 3, пролетая сетку и летя к сетки 4 заряд на сетки 3 убывает и в момент времени  $t_4$  становится равным 0. Участок между сетками 4 и 5 не используемый для измерения участок. На участке 5-6 опять производится наводка заряда на сетку 6 и убывание заряда в промежутке 6-8.

Пренебрегая искажением поля на краях сеток, рассмотрим, какой импульс наводится на измерительные сетки 3 и 6. Пренебрегая входной емкостью усилителя, подключенного к измерительным сеткам ( $C_H = 0$ ), получим, что выражение, описывающее выходное напряжение, можно рассчитать путем решения дифференциального уравнения [98]:

$$\frac{d}{dt}U_H(t) + \frac{1}{R_H C}U_H(t) = i_{ind}(t) \frac{1}{C}$$

Если не пренебрегать емкостью  $C_H$ , то емкость  $C = C_Э + C_H$ .

Емкость измерительных сеток  $C_Э$  можно оценить, как емкость многообкладочных конденсаторов:

$$C_Э = C_{1Э} + C_{2Э} + C_{3Э} + C_{4Э}$$

$$C_{1Э} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S \cdot K}{(z_{13} - z_{11} + Hx \cdot \operatorname{tg} A) / 2 \cdot \cos A}$$

$$C_{2Э} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S \cdot K}{d_{34}}$$

$$C_{3Э} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S \cdot K}{d_{56}}$$

$d_{56} = (z_{16} - z_{15}) \cdot \cos A$ ,  $d_{34} = (z_{14} - z_{13}) \cdot \cos A$  - кратчайшее расстояние между обкладками конденсатора.

$$C_{4Э} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S \cdot K}{(2z_{18} - 2z_{16} - Hy \cdot \operatorname{tg} A) / 2 \cdot \cos A},$$

где  $K$  - коэффициент, учитывающий, что обкладки представляют собой сетки, а не сплошной слой металла (данная величина, должна быть пропорциональна коэффициенту пропускаю сетки),  $\varepsilon$  - диэлектрическая постоянная,  $\varepsilon_0$  - диэлектрическая постоянная.

Емкости  $C_{1Э}$  и  $C_{4Э}$  рассчитываются исходя из среднего расстояния между обкладками.

Емкости  $C_{2Э}$  и  $C_{3Э}$  рассчитываются как обычный плоский конденсатор.

Дифференциальное уравнение представляет собой неоднородное уравнение первого порядка. Решим данное уравнение методом Бернулли.

Решение по Бернулли будет

$$U_H(t) = \exp\left(-\frac{t}{R_H \cdot C}\right) \cdot \left( \int \frac{i_{ind}(t)}{C} \cdot \exp\left(\frac{t}{R_H \cdot C}\right) dt + C_1 \right)$$

Рассчитаем токи на каждом из участков.

Токи на участке 2-3 и 5-6 представляет собой ток, который наводится в плоском конденсаторе [275]:

$$i_{ind34}(t) = Q \cdot (\vec{V} \cdot \vec{E}_{34})$$

$$i_{ind56}(t) = Q \cdot (\vec{V} \cdot \vec{E}_{56})$$

$$|\vec{E}_{23}| = \frac{U_{23}}{d_{23}}, \quad |\vec{E}_{56}| = \frac{U_{56}}{d_{56}}$$

$U_{23} = 1 \text{ В}$ ,  $U_{56} = 1 \text{ В}$  напряжение на обкладках плоского конденсатора.

$$i_{ind34}(t) = Q \cdot \sqrt{Vx^2 + Vz^2} \cdot \frac{U_{23}}{d_{23}} \cdot \cos A = Q \cdot \sqrt{Vx^2 + Vz^2} \cdot (z_{14} - z_{13})$$

$$i_{ind56}(t) = Q \cdot \sqrt{Vy^2 + Vz^2} \cdot \frac{U_{56}}{d_{56}} \cdot \cos A = Q \cdot \sqrt{Vy^2 + Vz^2} / (z_{16} - z_{15})$$

Сложнее рассчитать эффективную напряженность электрического поля на участке на участках 1-3 и 6-8, которые представляют собой конденсаторы с непараллельными обкладками. Если угол  $A$  представляет собой относительно малую величину, то напряженность электрического поля можно приближенно принять равной напряженности поля в конденсаторе с параллельными обкладками.

Учтем наклон одной сетки (обкладки) относительно другой. Предполагая, что электрический потенциал можно рассчитать по формуле

$$\varphi_{31} \approx \frac{\varphi_3 - \varphi_1}{A} \alpha_t + \varphi_1 = \frac{\varphi_3}{A} \alpha_t,$$

где  $\varphi_1 = 0$  - потенциал заземлённой сетки;  $\alpha_t = \arctg \frac{Vz \cdot t}{(z_{13} - z_{11}) \cdot ctgA + x_3 + Vx \cdot t}$ .

$$\alpha_t = \arctg \frac{z}{(z_{13} - z_{11}) \cdot ctgA + x}$$

$$E_{31} = -grad(\varphi_{31}).$$

$$E_{68} = -grad(\varphi_{68}).$$

$$\varphi_{68} \approx \frac{\varphi_6}{A} \alpha_{2t}$$

$$\alpha_{2t} = \arctg \frac{z - z_{16}}{(z_{18} - z_{16}) \cdot ctgA + x},$$

где  $C_1$  - постоянная. Интеграл от наведенного тока достаточно сложно вычислить. С целью упрощения расчетом пренебрежем током, протекающим через  $R_H$ , то есть, считаем, что  $R_H$  имеет очень большой номинал. Поэтому дифференциальное уравнение упростится к виду

$$\frac{d}{dt} U_i(t) = i_{ind}(t) \frac{1}{C}$$

### 3.2 Методика оценки выходного сигнала с измерительной сетки датчика микрометеороидов

Во многих инженерных задачах по проектированию электронной аппаратуры необходимо провести оценочный расчет, с целью определения примерных массогабаритных размеров, принципов функционирования, формы используемых импульсов. С этой целью иногда удобно применять некоторые упрощения, которые позволяют ускорить процесс оценки параметров разрабатываемых устройств.

Рассмотрим более подробно процесс измерения параметров заряженных микрочастиц с помощью электродов в виде сеточной конструкции (рисунок 3.15) [94, 101\*, 103, 314\*, 315, 316]. На рисунке 3.4 сетки из G1, G2, G3 сделаны из проводящего материала, при этом сетки G1 и G3 заземлены, G2 – измерительная сетка. Микрочастица поэтапно пролетает 4 зоны. С целью минимизации выходной емкости расстояние между сетками G1 и G2 равно расстоянию между сетками G2 и G3. Обозначим данное расстояние как  $d$ . Время пролета микрочастицей расстояния между сетками G1 и G2 (или G2 и G3) можно определить согласно выражению:

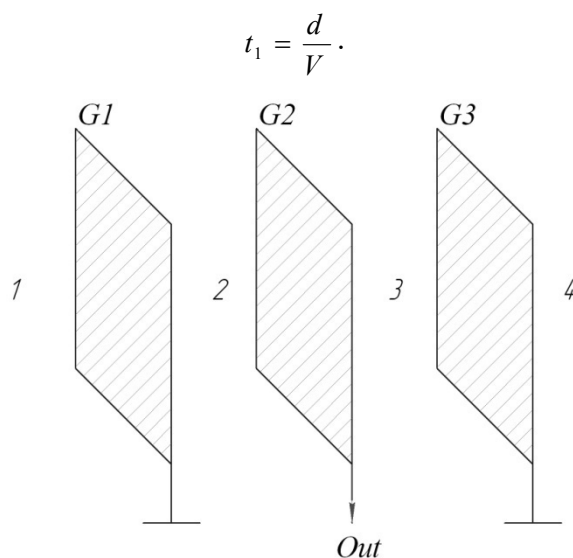


Рисунок 3.4 – Схема расположение электродов

Рассмотрим форму импульса сигнала наведенного на сетки при пролете заряженной микрочастицы. Для этого примем следующие допущения: микрочастица не ударяет в измерительную сетку, размеры микрочастицы пренебрежимо малы по сравнению с размерами сеток, поэтому пренебрежем краевыми эффектами на границах сетки.

Эквивалентная входная часть измерительной схемы для оценки сигнала с измерительной сетки приведена на рисунке 3.2 [98].

Полагая, что  $C = C_{\vartheta} + C_H$ ,  $i_H = Q \cdot (\vec{V} \cdot \vec{E}_k)$ , получим, что выражение, описывающее выходное напряжение, можно рассчитать, решая дифференциальное уравнение [98, 275]:

$$C \frac{d}{dt} U_H(t) + \frac{1}{R_H} U_H(t) = Q \cdot (\vec{V} \cdot \vec{E}_k)$$

Предположим, что эффективную напряженность электрического поля можно аппроксимировать рядом:

$$E_k = \sum_{i=0}^N d_i \cdot z^i = \sum_{i=0}^N d_i \cdot (V \cdot t)^i = \sum_{i=0}^N a_i \cdot t^i,$$

где  $a_i = d_i \cdot V^i$ ,  $a_i, d_i$  - коэффициенты.

Тогда получим следующее дифференциальное уравнение, решение которого позволяет определить выходной сигнал:

$$C \frac{d}{dt} U_H(t) + \frac{1}{R_H} U_H(t) = Q \cdot V \cdot \sum_{i=0}^N a_i \cdot t^i. \quad (3.1)$$

Решение дифференциального уравнения (1) будет иметь вид:

$$U_H(t) = U_0 \cdot e^{-t/RC} + \sum_{i=0}^N b_i \cdot t^i,$$

где  $U_0 = U_H(0) - b_0$ ;  $U_i(t) = \sum_{i=0}^N b_i \cdot t^i$  - частное решение уравнения (3.1);  $b_N = R \cdot Q \cdot V \cdot a_N$ ,

$$b_{i-1} = R \cdot Q \cdot V \cdot a_i - R \cdot C \cdot b_i.$$

Для случая, изображенного на рисунке 3.4, эффективную напряженность электрического поля можно аппроксимировать достаточно простым выражением [275]:

$$E_k = \frac{1}{d}.$$

Для нахождения выходного напряжения необходимо решить дифференциальное уравнение для каждой из 4 зон, показанной на рисунке 3.4:

$$C \frac{d}{dt} U_H(t) + \frac{1}{R_H} U_H(t) = \begin{cases} 0 & \text{в 1-ой зоне;} \\ f_1(t) & \text{во 2-ой зоне;} \\ -f_1(t) & \text{в 3-ей зоне;} \\ 0 & \text{в 4-ой зоне,} \end{cases}$$

где  $f_1(t) = \frac{Q \cdot V}{d}$  [275, 276].

Решение для каждой из зон ищется в виде суммы общего и частного решения. При этом начальные параметры напряжения на измерительной сетке при влете микрочастицы в каждую из зон равны напряжению, которое остается на измерительной сетке при покидании

микрочастицей предыдущей зоны. Выражение для выходного напряжения будет иметь следующий вид (рисунок 3.5):

$$U_n(t) = \begin{cases} 0 & \text{в 1-ой зоне;} \\ U_1(t) & \text{во 2-ой зоне;} \\ U_2(t) & \text{в 3-ей зоне;} \\ U_3(t) & \text{в 4-ой зоне,} \end{cases}$$

где  $U_1(t) = R_i \cdot Q \cdot \frac{V}{d} \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{R_i \cdot \tilde{N}}\right) \right) = R_i \cdot Q \cdot \frac{1}{t_1} \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right);$

$$U_2(t) = \left( U_1(t_1) + R \cdot Q \cdot \frac{V}{d} \right) \left( 1 - \exp\left(-\frac{t-t_1}{R_i \cdot \tilde{N}}\right) \right) - R \cdot Q \cdot \frac{V}{d}; \quad U_3(t) = U_2(t_2) \cdot \exp\left(-\frac{t-2 \cdot t_1}{R_i \cdot \tilde{N}}\right).$$

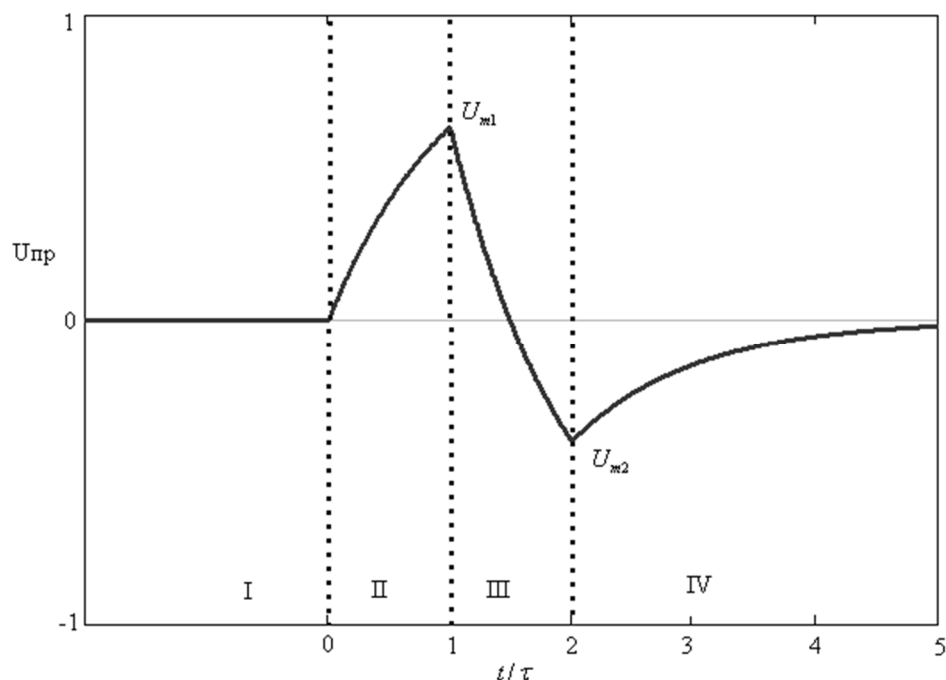


Рисунок 3.5 - Форма сигнала на выходе измерительной сетки

Заряд микрочастицы можно определить согласно выражению:

$$Q = \frac{U_1(t_1)}{R_H} \cdot t_1 \cdot \frac{1}{1 - \exp(-t_1 / R_H \cdot C)}.$$

Пренебрежем входной емкостью усилителя и емкостью проводов. Емкость же сетки электрода можно оценить, используя выражение для расчета емкости многообкладочного конденсатора, у которого три обкладки.

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S \cdot 2 \cdot K}{d},$$

где  $K$  – коэффициент, учитывающий, что обкладки представляют собой сетки, а не сплошной слой металла.

Разложим функцию для выходного напряжения для 2 зоны в ряд Тейлора:

$$\begin{aligned} U_1(t) &= R_n \cdot Q \cdot \frac{V}{d} \left( 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \left( -\frac{t}{R_n \cdot C} \right)^n \right) = R_n \cdot Q \cdot \frac{V}{d} \left( 1 - 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} (-1)^n \left( \frac{t}{R_n \cdot C} \right)^n \right) = \\ &= R_n \cdot Q \cdot \frac{V}{d} \left( \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} (-1)^{n+1} \left( \frac{t}{R_n \cdot C} \right)^n \right). \end{aligned}$$

Тогда напряжение в момент пролета микрочастицей сетки G2 можно определить согласно выражению:

$$U_1(t_1) = R_i \cdot Q \cdot \frac{V}{d} \cdot \left( \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} (-1)^{n+1} \left( \frac{d/V}{R_i \cdot \frac{\varepsilon_0 \varepsilon \cdot S \cdot 2 \cdot K}{d}} \right)^n \right) = Q \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n!} (-1)^{n+1} \frac{d^{2n-1}}{(2 \cdot K \cdot \varepsilon_0 \varepsilon \cdot S)^n R_i^{n-1} V^{n-1}}$$

Исходя из выражения, представленного выше можно сделать вывод, что увеличение расстояния  $d$  приводит к увеличению амплитуды сигнала в момент пролета микрочастицы сетки G2, за счет того, что измерительная сетка полностью зарядится от пролетающей микрочастицы.

При  $n=1$ , получаем следующее выражение, описывающее напряжение на измерительной сетки G2 в момент пролета микрочастицей этой сетки:

$$U_1(t_1) = \frac{Q}{C}.$$

Данная упрощенная формула часто используется для расчета заряда микрочастиц  $Q$ , например, в работе [34].

Рассмотрим возможность использования сетки для измерения отношения заряда микрочастицы к ее массе ( $Q/m$ ). Для этого введем в рассмотрение уравнение, в которое входит выражение для отношения  $Q/m$ . Для этого подадим на сетку G2 напряжение  $U$ .

Если частица обладает положительным потенциалом (характерно для заряженных микрочастиц, имитирующих микрометеороиды и частицы космического мусора, в ускорителях микрочастиц), а подаваемое напряжение  $U$  имеет отрицательный знак, то на участке 2 микрочастица ускоряется, а на участке 3 микрочастица тормозит. При этом на выходе сетки G3 скорость микрочастицы равна скорости пролета сетки G1.

Найдем решение дифференциального уравнения для выходного сигнала с измерительной сетки с учетом подаваемого напряжения:

$$f_1(t) = \frac{Q \cdot V}{d} + Q/m \cdot \frac{U}{d} \cdot t, \quad f_2(t) = -\left( \frac{Q \cdot V}{d} + Q/m \cdot \frac{U}{d} \cdot t \right).$$

Рассмотрим более подробно область 1 и 2 (рисунок 3.12).

$$U_n(t) = \begin{cases} 0 & \text{в 1-ой зоне;} \\ \frac{R_n \cdot Q}{d} \cdot \left( \left( V - R_n \cdot C \cdot \frac{U}{d} \cdot Q/m \right) \left( 1 - \exp\left( -\frac{t}{R_n \cdot C} \right) \right) + \frac{U}{d} \cdot Q/m \cdot t \right) & \text{во 2-ой зоне.} \end{cases}$$

То есть прикладываемое к сетке напряжение позволяет увеличить уровень выходного сигнала, но при этом необходимо учитывать, что в измеряемый сигнал добавляются шумы от источника напряжения, от которых достаточно сложно избавиться.

Для оценки возможности измерения отношения  $Q/m$  применим энергетический подход. Для участка 2 изменение кинетической энергии микрочастицы происходит за счет внешнего электростатического поля:

$$U \cdot Q = \frac{m \cdot (V + \Delta V)^2}{2} - \frac{m \cdot V^2}{2},$$

где  $m$  – масса микрочастицы,  $V$  – скорость микрочастицы при пересечении сетки G1,  $V + \Delta V$  – скорость микрочастицы при пересечении сетки G2.

$$U \cdot Q = \frac{m \cdot (V_1 + \Delta V)^2}{2} - \frac{m \cdot V_1^2}{2};$$

$$U = V_1^2 \cdot \frac{\sigma_V \cdot (\sigma_V + 2)}{2 \cdot Q/m};$$

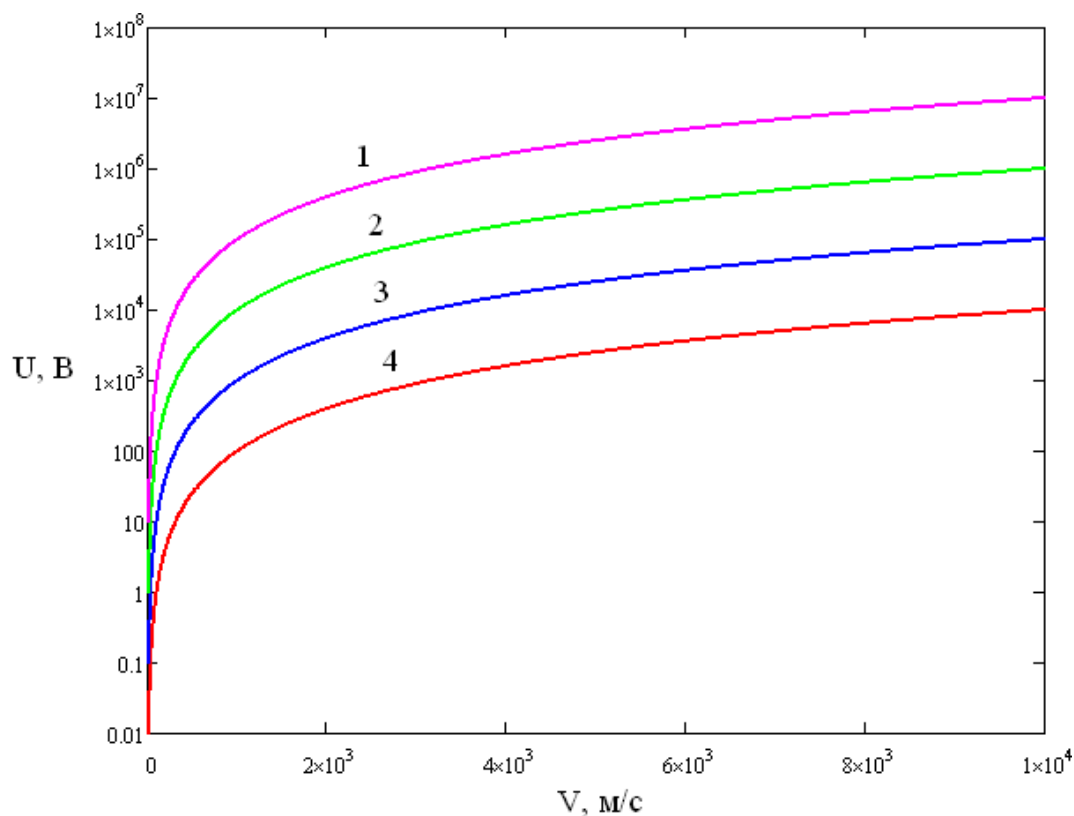
$$\sigma_V = \frac{\Delta V}{V_1}.$$

Введем допущение, что составляющая скорости по оси  $z$  ( $V_z$ ) гораздо больше остальных составляющих. Тогда относительную погрешность измерения скорости микрочастицы можно оценить согласно выражению:

$$\sigma_{V_z} = \frac{\Delta V_z}{V_z} = \frac{\sqrt{\left( \frac{\partial V_z}{\partial d} \Delta d \right)^2 + \left( \frac{\partial V_z}{\partial t} \Delta t \right)^2}}{V_z} = \sqrt{\left( \frac{\Delta d}{d_{4-6}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta t}{t_{4-6}} \right)^2},$$

где  $\Delta d$  – абсолютная погрешность установки сеток (берем точность 1 мм),  $\Delta t = 10^7$  с – погрешность измерения времени.

Согласно рисунку 3.6 можно выбрать напряжение  $U$  для того, чтобы обеспечить заданную точность измерения  $Q/m$ .



1 –  $Q/m=0,1$ ; 2 –  $Q/m=1$ ; 3 –  $Q/m=10$ ; 4 –  $Q/m=100$

Рисунок 3.6 – График зависимости напряжения, подаваемого на сетку в зависимости от скорости микрочастицы, для того, чтобы погрешность измерения была 1%

### Краткие выводы

Представлена упрощенная модель для расчета выходного сигнала с измерительной сетки при пролете заряженной микрочастицы (микрометеороидов и частиц космического мусора). Приведенные аналитические соотношения для выходного сигнала могут быть использованы при эскизном проектировании устройств, которые используются для измерения параметров заряженных микрочастиц ( $Q/m$ ,  $Q$ ), с целью оценки геометрических размеров устройства и оценки быстродействия плат измерения.

Сеточный измеритель соотношения  $Q/m$  целесообразно использовать только для низкоскоростных микрочастиц, так как иначе необходимо использовать высоковольтный источник напряжения.

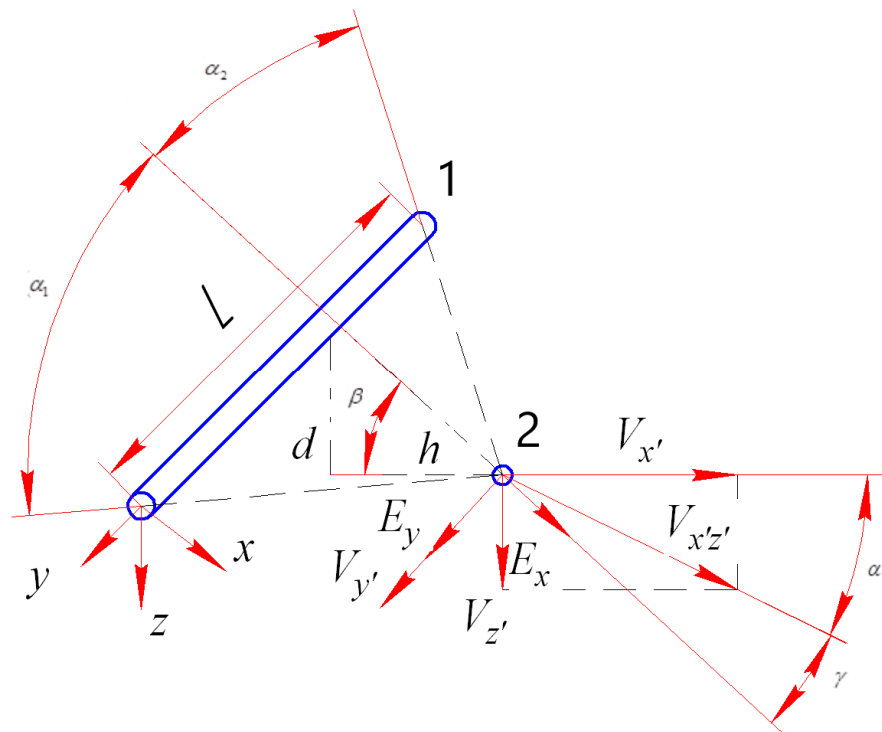
### 3.3 Методика оценки выходного сигнала для струнного датчика заряженных микрочастиц

В работе [94] приводится простое выражение оценки наведённого заряда на электроды в виде нескольких струн, к каждой из которых подключен ЗЧУ:

$$q_i = \frac{Q/r_i}{\sum 1/r_j},$$

где  $r_i$  - наикратчайшее расстояние между частицей и струной  $i$ , сумма берется по всем струнам датчика. По мере изменения координат  $x, y, z$  местоположения частицы внутри датчика со временем  $t$ , индуцированные сигналы  $q_i(t)$  также изменяются соответствующим образом. Однако с помощью данного выражения тяжело спрогнозировать влияние паразитной емкости электрода на частотные свойства первичного преобразователя.

На рисунке 3.7 показана конструкция струнного датчика и заряженной микрочастицы. При этом сделаны следующие допущения: размерами и формой микрочастицы по сравнению с размерами струны можно пренебречь, скорость микрочастицы во много раз меньше скорости света [317\*, 437\*].



1 –электрод, 2 -микрочастица

Рисунок 3.7 - Струнный датчик

Согласно работе [318] напряжённость электрического поля, созданного равномерно заряженной нити, можно рассчитать с использованием выражения:

$$\begin{aligned}
E_x &= \frac{q/L}{4\pi\varepsilon_0 \cdot r} \cdot (\sin(\alpha_1) + \sin(\alpha_2)) = \\
&= \frac{q/L}{4\pi\varepsilon_0 \cdot r} \cdot \left( \frac{k_1 \cdot L}{\sqrt{(k_1 \cdot L)^2 + d^2 + h^2}} + \frac{(1-k_1) \cdot L}{\sqrt{((1-k_1) \cdot L)^2 + d^2 + h^2}} \right) \\
E_y &= \frac{q/L}{4\pi\varepsilon_0 \cdot r} \cdot (\cos(\alpha_1) - \cos(\alpha_2)) = \\
&= \frac{q/L}{4\pi\varepsilon_0 \cdot r} \cdot \left( \frac{r}{\sqrt{(k_1 \cdot L)^2 + d^2 + h^2}} - \frac{r}{\sqrt{((1-k_1) \cdot L)^2 + d^2 + h^2}} \right)
\end{aligned}$$

где  $q=C \cdot U$  -заряд струны, который можно оценить согласно выражению,  $C$  –емкость струны,  $U = 1$  В– эффективный электрический потенциал струны.

Если считать, что длина струны очень велика, то

$$E_x = \frac{q/L}{2\pi\varepsilon_0 \cdot r}, E_y = 0.$$

Скорость микрочастицы можно представить в виде выражения:

$$\vec{V} = \bar{1}_{x'} V_{x'} + \bar{1}_{y'} V_{y'} + \bar{1}_{z'} V_{z'},$$

где  $V_{x'}, V_{y'}, V_{z'}$ - проекции вектора скорости микрочастицы на оси координат, связанные с микрочастицей;  $\bar{1}_{x'}, \bar{1}_{y'}, \bar{1}_{z'}$  - орты системы координат.

Выражение для расчёта емкости струны будем искать в виде емкости уединенного цилиндра [319-322] при условии, что  $a_1 = d_1/L \rightarrow 0$ :

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot L / 2 \cdot 4\pi \cdot \left( \ln^2(16/a_1) + \pi^2 \cdot \left( \ln(4 \cdot a_1) - \frac{11}{12} \right) \right)}{[\ln(4/a_1) - 1] \cdot [\ln^2(16/a_1) + \pi^2/12] - \pi^2 \ln^2(a_1)},$$

где  $d_1$  - диаметр струны,  $L$  - длина струны.

Предположим, что имеется составляющая только  $V_{x'}$ , тогда получим выражения для наведенного тока на струне в виде:

$$i(t) = A \cdot \frac{t}{(d/V_{x'})^2 + t^2},$$

где  $A = \frac{Q \cdot C}{2\pi\varepsilon_0 \cdot L}$ .

Анализируя выражение представленное выше, можно определить, что максимальное значение импульса тока в момент времени  $t_1$  будет определяться выражением:

$$i(t_1) = A \cdot \frac{V_x}{2 \cdot d}, \text{ при } t_1 = \frac{d}{V_x}.$$

Если учесть все составляющие скорости и конечность размеров струны, то получим выражение для наведенного тока в виде:

$$i(t) = V_{y'} \cdot \frac{A}{2} \cdot (B_1(t) - B_2(t)) + \\ + A \cdot \frac{t + \frac{V_{z'}}{V_{x'}} \cdot (d_0 + V_{z'} \cdot t)}{2 \left( t^2 + \left( \frac{d_0 + V_{z'} \cdot t}{V_{x'}} \right)^2 \right)} \cdot \left( (k_1 \cdot L - V_{y'} \cdot t) \cdot B_1(t) + ((1 - k_1) \cdot L + V_{y'} \cdot t) \cdot B_2(t) \right),$$

$$B_1(t) = \frac{1}{\sqrt{(k_1 \cdot L - V_{y'} \cdot t)^2 + (d_0 + V_{z'} \cdot t)^2 + (V_{x'} \cdot t)^2}},$$

$$B_2(t) = \frac{1}{\sqrt{((1 - k_1) \cdot L + V_{y'} \cdot t)^2 + (d_0 + V_{z'} \cdot t)^2 + (V_{x'} \cdot t)^2}}$$

При условии, что  $V_{y'} = 0, V_{z'} = 0$  получаем выражение:

$$i(t) = A \cdot \frac{t}{2 \left( t^2 + \left( \frac{d_0}{V_{x'}} \right)^2 \right)} \cdot \left( (k_1 \cdot L) \cdot B_{01}(t) + ((1 - k_1) \cdot L) \cdot B_{02}(t) \right),$$

$$B_{01}(t) = \frac{1}{\sqrt{(k_1 \cdot L)^2 + (d_0)^2 + (V_{x'} \cdot t)^2}},$$

$$B_{02}(t) = \frac{1}{\sqrt{((1 - k_1) \cdot L)^2 + (d_0)^2 + (V_{x'} \cdot t)^2}}.$$

### 3.4 Методика оценки выходного сигнала с наклонной сетки датчика высокоскоростных микрочастиц

В измерителях скорости высокоскоростных микрочастиц часто используются измерительные сетки, наклонённые под определенным углом друг к другу. Рассмотрим методику расчета выходного сигнала с этих измерительных сеток.

На рисунке 3.8 показаны проекции двух непараллельных плоскостей, расположенных под углом  $\theta_0$  друг относительно друга. Заряженная микрочастица пролетает первую измерительную сетку в точке M0 (x0,0), и вылетает из второй сетки в

точке  $M_1(x_1, z_1)$ . Точка  $M(x, z)$  является промежуточным положением микрочастицы в момент времени  $t$  [323\*].

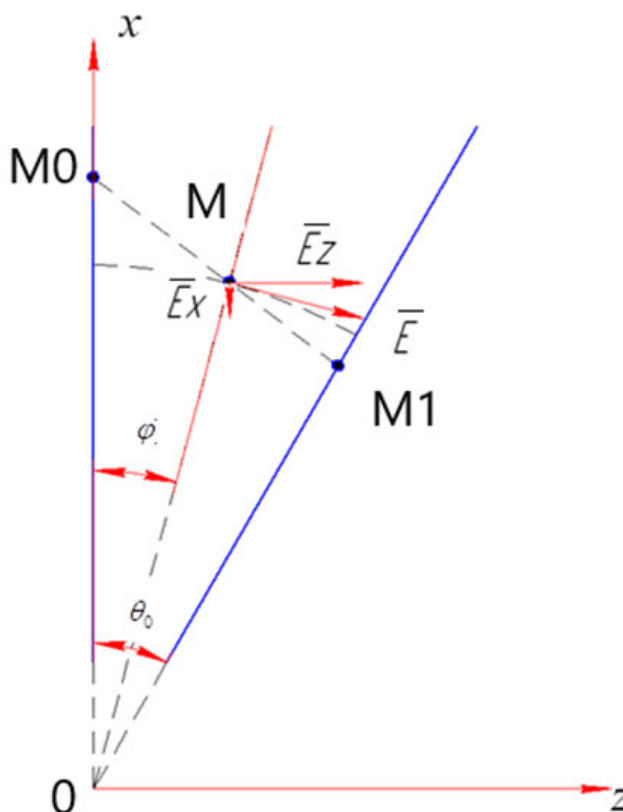


Рисунок 3.8 – Взаимное расположение наклонных измерительных сеточных электродов

Наведенный импульс тока на электроде при пролете микрочастицей данного электрода рассчитывается согласно теореме Рамо-Шокли [99]. Напряжённость поля непараллельных плоских электродов можно вычислить в полярной системе координат согласно выражению [324]:

$$E = \frac{U}{r \cdot \theta_0},$$

где  $U$  – напряжение на измерительном электроде (в расчетах принимается за 1 В),  $r$  – расстояние от точки 0 до точки  $M$ ,  $\theta_0$  – угол раствора двух электродов. Примем, что первая сетка находится по 0 потенциалом, а сигнал измеряется со второй сетки.

Определить координаты микрочастицы в декартовой системе координат можно согласно выражениям:

$$z = r \cdot \sin(\varphi), \quad x = r \cdot \cos(\varphi), \quad x_1 = x_0 - V_x \cdot t, \quad z_1 = V_z \cdot t.$$

Введем  $\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{V_x}{V_z}$ .

Тогда проекции вектора напряженности в прямоугольной системе координат вычисляются согласно выражениям:

$$E_x = E \cdot \sin(\varphi), E_z = E \cdot \cos(\varphi), \operatorname{tg}(\varphi) = \frac{z}{x} = \frac{V_z \cdot t}{x_0 - V_x \cdot t} = \frac{t}{x_0 / V_z - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot t}$$

Наведенный ток можно рассчитать согласно выражению:

$$\begin{aligned} i &= Q \cdot (\vec{V} \cdot \vec{E}) = Q \cdot (\vec{V}_x \cdot \vec{E}_x + \vec{V}_z \cdot \vec{E}_z) = \frac{U \cdot Q}{z \cdot \theta_0} (V_x \cdot \sin^2(\varphi) + V_z \cdot \cos(\varphi) \cdot \sin(\varphi)) = \\ &= \frac{U \cdot Q \cdot V_z}{z \cdot \theta_0} (\operatorname{tg}(\alpha) \cdot \sin^2(\varphi) + \cos(\varphi) \cdot \sin(\varphi)) = \\ &= \frac{U \cdot Q}{t \cdot \theta_0} \left( \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \frac{\operatorname{tg}^2(\varphi)}{1 + \operatorname{tg}^2(\varphi)} + \frac{\operatorname{tg}(\varphi)}{1 + \operatorname{tg}^2(\varphi)} \right) = \frac{U \cdot Q}{t \cdot \theta_0} \left( \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \frac{\operatorname{tg}^2(\varphi)}{1 + \operatorname{tg}^2(\varphi)} + \frac{\operatorname{tg}(\varphi)}{1 + \operatorname{tg}^2(\varphi)} \right) = \\ &= \frac{U \cdot Q}{\theta_0} \left( \frac{x_0 / V_z}{(x_0 / V_z - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot t)^2 + t^2} \right) = i(t=0) \cdot \left( \frac{x_0^2}{(x_0 - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot t \cdot V_z)^2 + (t \cdot V_z)^2} \right), \end{aligned}$$

где  $i(t=0) = \frac{U \cdot Q}{\theta_0} \left( \frac{V_z}{x_0} \right) = \frac{1 \cdot Q}{\theta_0} \left( \frac{V_z}{x_0} \right)$  - ток в момент времени пролета микрочастицей 1 сетки.

Время пролета второй сетки определяется путем решения системы уравнения:

$$\begin{cases} x_1 = x_0 - V_x \cdot t_1, \\ z_1 = V_z \cdot t_1, \\ \operatorname{tg}(\theta_0) = \frac{z_1}{x_1}. \end{cases}$$

Решение системы уравнений будет имеет вид:

$$t_1 = \frac{x_0}{V_z \cdot \left( \frac{1}{\operatorname{tg}(\theta_0)} + \operatorname{tg}(\alpha) \right)}.$$

Компоненту вектора скорости  $V_z$  можно определить согласно измерению времени пролета микрочастицей 1 и 6 сеток (рисунок 3.16), а компоненту вектора скорости  $V_x$  согласно выражению:

$$V_x = \frac{x_0}{t_1} - \frac{V_z}{\operatorname{tg}(\theta_0)}.$$

Тогда ток в момент времени пролета микрочастицей 2 сетки можно рассчитать согласно выражению:

$$\begin{aligned}
i(t=t_1) &= \frac{U \cdot Q}{\theta_0} \frac{x_0/V_z}{\left( \left( x_0/V_z - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \frac{x_0/V_z}{\left( \frac{1}{\operatorname{tg}(\theta_0)} + \operatorname{tg}(\alpha) \right)} \right)^2 + \left( \frac{x_0/V_z}{\left( \frac{1}{\operatorname{tg}(\theta_0)} + \operatorname{tg}(\alpha) \right)} \right)^2 \right)} = \\
&= \frac{U \cdot Q}{\theta_0} \frac{V_z/x_0}{\left( \left( 1 - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot \frac{1}{\left( \frac{1}{\operatorname{tg}(\theta_0)} + \operatorname{tg}(\alpha) \right)} \right)^2 + \left( \frac{1}{\left( \frac{1}{\operatorname{tg}(\theta_0)} + \operatorname{tg}(\alpha) \right)} \right)^2 \right)} = \\
&= \frac{U \cdot Q \cdot V_z/x_0}{\theta_0} \frac{\left( \frac{1}{\operatorname{tg}(\theta_0)} + \operatorname{tg}(\alpha) \right)^2}{\left( \frac{1}{\operatorname{tg}(\theta_0)} \right)^2 + 1} = i(t=0) \cdot \frac{\left( \operatorname{ctg}(\theta_0) + \operatorname{tg}(\alpha) \right)^2}{\operatorname{ctg}^2(\theta_0) + 1}
\end{aligned}$$

Тогда угол влета микрочастицы в первую сетку можно определить согласно выражению:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \sqrt{i(t=t_1) \cdot (\operatorname{ctg}^2(\theta_0) + 1) / i(t=0)} - \operatorname{ctg}(\theta_0).$$

При  $\alpha = 0$  ( $\operatorname{tg}(\alpha) = 0$ ):

$$i = i(t=0) \cdot \left( \frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2(\theta_0)} \right) = i(t=0) \cdot \cos^2(\theta_0)$$

Зная заряд  $Q$  и скорость  $V_z$  микрочастицы, можно определить координату пролета 1 сетки согласно выражению:

$$x_0 = \frac{U \cdot Q}{\theta_0} \left( \frac{V_z}{i(t=0)} \right).$$

### Модель с учетом влияния входной измерительной цепи

В реальных системах необходимо учитывать параметры входной измерительной цепи, например, входную емкость, индуктивность и сопротивление, как рассмотрена в

работе [276]. Для этого необходимо решить дифференциальное уравнение, составленное согласно эквивалентное радиотехнической модели [98] (рисунок 3.9):

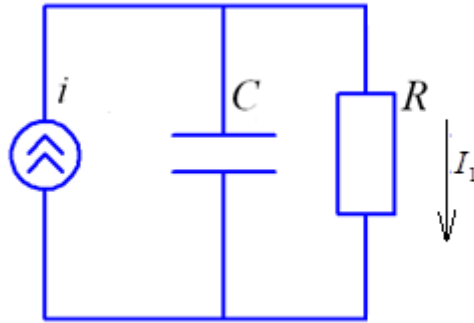


Рисунок 3.9 – Эквивалентная измерительная схема:  $C$  – входная емкость,  $R$  – входное сопротивление

Выражение, описывающее ток, протекающий через входной сопротивление, можно рассчитать по формуле [98, 276]:

$$C \cdot R \cdot \frac{dI_1}{dt} + I_1 = i.$$

Для того, чтобы упростить аналитическое решение данного дифференциального уравнение, воспользуемся разложением индукционного тока в ряд Тейлора, при этом ограничимся нахождением тремя первыми членами ряда, погрешность такой аппроксимации не превышает 0,5%:

$$i = i(t=0) \cdot \left( 1 + \frac{2 \cdot Vx}{x0} \cdot t + \left( 3 \cdot \left( \frac{Vx}{x0} \right)^2 - \left( \frac{Vz}{x0} \right)^2 \right) \cdot t^2 \right) = (t=0) \cdot (1 + A_1 \cdot t + A_2 \cdot t^2),$$

где  $A_1 = \frac{2 \cdot Vx}{x0}$ ,  $A_2 = \left( 3 \cdot \left( \frac{Vx}{x0} \right)^2 - \left( \frac{Vz}{x0} \right)^2 \right)$ .

При решении дифференциального уравнения воспользовались начальными условиями, что  $I_1(t=0) = 0$ . Тогда получим следующее выражение для тока, протекающего через резистор:

$$I_1 = i(t=0) \cdot \left[ (1 - A_1 \cdot \tau + 2 \cdot A_2 \cdot \tau^2) \cdot (1 - e^{-t/\tau}) + (A_1 - 2 \cdot \tau \cdot A_2) \cdot t + A_2 \cdot t^2 \right],$$

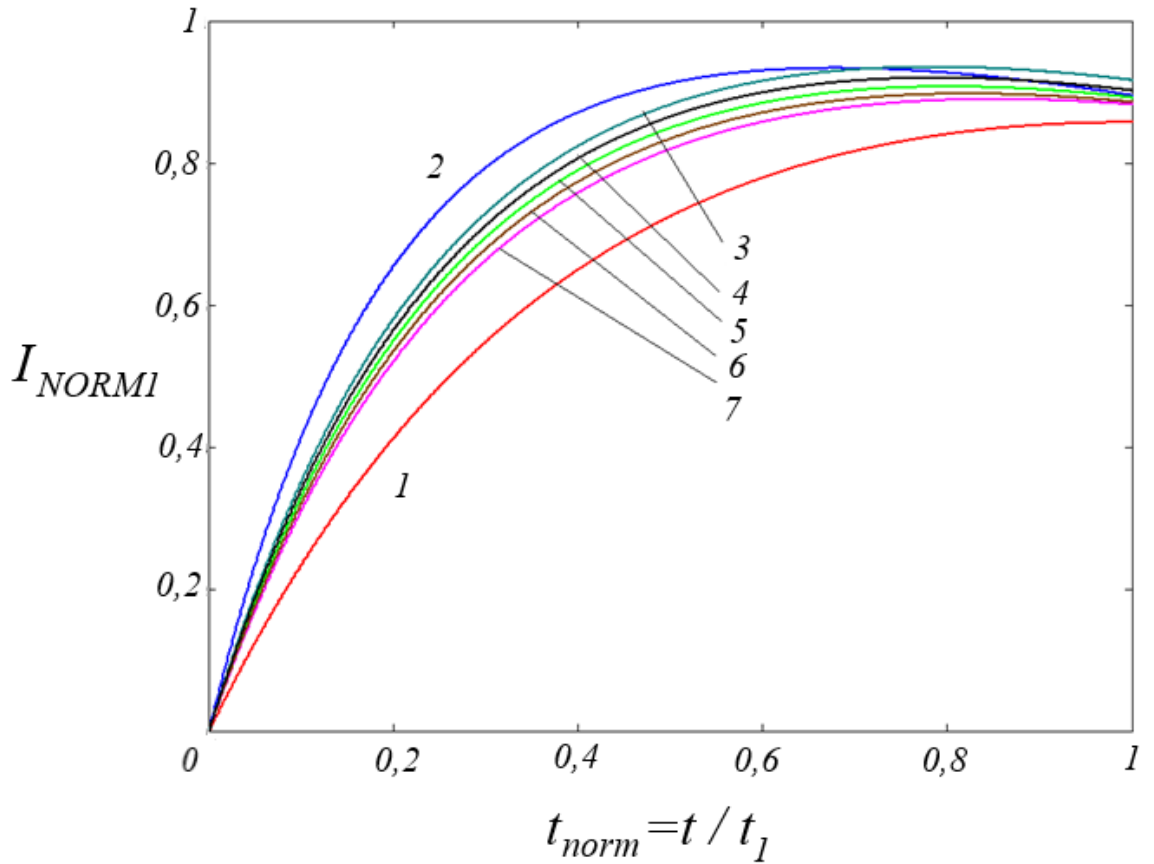
где  $\tau = R \cdot C$  - постоянная времени входной цепи.

При  $\tau \rightarrow 0$  выражение переход в выражение без учета влияния входных цепей.

Для удобства рассмотрения график удобно строить для нормированной функции (рисунки 3.10, 3.11):

$$I_{NORM\ 1} = I_1 / i(t = 0) = [(1 - A_1 \cdot \tau + 2 \cdot A_2 \cdot \tau^2) \cdot (1 - e^{-t/\tau}) + (A_1 - 2 \cdot \tau \cdot A_2) \cdot$$

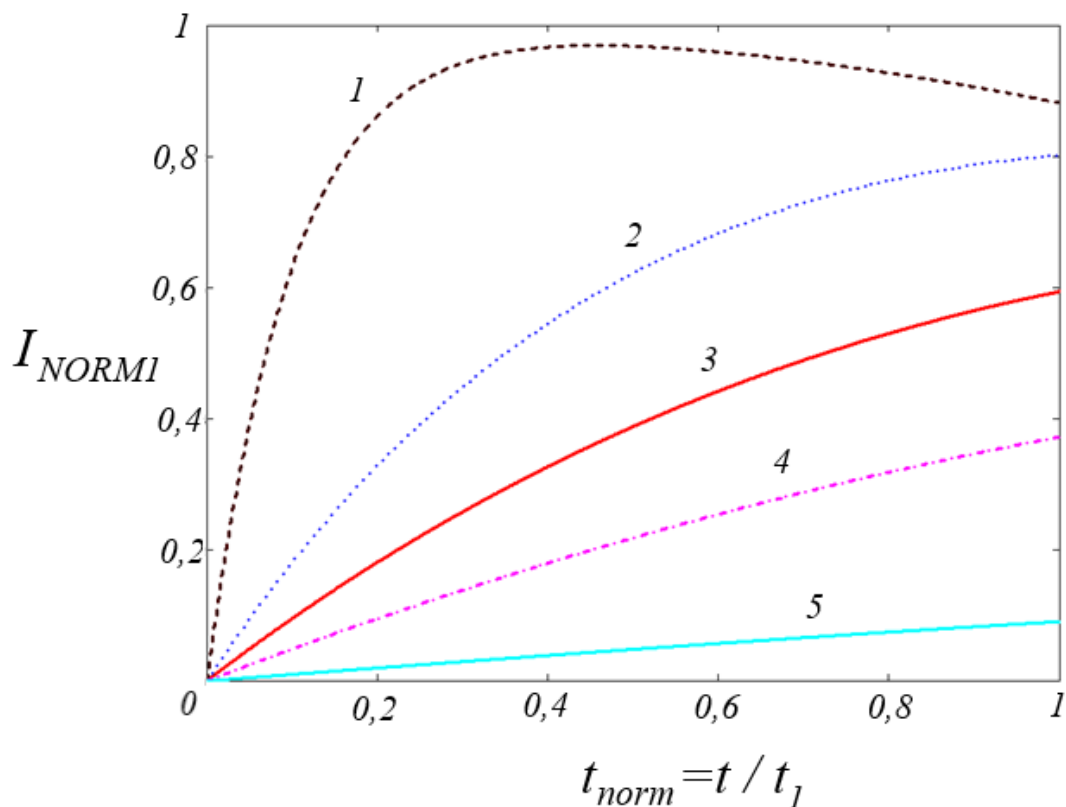
$$t_{norm} = t / t_1.$$



1 -  $x_0 = 0,1 \text{ м}, \alpha = 0^\circ$ ; 2 -  $x_0 = 0,2 \text{ м}, \alpha = 0^\circ$ ; 3 -  $x_0 = 0,15 \text{ м}, \alpha = -10^\circ$ ;

4 -  $x_0 = 0,15 \text{ м}, \alpha = -5^\circ$ ; 5 -  $x_0 = 0,15 \text{ м}, \alpha = 0^\circ$ ; 6 -  $x_0 = 0,15 \text{ м}, \alpha = 5^\circ$ ; 7 -  
 $x_0 = 0,15 \text{ м}, \alpha = 10^\circ$

Рисунок 3.10 –График нормированного импульса тока в промежутке между первой и второй сеткой при  $V_z = 1000 \text{ м / с}, \tau = 10^{-5} \text{ с}$  :



1 -  $t_1/\tau=10$ ; 2 -  $t_1/\tau=2$ ; 3 -  $t_1/\tau=1$ ; 4 -  $t_1/\tau=0,5$ ; 5 -  $t_1/\tau=0,1$

Рисунок 3.11 - График нормированного импульса тока в промежутке между первой и второй сеткой при  $x_0 = 0,15$  м,  $\alpha = 0^\circ$ ,  $V_z = 1000$  м/с

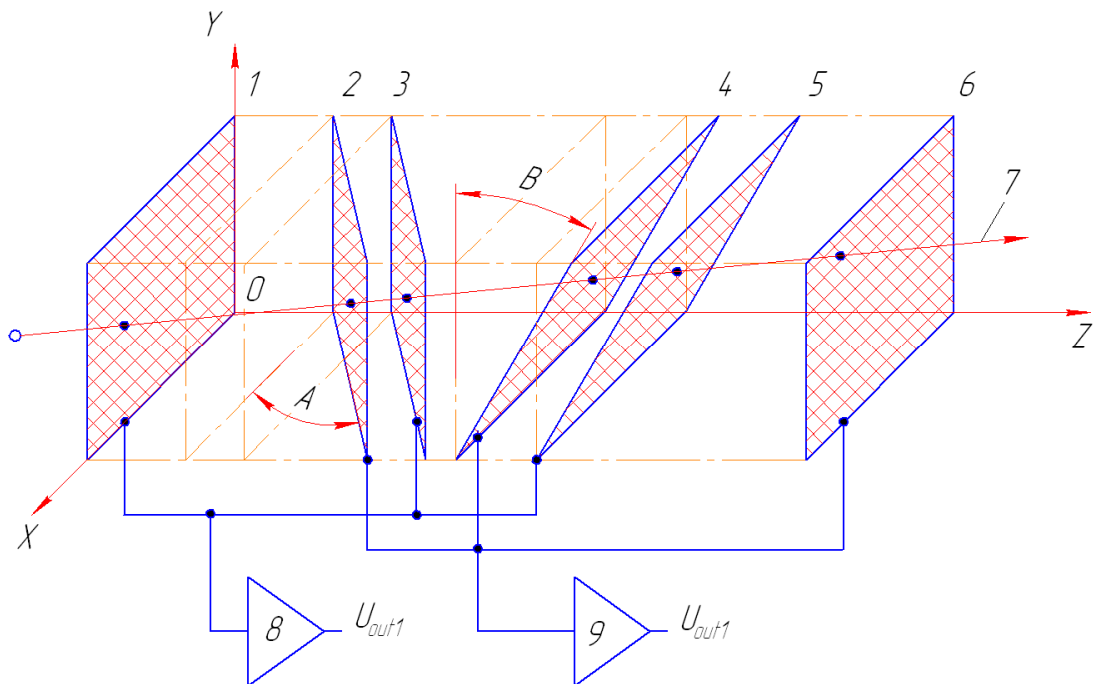
### 3.5 Результаты проведенных экспериментов с различными конструкциями датчиков пролета микрочастиц

#### 3.5.1 Экспериментальный анализ сеточной конструкции для измерения скорости микрочастиц

Для измерения скорости  $\vec{V} = \{V_x, V_y, V_z\}$  этих микрочастиц в основном используется явление наведения тока заряженным движущимся телом при пролете через измерительные металлические электроды (сетки) [93-95, 103]. По вектору скорости этих микрочастиц можно оценить их кинетическую энергию, а также направления прилета в датчик, что позволяет предсказать источник их происхождения [276, 313\*]. Помимо индукционного способов измерения вектора скорости существуют также оптические методы измерения, но, к сожалению, с точки зрения конструктивной реализации они обладают рядом недостатков: паразитная засветка, невозможность определения заряда микрочастиц и т.д. [52, 325\*, 326\*, 327].

### Описание принципа измерения

Соискателем была разработана и изготовлена конструкция прибора для измерения вектора скорости микрочастицы (рисунок 3.12). На рисунке 3.12 показана структурная схема измерителя вектора скорости, где позициями с 1 по 6 отмечены измерительные металлические сетки, подключенные к двум разным усилителям. Высокоскоростная заряженная микрочастица, пролетая через данные сетки по траектории 7, наводит на каждую сетку импульс тока, форма которого близка к колоколообразной и параметры которого пропорциональны скорости и заряду этой микрочастицы [313\*, 276]. Пик сигналов с сеток соответствует моменту пролета частицы через сетку, что позволяет фиксировать момент пролета. Сетки 1 и 6 расположены в плоскостях параллельны плоскости  $XOY$ . Сетки 2 и 3 параллельны друг другу и расположены под некоторым углом  $A$  к плоскости  $XOY$  и перпендикулярны плоскости  $XOZ$ . Сетки 4 и 5 параллельны друг другу и расположены под некоторым углом  $B$  к плоскости  $XOZ$  и перпендикулярны плоскости  $XOY$  [313\*]. В рассматриваемой конструкции углы  $A$  и  $B$  равны 15 градусам.

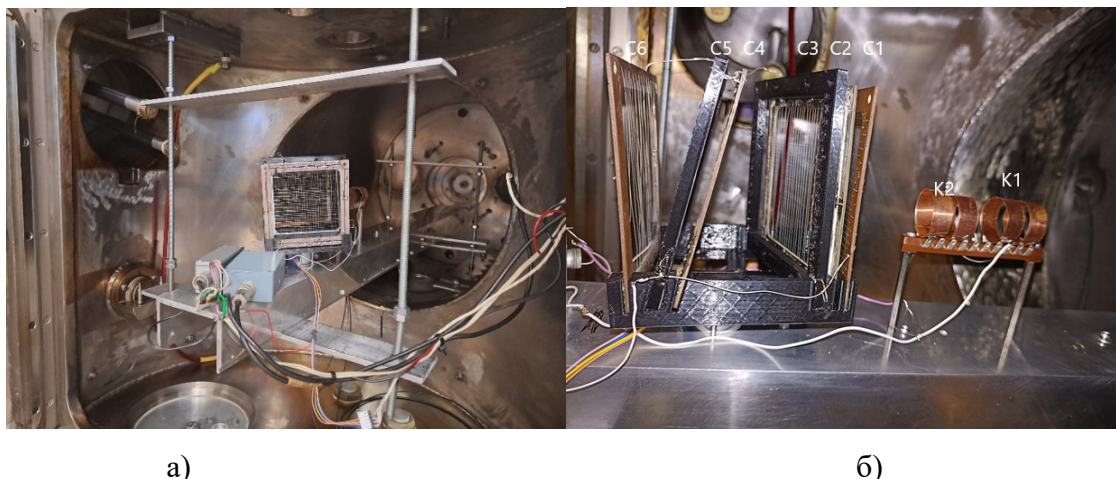


1, 2, 3, 4, 5, 6 –сеточные электроды; 7 – траектория движения микрочастиц; 8, 9 –  
усилители

Рисунок 3.12 – Структурная схема датчика измерения вектора скорости  
микрочастиц

### Описание эксперимента

На рисунке 3.12 показано размещение разработанного прототипа датчика в вакуумной камере ускорителя микрочастиц, принцип действия которого подробно рассмотрен в работах [101\*, 173\*, 325\*].

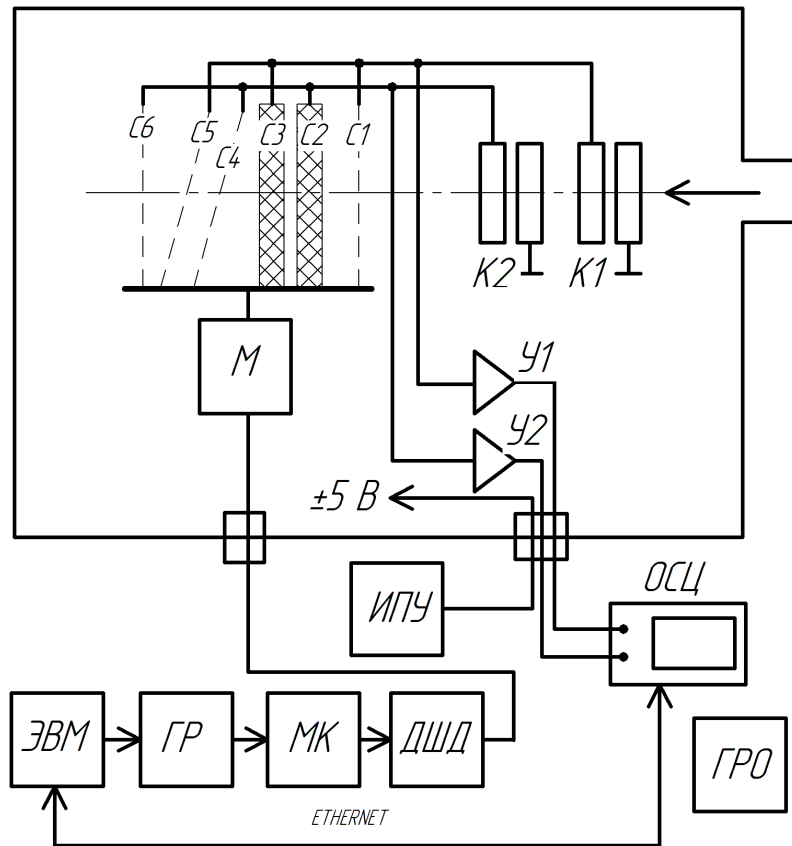


а)

б)

Рисунок 3.12 – Фотографии прототипа датчика вектора скорости микрочастиц, установленного в вакуумной камере ускорителя: а) вид сзади и б) вид с боку

Структурная схема стенда для проведения эксперимента с датчиком микрочастиц показана на рисунке 3.13. Основание прототипа датчика изготовлено с использованием 3D принтера методом FDM печати из ABS пластика. Габариты макета составляют 100x100x100 мм, размеры чувствительного окна: 80x80мм. При изготовлении рамок сеток испытаны две технологии: 3D-печать и фрезерование фольгированного стеклотекстолита на ЧПУ станке. Использование 3D печати позволяет ускорить процесс создания прототипа и получить рамки с минимальной паразитной емкостью, однако в дальнейшем пластик не пригоден для создания бортовой аппаратуры из-за низкой стойкости к факторам космического пространства. В качестве материала струн сетки использована проволока из нихрома толщиной 30 мкм, расстояние между струнами 5 мм. Нихром выбран по причине высокой механической прочности при малой толщине струны, несмотря на его относительно высокое удельное сопротивление [173\*]. Предварительные эксперименты показали, что применение других проводников, таких как медь, практически не влияет на форму и амплитуду наведенных сигналов.



С1 – С6 – металлические сетки; К1, К2 – кольца Фарадея, У1, У2 - усилители; ИПУ – источник питания усилителей; М – шаговый двигатель; ГР – гальваническая развязка цифрового интерфейса; МК – микроконтроллер; ДШД – драйвер шагового двигателя; ОСЦ – цифровой осциллограф; ГРО – гальванически развязанный источник питания осциллографа

Рисунок 3.13 – Структурная схема стенда для калибровки датчика вектора скорости

В результате эксперимента фиксировались временные интервалы пролета шести сеток и двух колец Фарадея [101\*]. Изменения угла влета микрочастицы в датчик проводилось путем вращения самого датчика относительно оси тракта ускорителя, совпадающей с осью колец Фарадея. В качестве поворотного устройства был использован шаговый двигатель с встроенным редуктором 28-ВУJ48. Двигатель имеет 64 шага на оборот, что в совокупности с редуктором 1/63.68395, позволяет поворачивать выходной ротор с шагом около 0,087 градуса. Поскольку при первичных испытаниях прототипа датчика такие малые углы поворота не требовались, осуществлялся поворот с шагом 6 градусов, в диапазоне углов от -42 до +42 градуса (относительно оси ускорителя). Работой шагового двигателя управлял микроконтроллер (МК) и драйвер шагового двигателя (ДШД), расположенные снаружи вакуумной камеры, а команды на микроконтроллер подавались с ЭВМ через модуль гальванической развязки (ГР).

В схеме использовано два усилителя У1 и У2, электрическая принципиальная схема которых представлена на рисунке 3.14 [328]. Кольцо Фарадея К1 соединено с сетками С1, С3, С5 и подключено к входу усилителя У1. Кольцо Фарадея К2 соединено с сетками С2, С4, С6 и подключено ко входу усилителя У2. Такая схема включения позволяет сократить количество каналов аналоговой записи с восьми до двух, что упрощает запись и последующую обработку сигналов во время испытаний макета датчика. В момент пролёта частицы через любую из сеток, соседние сетки выполняют функцию экранирующих сеток, поскольку подключены ко входу другого усилителя, включенного по схеме с «виртуальной землей» на входе. Такой подход позволяет повысить крутизну пролётных импульсов, без использования дополнительной группы разделительных заземленных сеток, что повышает коэффициент «прозрачности» датчика, который составил для данного прототипа 97%. В качестве частиц использовался порошок олова с размером частиц 1-2мкм. При напряжении на линейной части ускорителя 100кВ, скорости частиц составили 100-900м/с. В ходе дальнейших экспериментов, после оптимизации конструкции датчика и схемы усилителей, планируется провести испытания при более высоких скоростях.

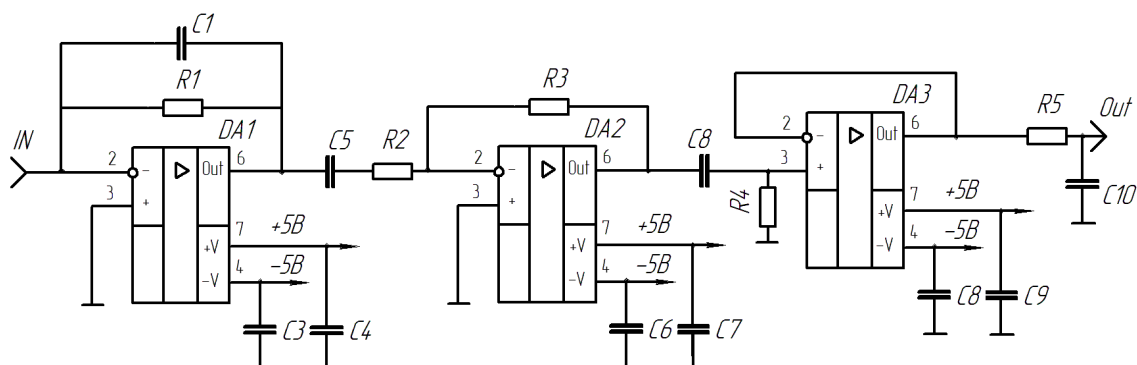


Рисунок 3.14 – Принципиальная схема зарядочувствительного усилителя

Каждый из усилителей состоит из трех каскадов (рисунок 3.14). Преобразование заряда в напряжение выполняется с помощью первого каскада, выполненного на микросхеме ОРА656 (DA1). Напряжение на выходе первого каскада определяется выражением:

$$U = -Q/C_1,$$

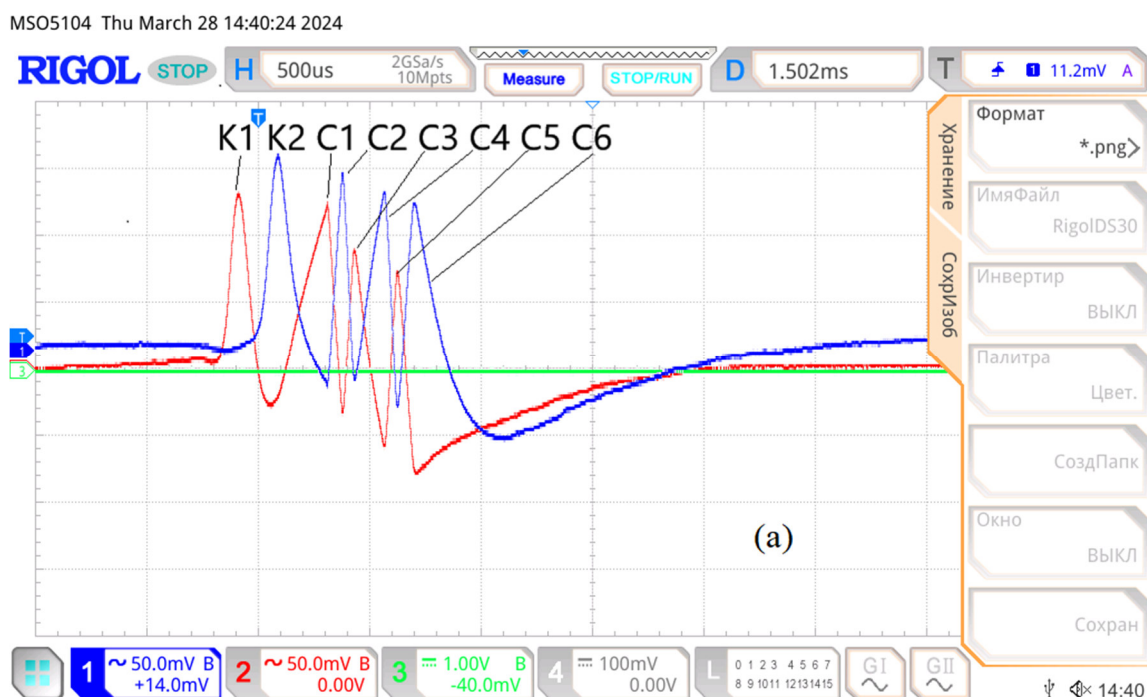
где  $Q$  – заряд микрочастицы,  $C_1 = 10$  пФ – емкость в цепи обратной связи первого операционного усилителя.

Второй каскад, выполненный на операционном усилителе AD8005 (DA2), является инвертирующим усилителем напряжения с коэффициентом усиления равным 39. Конденсатор  $C_5$  совместно с резистором  $R_2$  образуют фильтр высоких частот с частотой среза около 100 Гц, что позволяет ослабить влияние помех от электрической сети 50 Гц в лабораторных условиях.

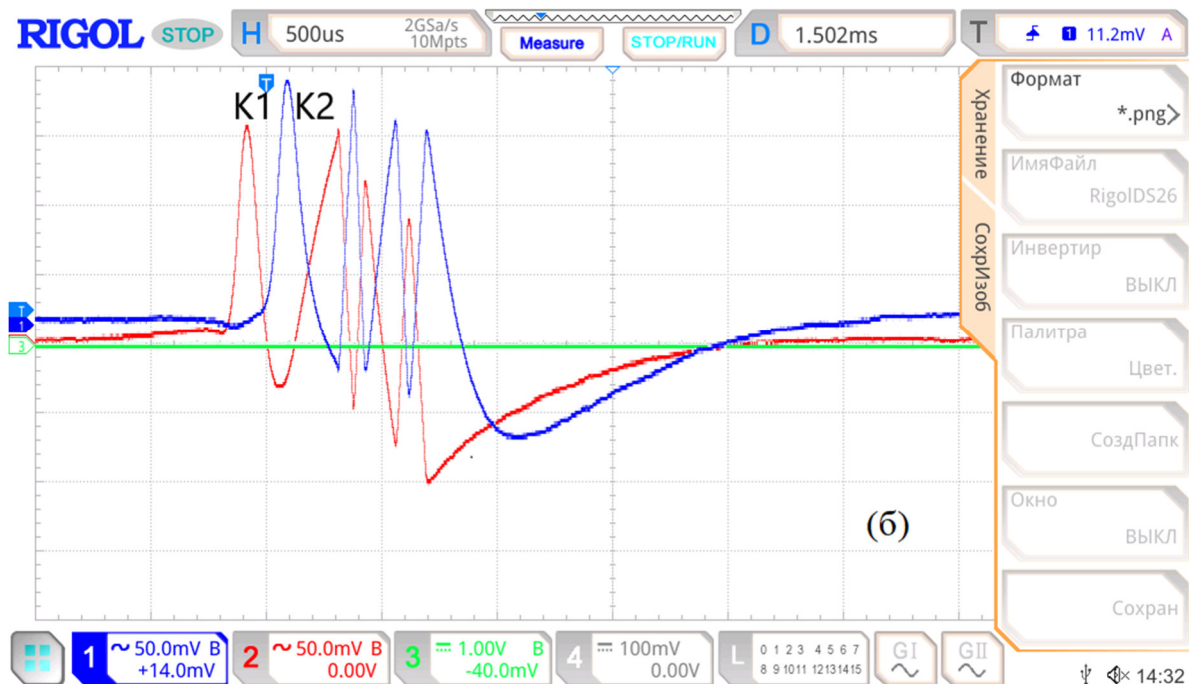
Третий каскад представляет собой не инвертирующий усилитель, выполненный на микросхеме ОРА820 (DA3). Данный каскад предназначен для обеспечения работы усилителя на длинную коаксиальную линию, подключенного к осциллографу.

В качестве записывающей аппаратуры был использован четырёхканальный осциллограф Rigol MSO5104 с максимальной частотой дискретизации 6 Gsps. Питание осциллографа осуществляется через блок гальванической развязки по цепи питания 220 В, чтобы исключить проникание помех с частотой сети 50 Гц через кабели усилителей в вакуумную камеру. Во время эксперимента осциллограф находится в ждущем режиме, с запуском записи по превышению заданного порогового уровня. Запись проводилась одновременно по двум каналам, с частотой дискретизации 1 Gsps и глубиной записи 10 миллионов выборок по каждому каналу. Записанный пакет передавался в компьютер через кабель по протоколу Ethernet для последующей обработки в ЭВМ.

На рисунке 3.15 представлены результаты записанных пролетных импульсов с колец Фарадея (K1, K2) и сеток C1- C6.



MSO5104 Thu March 28 14:32:43 2024



MSO5104 Thu March 28 17:00:13 2024

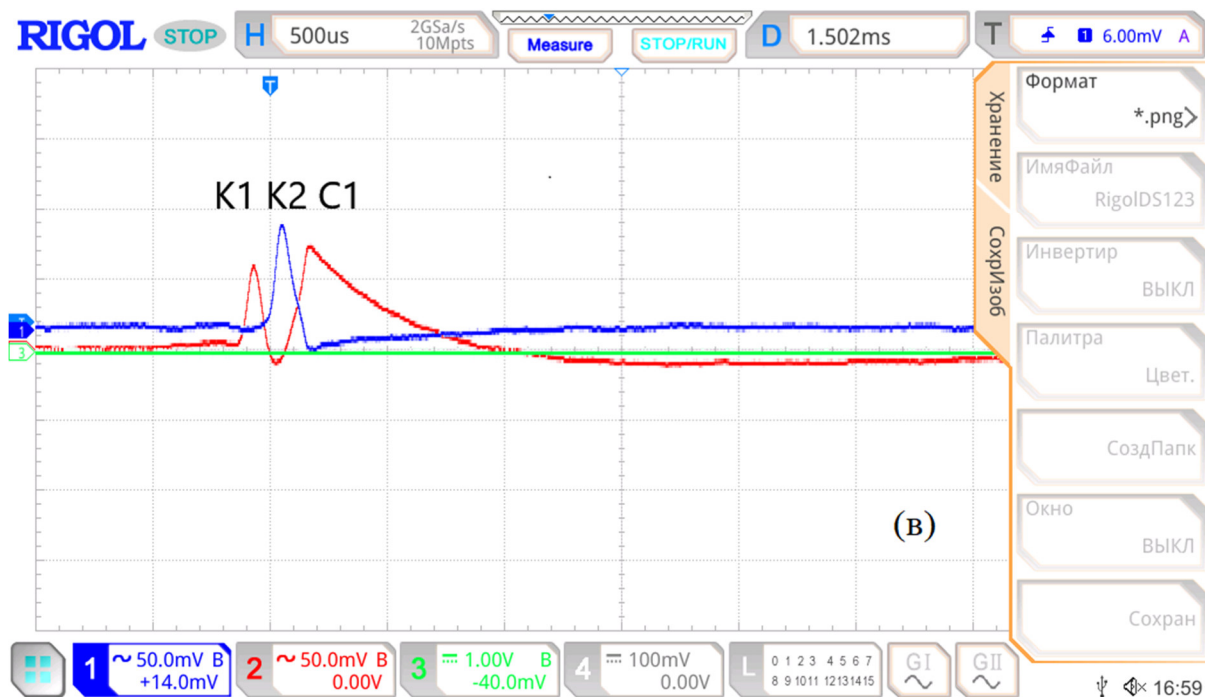


Рисунок 3.15 – Примеры осциллограмм наведенных импульсов: а) ось датчика расположена под углом 0 градусов относительно оси тракта ускорителя; б) ось датчика расположена под углом 25 градусов относительно оси тракта ускорителя; в) осциллограмма, демонстрирующая удар микрочастиц в сетку С1

На рисунках 3.16, 3.17 показаны погрешности измерения модуля скорости микрочастиц и угла их влета в датчик. В процессе проведения эксперимента минимально измеренный заряд имел величину  $10^{-14}$  Кл.

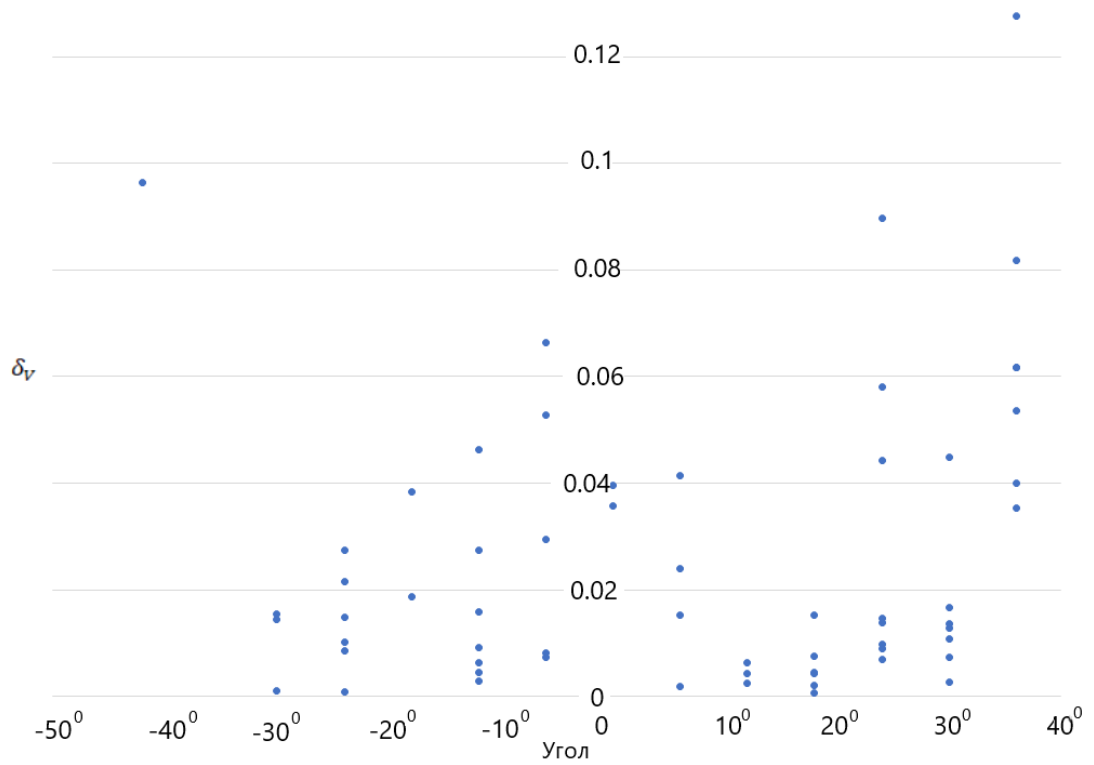


Рисунок 3.16 – Погрешность измерения модуля скорости в зависимости от угла

влета микрочастицы  $\delta_v$

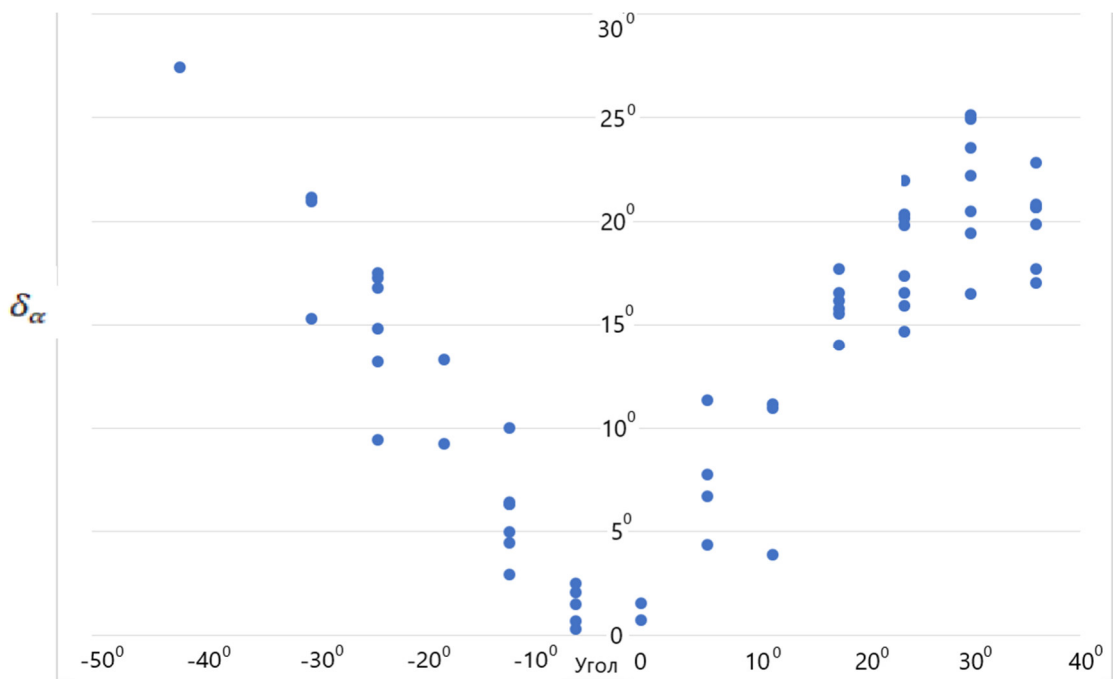


Рисунок 3.17 – Погрешность измерения угла в зависимости от угла влета

микрочастицы  $\delta_\alpha$

### Анализ результатов

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Представленный прототип датчика представляет собой модульную конструкцию, что

позволяет быстро проводить модификацию расположения сеток и производить измерения модуля вектора скорости и угла влета микрочастиц. Подключение нескольких сеток на вход одного усилителя неизбежно ухудшает соотношение сигнал/шум системы, а также снижает быстродействие за счет увеличения входной емкости. В дальнейшем планируется оптимизация его конструкции, а также разработка и изготовление многоканальной системы регистрации данных (с отдельными каналами записи для каждой сетки), которую можно будет разместить в непосредственной близости от датчика, внутри вакуумной камеры.

Результаты проведенных исследований показали, что при больших углах влета микрочастицы в датчик увеличивается число потерь микрочастиц за счет удара их в измерительные сетки. Этого можно избежать, если увеличивать прозрачность сеток.

Погрешность проведенных измерений скорее всего связана с погрешностью изготовления и крепления сеток (порядка 0,5 мм). Погрешность измерения увеличивается при увеличении угла падения микрочастицы, что скорее всего связано с большой погрешностью измерения  $V_x$  и  $V_y$ , вызванной малыми расстояниями между сетками С2 и С3, С4 и С5. Дополнительно проводить измерение скорости микрочастиц можно путем анализа формы наведенного импульса, так как согласно рисункам 5а и 5б вид наведенного импульса зависит от угла влета микрочастицы. Использование такого метода скорее всего будет иметь погрешность больше, чем при использовании метода измерения временных отсчетов, что связано с неточностью оценки амплитуды импульсов и влиянием внутренних и внешних [103, 305\*]. С другой стороны комбинации этих двух способов в дальнейшем позволит сократить количество измерительных сеток, а значит уменьшится масса и габариты датчика, что важно для применения на космических аппаратах.

### **3.5.2 Результаты исследование работы детекторов пролета высокоскоростных заряженных микрочастиц**

Для оценки эффективности работы пролетных измерительных электродов были спроектированы различные модификации детекторов. Испытания опытных образцов детекторов пролетных импульсов проводились на ускорителе заряженных микрочастиц [173\*]. В качестве материалов для изготовления измерительных электродов, из которых изготавливают пролётные датчики, используются металлы и сплавы, к которым предъявляются следующие требования: температурная стабильность геометрических размеров, низкое газовыделение в вакууме, механическая прочность, стабильное электрическое сопротивление, паяемость (подверженность сварке).

На рисунках 3.18 и 3.19 показаны конструкции измерительных электродов для измерения пролетных импульсов, выполненные в виде сеток и отличающихся только методом крепления сеток [173\*].

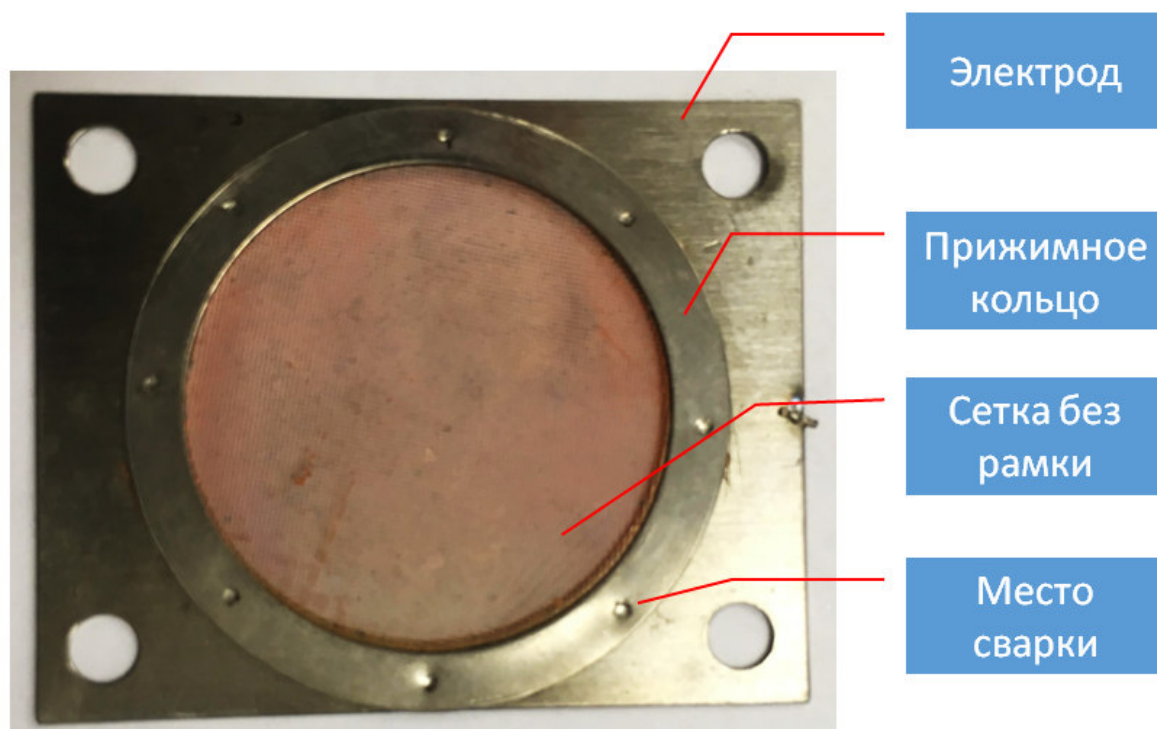


Рисунок 3.18 – Точечная сварка сетки к металлическому каркасу

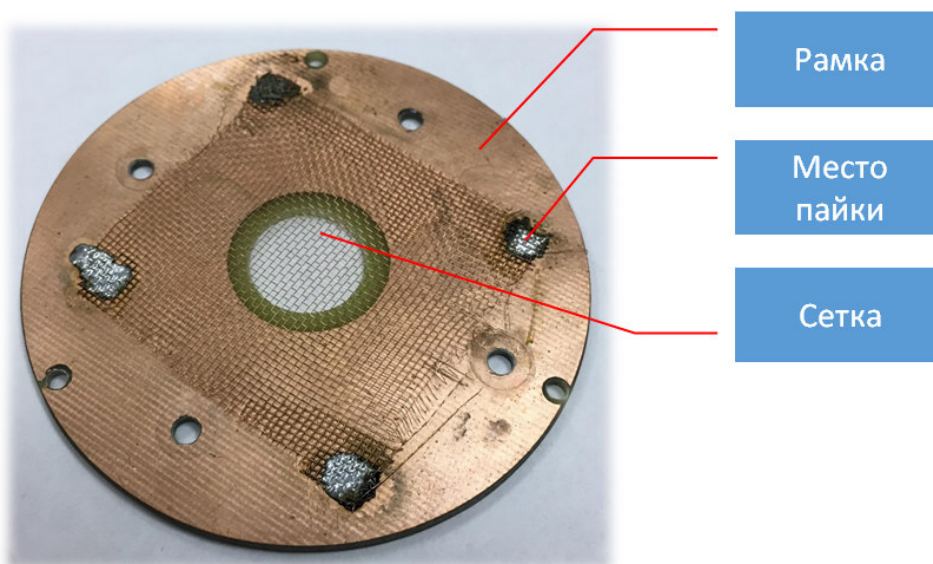


Рисунок 3.19 – Пайка сетки к металлическому каркасу

В следующей конструкции (рисунок 3.20) измерительные электроды были изготовлены методом 3D печати на принтере SLM 280HL в виде сплошного слоя из металла (Al).

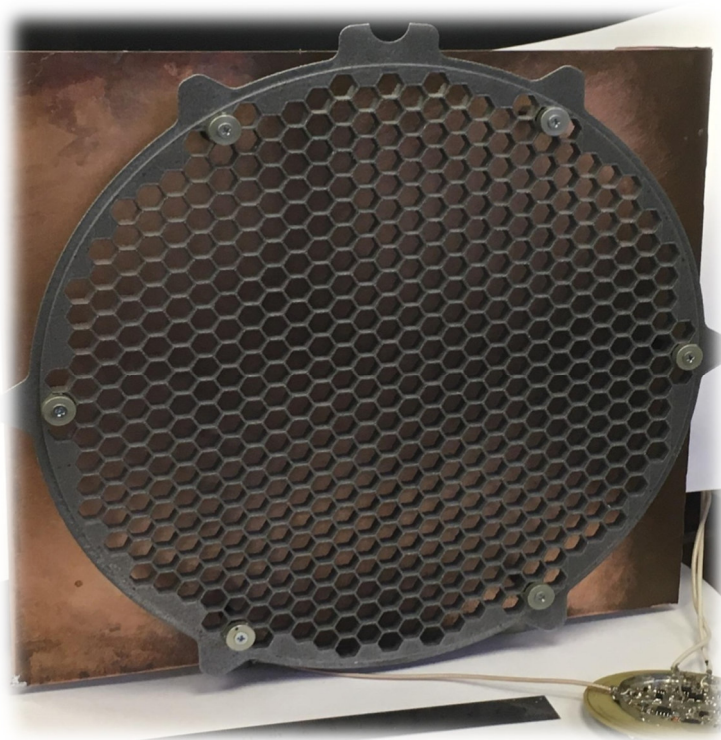


Рисунок 3.20 - Алюминиевый электрод на фоне медной мишени, полученный с использованием аддитивных технологий

Для повышения прозрачности измерительных электродов и уменьшения массы можно использовать электроды в виде сеток, при этом каркас для сеток может быть сделан как диэлектрический, так и из металла [329\*]. На рисунках 3.21, 3.22 показан сетка изготовленная путем напайки проводника на каркас, сделанный из стеклотекстолита. Конструкция отличается простотой изготовления и имеет размеры под формат CubeSat.

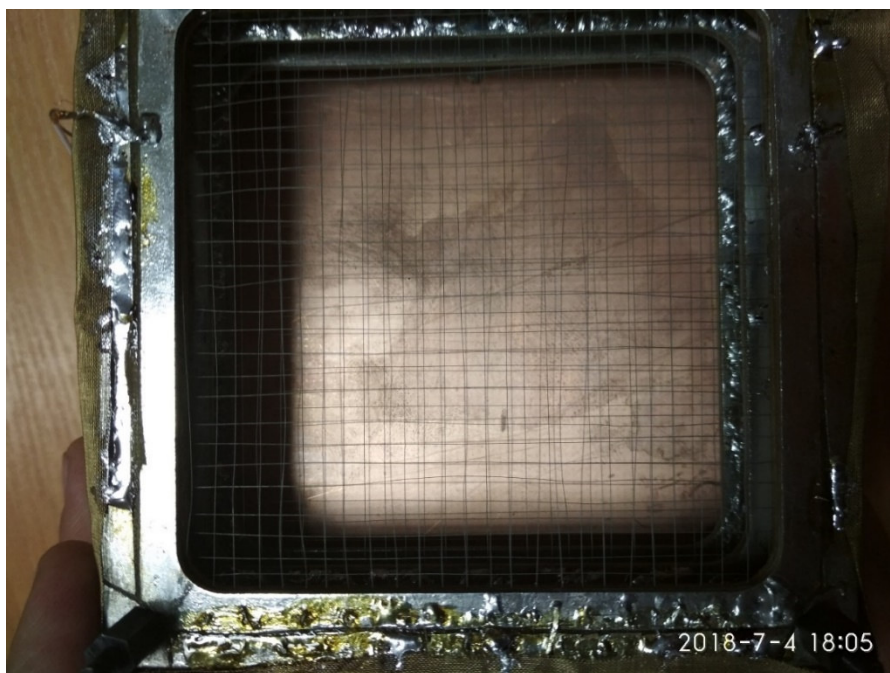


Рисунок 3.21 - Сетка на каркасе из стеклотекстолита

На рисунке 3.23 представлен пример осциллограммы, полученной для конструкции, показанной на рисунке 3.22.

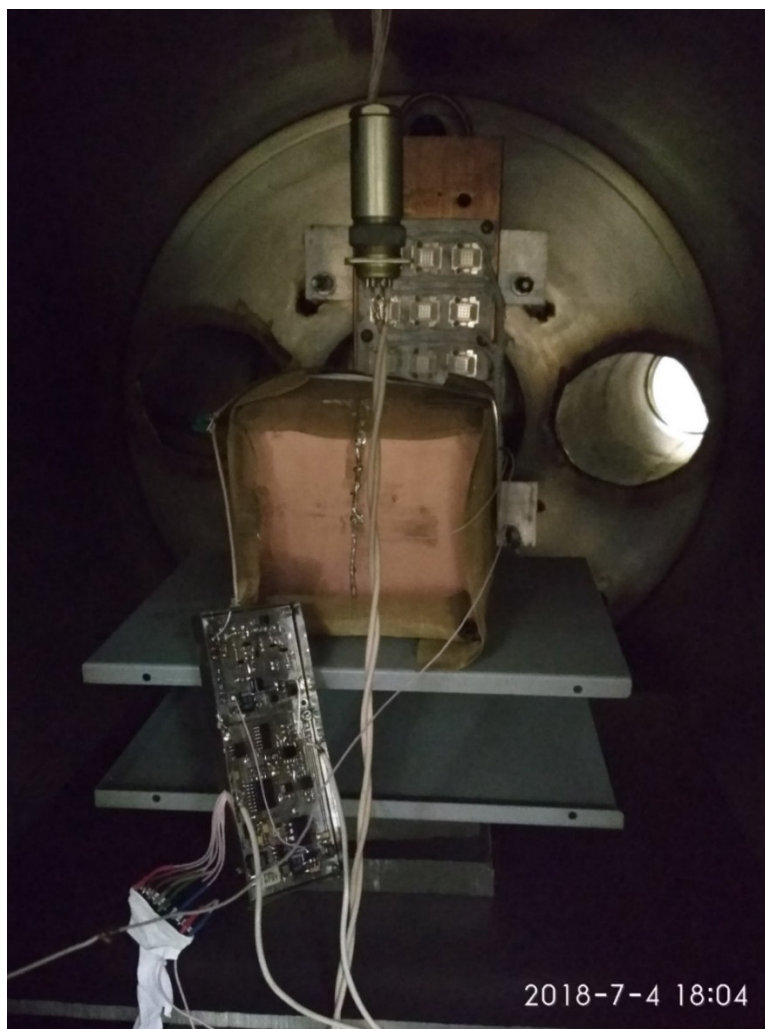


Рисунок 3.22 – Фотография прибор в вакуумной камере

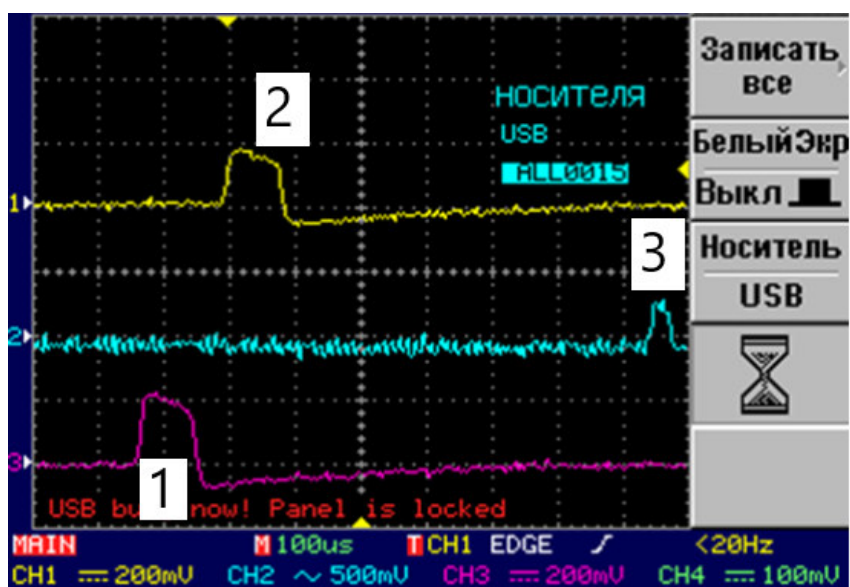


Рисунок 3.23 – Осциллограммы, полученные на ускорителе микрочастиц: 1, - с цилиндров Фарадея, 3 – с етки на каркасе

На основе анализа экспериментальных данных с различных сеточных измерительных электродов была составлена диаграмма области применения рассмотренных конструкций в зависимости от скорости и массы микрочастиц (рисунок 3.24).

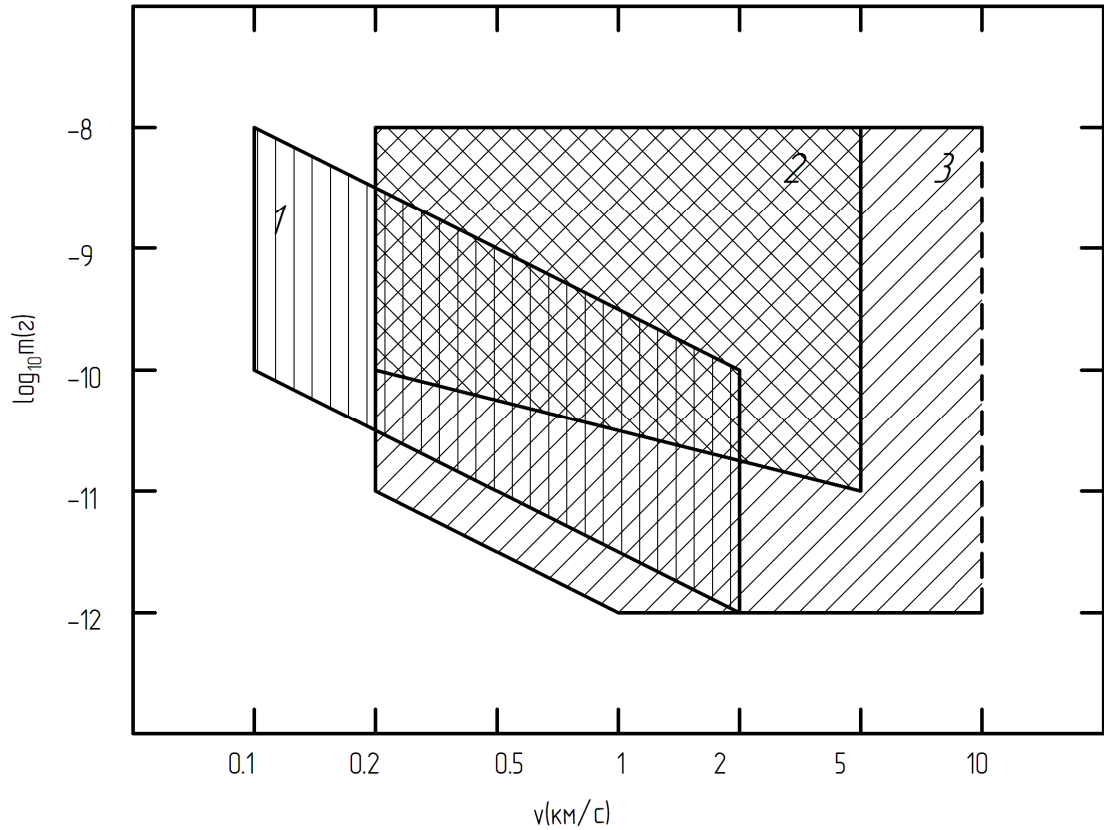


Рисунок 3.24 – Диаграмма области применения различных конструкций: 1 - алюминиевый электрод (соты), 2 – сетка на алюминиевом каркасе, 3 – сетка на диэлектрическом каркасе.

### 3.6 Методика оценки параметров заряженных микрочастиц на основе конструкции прибора, использующего измерительные проводящие сетки

Была разработана методика оценки параметров заряженных микрочастиц на основе конструкции прибора, использующего измерительные проводящие сетки, для исследования. Предлагаемый прибор должен оценивать следующие параметры микрометеороидов: скорость (от 10 м/с до 10 км/с (верхняя планка ограничена максимальной скоростью ускорителя микрочастиц, на котором предполагается проводить испытания), реальная максимальная скорость может достигать 72 км/с)), массу и заряд (отношение  $Q/m = 1 \div 100$  Кл/кг).

Принцип действия предлагаемого устройства (рисунок 3.25) основан на явлении электростатической индукции [34, 95, 301\*, 330\*]. Прибор конструктивно состоит из

отдельных модулей-сеток (1-10), к которым при необходимости подключаются предусилители. Под моментом времени в данной работе будем понимать момент пролета микрочастицей одной из сеток, под временным интервалом - время пролета между двумя сетками.

Заряженная микрочастица (массой  $m$  и скоростью  $\vec{V}(V_x, V_y, V_z)$ ) пролетает сетки 1-9 и ударяется в мишень 10. Сетки 4 и 6 выполнены в виде отдельных электродов-проводников, к каждому из которых подключен предусилитель. При этом на сетках 4 и 6 наводится электрический заряд согласно координате пролета микрочастицы. Путем обработки сигналов с этих электродов выносится решение о месте пролета микрочастицы [94]: с помощью сетки 4 измеряется координата пролета по оси  $X$ , с помощью сетки 6 измеряется координата пролета по оси  $Y$ . Сетки 7, 8, 9 образуют систему для измерения отношения заряда частицы к её массе ( $Q/m$ ). 10 – координатная мишень, рабочая поверхность которой представляет собой резистивный материал, нанесенный на диэлектрик. При ударе микрочастицы в мишень 10 по ней растекаются заряды, при этом в зависимости от места удара на разных концах мишени с помощью усилителей регистрируется соответствующий сигнал. Сетки 1, 3, 5, 7, 9 – экранирующие. На сетку 2 подано напряжение -5 кВ для защиты от внешнего электронного потока.

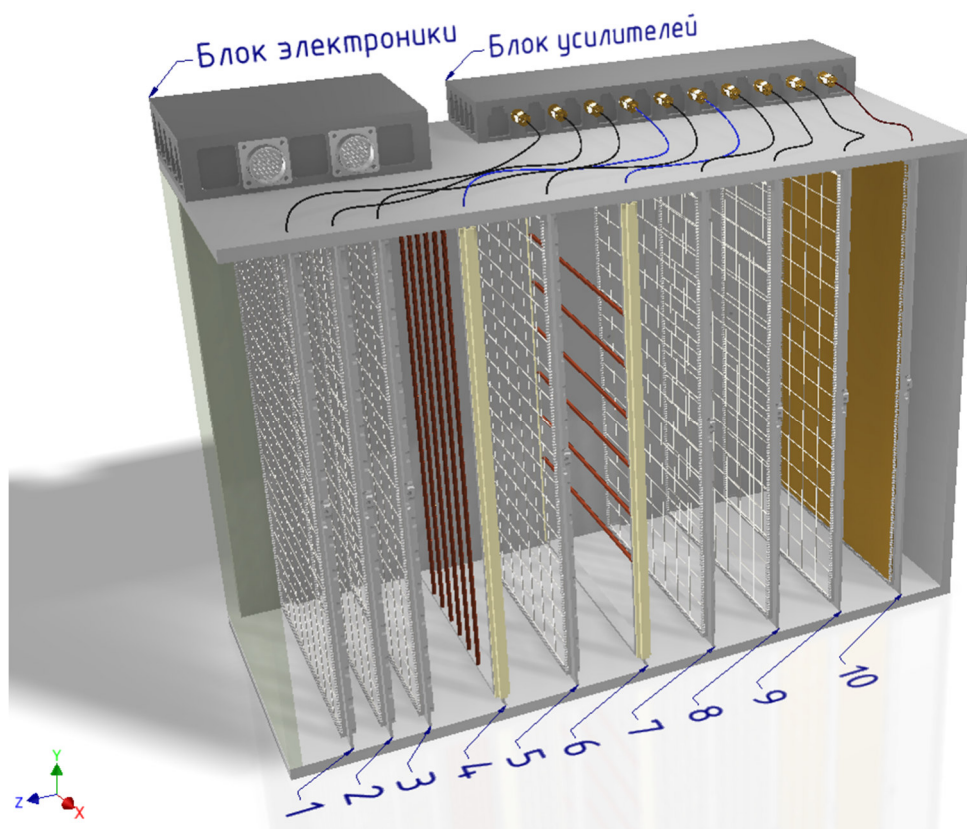


Рисунок 3.25 - Модель прибора для регистрации параметров микрометеороидов

Заряженная микрочастица, подлетая к сеткам 4, 6 и 8, наводит на них импульс тока. Форму импульса тока можно рассчитать с использованием теоремы Шокли - Рамо. Измеряя время возникновения импульсов на сетках 4, 6 и 8, можно определить основные параметры микрочастицы. Измерение проводится путем снятия сигнала с входного сопротивления усилителя  $R_n$ , параллельно которому включены паразитная емкость электрода  $C_э$  и входная емкость предусилителя  $C_n$ . Примем, что вместо двух емкостей существует одна обобщенная емкость  $C = C_э + C_n$ . Тогда на входе усилителя будет наблюдаться колоколообразный импульс напряжения, получившийся в результате интегрирования наведенного тока на обобщенной емкости  $C$ , причем передний фронт данного импульса соответствует периоду времени, когда микрочастица подлетает к измерительной сетке, задний фронт – когда микрочастица удаляется от измерительной сетки, а пик наблюдается в момент пролета микрочастицей сетки. Следует отметить, что при пролете микрочастицы через электроды сеток 4 и 6 импульс напряжения имеет максимальное значение на ближайших электродах, на остальных же электродах будет в этот момент "впадина", обусловленная экранированием ближайшими электродами электрического поля заряженной микрочастицы.

Для определения координаты микрочастицы по оси X при пролете сетки 4 и по оси Y при пролете сетки 6 предлагается использовать методику обработки сигналов, выполненную по аналогии с работами [331, 332].

### Расчетные соотношения

Компоненты вектора скорости микрочастицы определяются согласно выражениям:

$$V_z = d_{4-6}/t_{4-6},$$

$$V_y = (y_{10} - y_6)/t_{6-10},$$

$$V_x = (x_{10} - x_4)/t_{4-10},$$

где  $d_{4-6}$  - расстояние между сетками 4 и 6;  $t_{4-6}$  - время пролета микрочастицей между сетками 4 и 6;  $y_6$  - координата по оси Y пролета микрочастицей сетки 6;  $y_{10}$  - координата по оси Y, вычисляемая при ударе микрочастицы в мишень 10;  $x_{10}$  - координата по оси X, вычисляемая при ударе микрочастицы в мишень 10;  $x_4$  - координата по оси X пролета микрочастицей сетки 4;  $t_{4-10}$  - время пролета микрочастицы между сетками 4 и 10.

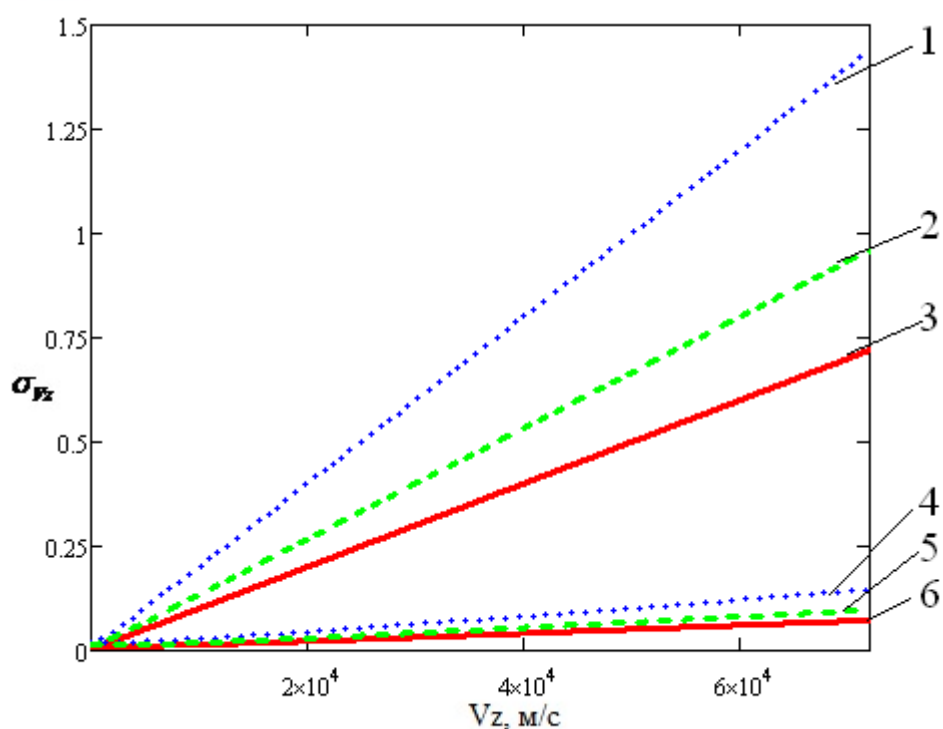
Относительная погрешность измерения скорости оценивается согласно выражению:

$$\sigma_{V_z} = \Delta V_z / V_z = \sqrt{([\partial V_z / \partial d] \Delta d)^2 + ([\partial V_z / \partial t] \Delta t)^2} / V_z = \sqrt{(\Delta d / d_{4-6})^2 + (\Delta t / t_{4-6})^2},$$

где  $\Delta d$  - абсолютная погрешность установки сеток (исходя из технологической возможности изготовления, была задана точность 1 мм),  $\Delta t$  - погрешность измерения времени, которая определяется устройством измерения.

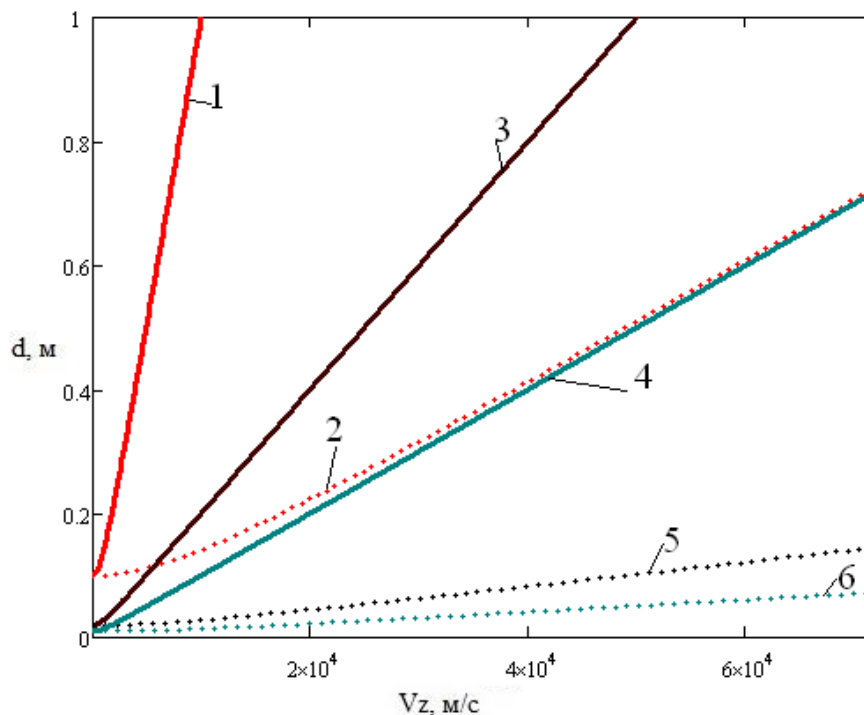
На рисунок 3.26 построен график зависимости относительной погрешности измерения скорости от скорости при различных абсолютных погрешностях измерения временного интервала и расстояния между сетками. Результаты показывают, что производить измерения временных интервалов необходимо с точностью не менее, чем  $10^{-7}$  с. Такую точность можно достичь, если, например, процесс измерения временного интервала производить с использованием схем измерения на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС) [308\*].

Согласно же результатам, показанным на рисунке 3.27 для того, чтобы точность измерения скорости не превышала 5%, необходимо, чтобы расстояние между сетками было не менее 0,1 м.



1 -  $d_{4-6} = 0,1$  м,  $\Delta t = 10^{-6}$  с; 2 -  $d_{4-6} = 0,075$  м,  $\Delta t = 10^{-6}$  с; 3 -  $d_{4-6} = 0,05$  м,  $\Delta t = 10^{-6}$  с; 4 -  $d_{4-6} = 0,1$  м,  $\Delta t = 10^{-7}$  с; 5 -  $d_{4-6} = 0,075$  м,  $\Delta t = 10^{-7}$  с; 6 -  $d_{4-6} = 0,05$  м,  $\Delta t = 10^{-7}$  с

Рисунок 3.26 - Зависимость относительной погрешности измерения скорости от скорости микрочастицы ( $\Delta d = 10^{-3}$  м)



1 -  $\sigma_{Vz} = 0,01$ ,  $\Delta t = 10^{-6}$  с; 2 -  $\sigma_{Vz} = 0,01$ ,  $\Delta t = 10^{-7}$  с; 3 -  $\sigma_{Vz} = 0,05$ ,  $\Delta t = 10^{-6}$  с; 4 -  $\sigma_{Vz} = 0,05$ ,  $\Delta t = 10^{-7}$  с; 5 -  $\sigma_{Vz} = 0,1$ ,  $\Delta t = 10^{-6}$  с; 6 -  $\sigma_{Vz} = 0,1$ ,  $\Delta t = 10^{-7}$  с

Рисунок 3.27 - Зависимость расстояния между сетками 4 и 6 от скорости микрочастицы при заданных погрешностях измерения ( $\Delta d = 10^{-3}$  м)

Заряд микрочастицы можно оценить путем решения дифференциального уравнения для 8-ой сетки:

$$dU_H(t)/dt + U_H(t)/R_H C = i_H(t)/C,$$

где  $U_H(t)$  - напряжение на сопротивлении нагрузки  $R_H$ .

Полагая, что входное сопротивление нагрузки достаточно велико, получаем следующее соотношение:

$$dU_H(t)/dt = Q(\vec{V} \vec{E}_k)/C,$$

При решении данного дифференциального уравнения принимаем, что начальное время  $t_0 = 0$ , а конечное время  $t_{7-8}$  определяется временем пролета микрочастицей расстояния от сетки 7 до сетки 8. Примем следующее допущение: так как структура электрического поля между сетками 7 и 8 совпадает со структурой поля плоского конденсатора, тогда приведенное электрическое поле будет иметь вид  $|\vec{E}_k| = 1/d_{7-8}$ . Выражение для напряжения на входе усилителя в момент пролета микрочастицей сетки 8 примет вид:

$$U(t_8) = \int_0^{t_{7-8}} (Q [V_{zt}(t)/d_{7-8}]/C) dt = (Q/Cd_{7-8}) \int_0^{t_{7-8}} (V_z + at) dt = \frac{Q}{C},$$

где  $V_{zt}(t)$  - текущая скорость микрочастицы, которая изменяется в процессе движения между сетками 7 и 9 под действием электростатического поля  $U_0$ , прикладываемого к сетке 8;  $a = (Q/m)/(U_0/d_{7-8})$  - ускорение микрочастицы под действием электростатического поля, вызванного прикладываемым к сетке 8 напряжением  $U_0$ .

Заряд микрочастицы, таким образом, можно определить согласно выражению:

$$Q = CU(t_8) = (C/K_8)U_{\text{вых}}(t_8),$$

где  $U_{\text{вых}}(t_8)$  - напряжение на выходе усилителя, подключенного к восьмой сетке,  $K_8$  - коэффициент усиления усилителя, подключенного к восьмой сетке.

Относительная погрешность измерения заряда определяется выражением:

$$\sigma_Q = \sqrt{(\sigma_C)^2 + (\sigma_{K_8})^2 + (\sigma_U)^2},$$

где  $\sigma_C, \sigma_{K_8}, \sigma_U$  - погрешности измерения емкости конденсатора, коэффициента усиления усилителя и установки напряжения  $U_0$ .

Соотношение  $Q/m$  можно определить из уравнения для равноускоренного движения микрочастицы под действием электростатического поля:

$$Q/m = (d_{7-8} - V_z \Delta t_{7-8}) / [(U_0/d_{7-8})(\Delta t_{7-8}^2/2)],$$

где  $d_{7-8}$  - расстояние между сетками 7 и 8;  $\Delta t_{7-8}$  - время пролета микрочастицы между сетками 7 и 8.

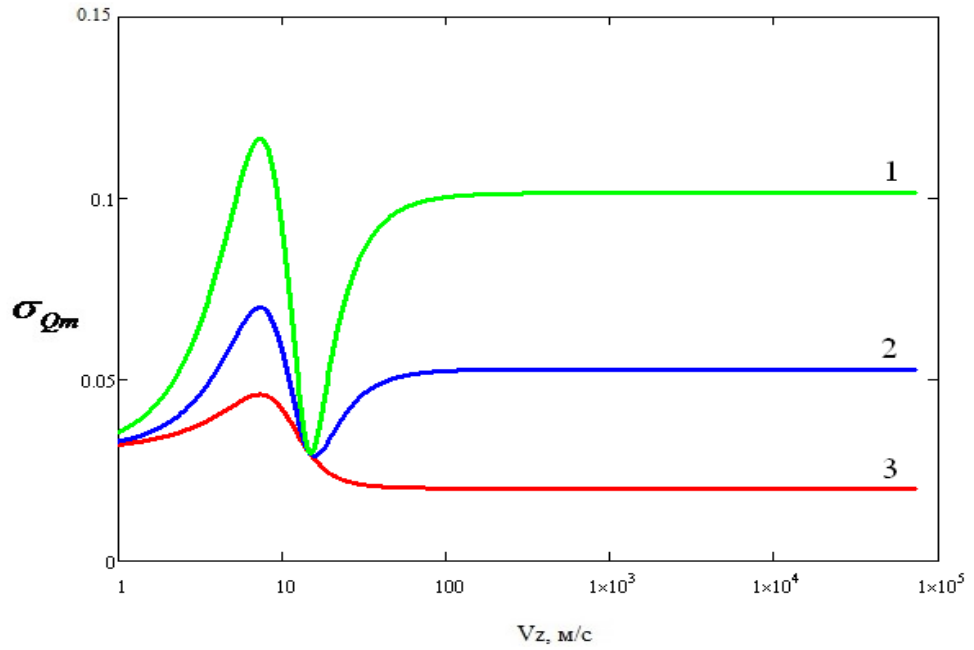
Относительная погрешность измерения  $Q/m$  определяется согласно выражению:

$$\sigma_{Q/m} = \frac{\Delta(Q/m)}{(Q/m)} = \frac{\sqrt{\left[\left(\frac{\partial(Q/m)}{\partial d_{7-8}}\right) \Delta d\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial(Q/m)}{\partial V_z}\right) \Delta V_z\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial(Q/m)}{\partial t_{7-8}}\right) \Delta t\right]^2 + \left[\left(\frac{\partial(Q/m)}{\partial U_0}\right) \Delta U_0\right]^2}}{(Q/m)}.$$

При этом надо заметить, что время прохождения микрочастицей расстояния между сетками 7 и 8 вычисляется согласно выражению:

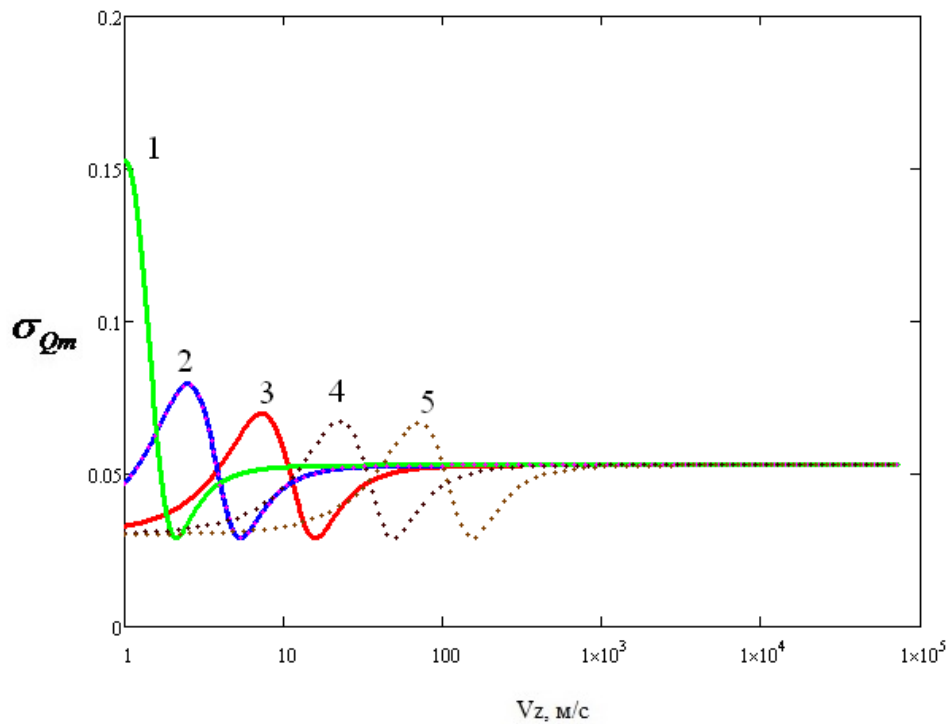
$$t_{7-8} = [V_z + \sqrt{V_z^2 + 2d_{7-8}(Q/m)(U_0/d_{7-8})}] / [(Q/m)(U_0/d_{7-8})].$$

Проведя анализ графиков зависимости относительной погрешности измерения  $Q/m$  от скорости (рисунки 3.28, 3.29) при различных погрешностях измерения скорости,  $Q/m$  и  $U_0$ , можно сделать вывод, что в диапазоне от 1 м/с до 10000 м/с имеются локальные минимум и максимум погрешности, при этом расположение этих экстремумов зависит от  $Q/m$  и напряжения  $U_0$ .



1 -  $\sigma_{V_z} = 0,1$ ; 2 -  $\sigma_{V_z} = 0,05$ ; 3 -  $\sigma_{V_z} = 0,01$

Рисунок 3.28 - График зависимости погрешности измерения  $Q/m$  от скорости ( $Q/m = 1$  кл/кг,  $U_0 = 100$  В)



1 -  $Q/m = 1$  кл/кг,  $U_0 = 1$  В; 2 -  $Q/m = 1$  кл/кг,  $U_0 = 10$  В; 3 -  $Q/m = 1$  кл/кг,  $U_0 = 100$  В; 4 -  $Q/m = 10$  кл/кг,  $U_0 = 100$  В; 5 -  $Q/m = 100$  кл/кг,  $U_0 = 100$  В

Рисунок 3.29 - График зависимости погрешности измерения  $Q/m$  от скорости

Следует отметить, что погрешность измерения  $Q/m$  при повышении скорости движения микрочастицы будет расти, так как относительная погрешность измерения скорости растет при повышении скорости.

Для повышения точности расчета время пролета микрочастицы расстояния между сетками 7 и 8 удобнее произвести измерение  $t_{6-8}$ , а потом уже провести вычисление согласно выражению:

$$t_{7-8} = t_{6-8} - d_{6-7}/V_z.$$

Массу микрочастицы можно определить согласно выражению:

$$m = Q/(Q/m).$$

Тогда относительная погрешность измерения массы будет иметь вид:

$$\sigma_m = \sqrt{\sigma_{Qm}^2 + \sigma_Q^2}.$$

Приведенные расчеты погрешностей позволяет оценить минимальные размеры прибора, необходимые для достижения заданной точности. С целью увеличения точности измерения времени на фоне помех можно применить обработку сигнала, рассмотренную в работе [331].

Оценить максимальную плотность микрочастицы можно исходя из выражения для расчета максимального заряда на поверхности микрочастицы, полагая, что микрочастица имеет круглую форму [34, 332\*]:

$$\rho = \sqrt{(4\pi/3m)/[3\varepsilon\varepsilon_0 E_S/(Q/m)]^3},$$

где  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость,  $\varepsilon_0$  - диэлектрическая постоянная,  $E_S = 2 \cdot 10^9$  В/м - максимальная напряженность электрического поля на поверхности микрочастицы,  $\rho$  - плотность микрочастицы.

### **Краткие выводы**

Проведенное моделирование работы прибора для регистрации параметров микрометеороидов показало, что чем больше расстояние между измерительными сетками, тем точнее результаты измерения. Точность по осям X, Y зависит от частоты расположения измерительных электродов. Полученные соотношения и графики позволяют оценить габаритные размеры прибора для измерения параметров микрометеороидов в зависимости от заданных погрешностей и диапазона исследуемых параметров. После проведения натурных испытаний и анализа полученных данных будет рассмотрена возможность уменьшения количества экранирующих сеток 1, 3, 5, 7, 9 и, как следствие, уменьшение массы и габаритов прибора.

Концепция устройства предполагает его модульность и простоту модификации при различных начальных (измеряемых) параметрах микрочастицы.

### 3.7 Выводы к главе 3

Анализ литературных источников и существующих конструкций пролетных датчиков высокоскоростных заряженных микрочастиц показал, что известные измерители вектора скорости (CDA, ELDA и др.) обладают существенными недостатками: необходимость использования большого количества усилителей (до 16 на датчик), сложность разделения сигналов с объединенных сеток, что снижает точность измерения, а также отсутствие универсальных инженерных моделей для оценки влияния конструктивных параметров (расстояния между сетками, углов их наклона, входной емкости) на погрешности определения скорости, заряда и отношения  $Q/m$  микрочастиц.

Использование теоремы Рамо-Шокли и разработанных аналитических моделей для сеточных электродов (включая модели наклонных сеток, струн конечного размера и учета влияния входной RC-цепи) позволило провести расчет формы наведенных импульсов и оценить погрешности измерения параметров микрочастиц (скорости, заряда, массы) в зависимости от геометрических размеров прибора (расстояния между сетками 0,05-0,1 м) и точности измерения временных интервалов ( $10^{-7}$ - $10^{-6}$  с). Это позволяет на этапе проектирования выбирать конструктивные параметры для достижения требуемой точности (не хуже 5% при скоростях до 10 км/с).

Были проведены экспериментальные исследования разработанного прототипа шестисеточного датчика на ускорителе микрочастиц (диапазон скоростей 100-900 м/с, минимальный заряд  $10^{-14}$  Кл), которые подтвердили работоспособность предложенных конструктивных и схемотехнических решений. Установлено, что погрешность измерения модуля скорости и угла влета возрастает при увеличении угла падения микрочастицы (свыше  $25^\circ$ ), что связано с погрешностями изготовления и крепления сеток (порядка 0,5 мм) и потерями частиц при ударе о сетки. Определены области применения электродов различных форм (алюминиевые соты, сетки на металлическом и диэлектрическом каркасах) в зависимости от скорости и массы регистрируемых частиц.

Разработана методика оценка параметров микрометеороидов на основе предложенной конструкции модульного прибора пролетного типа для исследования высокоскоростных микрочастиц, включающая координатно-чувствительные сетки (для определения траектории по осям X и Y), систему измерения  $Q/m$  с ускоряющим электродом и резистивную координатную мишень. Полученные расчетные соотношения и графики позволяют обоснованно выбирать конструктивные параметры прибора (расстояния между сетками, напряжения смещения) в зависимости от требуемого диапазона измеряемых параметров и заданной точности.

#### **Глава 4. Приборы, используемые для регистрации пылевых микрочастиц в ускорителях микрочастиц**

Для моделирования воздействия факторов космического пространства (микрометеороидов и частиц космического мусора) на элементы конструкции космического аппарата применяют различные ускорители микрочастиц [182, 183, 185, 333, 334\*, 335-338, 339\*, 340, 342, 343\*-349\*]. Для обеспечения эффективного функционирования подобных ускорителей требуется в ходе их работы осуществлять мониторинг параметров микрочастиц, а именно: скорости, массы, заряда и других характеристик. В данной главе исследуются конструкции датчиков высокоскоростных микрочастиц, используемых в трактах ускорителей микрочастиц.

В работе [350] приведена конструкция датчика, в котором контролируется сигнал с фотодатчиков, регистрирующих сигнал лазерного излучения. При пересечении лазерного луча микрочастицей происходит регистрация уменьшения сигнала с фотодатчика. Система позволяет в воздушной среде измерять скорость частицы в диапазоне от дозвуковой до сверхзвуковой. В основе реализованной оптической системы лежат три оптических барьера, которые частицы преодолевают перед ударом о элементы конструкции. Точность измерения скорости в условиях испытаний составляет не менее 1%. Недостатком данного типа датчика является ограничение области регистрации шириной лазерного луча, при этом быстродействие зависит от скорости срабатывания фотодатчика.

В работах [330\*, 351\*, 352] описываются конструкции системы для контроля скорости микрочастиц с помощью светового барьера, создаваемого путем многократного переотражения лазерного луча от зеркальных стенок. Недостатком таких конструкций является потеря световой мощности при каждом переотражении лазерного луча (рисунок 4.2). Также нужно отметить, что в некоторых конструкциях возможна паразитная засветка от других источников излучения света. Конструкция датчиков, как указано в работе [352] позволяет регистрировать скорость от 0,1 м/с до 40 м/с.

В работе [52] предложена конструкция для измерения скорости микрочастицы с помощью SCMOS камеры. В этом методе используется камера при слабом освещении в сочетании с высокочастотными светодиодными вспышками для генерации короткого интервала освещения. Такая технология, согласно авторам статьи [52], позволяет отслеживать частицы размером до 10 микрон со скоростью до 12 км/с. Возможности предложенного метода были подтверждены серией экспериментов по мониторингу движения микрочастиц с различными размерами частиц и материалами при различных конфигурациях камер. Нужно отметить, что подобная же схема использовалась для

измерения скорости микрочастиц в работе [353\*], но в указанной работе скорости частиц были на порядок ниже и использовалось три CMOS-матрицы.

В работе [327] был предложен метод определения размеров сферических частиц диаметром порядка 1 мм путем измерений рассеяния света на этих частицах. В статье описана только теоретическая возможность использования данного метода без экспериментального подтверждения.

В работе [326\*] приведено описание прототипа датчика высокоскоростных микрочастиц, основанного на регистрации отраженного и рассеянного лазерного излучения при прохождении частицы через оптический барьер (рисунок 4.1) [330\*, 350, 354-359, 360\*, 361\*]. Разработанный прототип оптического датчика для регистрации высокоскоростных пылевых частиц позволяет регистрировать микрочастицы с размерами 1-50 мкм. Преимуществами датчика является высокая информативность и возможность работы с низкоскоростными частицами. Использование оптического метода измерения позволило устранить влияние паразитных электромагнитных помех, возникающих в ускорителе высокоскоростных микрочастиц в процессе его работы. В конструкции используется один лазер и четыре фотодиода.

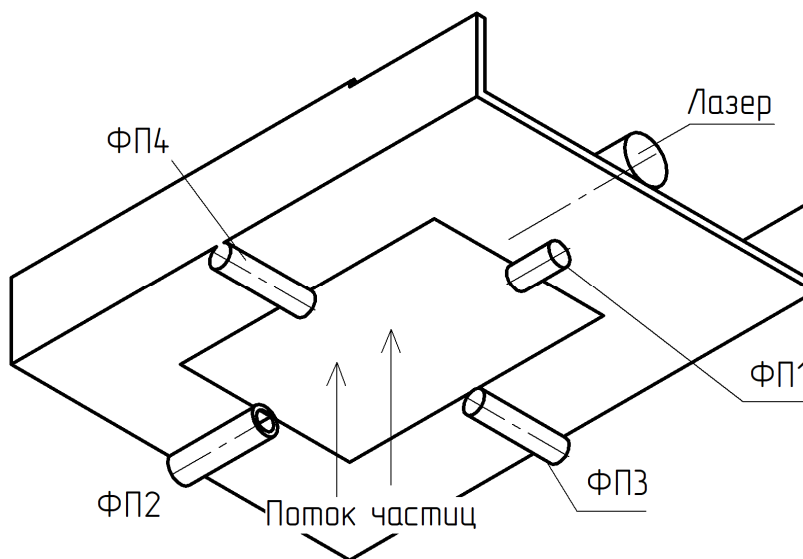


Рисунок 4.1 - Описание конструкции датчика: ФП1 – ФП4 - фотоприемники

В работе [333] рассматривается конструкция датчика для анализа скорости низкоскоростных микрочастиц размерами порядка 100 мкм в жидких средах (маслах, топливе и т.д.) с использованием катушек индуктивности. Конструкция датчика состоит из двух катушек возбуждения и двух чувствительных катушек. Две чувствительные катушки расположены рядом, причем две стороны симметричны, а две катушки возбуждения расположены сразу за двумя чувствительными катушками. На катушки возбуждения подается переменное напряжение, которое генерирует магнитное поле. Когда

микрочастицы из магнитных материалов попадают в датчик, то они искажают силовые линии магнитного поля внутри катушек, что контролируется с помощью схем измерения. Недостатком подобной конструкции является регистрации только частиц из магнитных материалов с небольшой скоростью.

В электростатических ускорителях микрочастицы прежде чем разогнать до нужных скоростей, сначала заряжают до некоторого потенциала. В работе [362] отмечено, что заряд микрочастицы может быть рассчитан согласно выражению:

$$Q = 4\pi\varepsilon_0 \cdot (1,64) \cdot E_0 \cdot r^2,$$

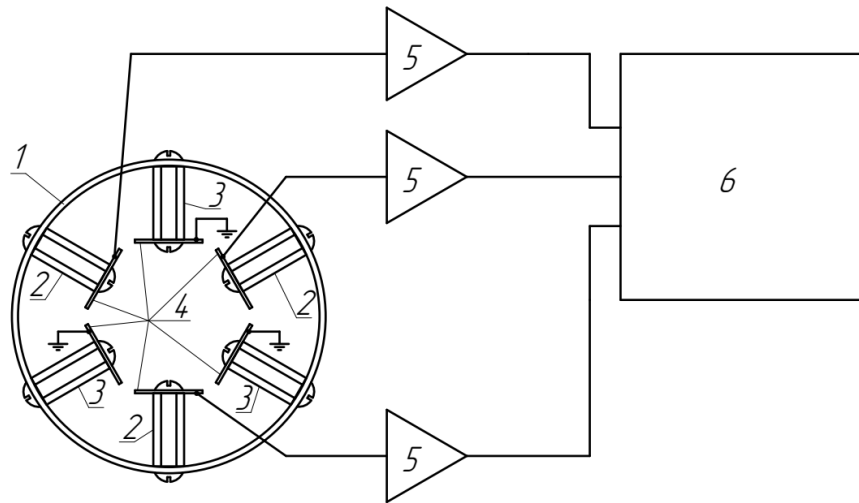
где  $E_0$  - значение однородного электрического поля,  $r$  – радиус микрочастицы,  $\varepsilon_0$  - диэлектрическая постоянная.

Поэтому в ускорителях широкое распространение получили датчики на основе индукции заряда микрочастиц на измерительных электродах. Форму импульса тока, возбуждаемого в измерительном электроде можно рассчитать с использованием, например, теоремы Рамо-Шокли [98, 99, 363].

В работе [303] описана конструкция на основе нескольких проволочных электродов. Данная конструкция датчика позволяет определить место пролета микрочастиц в поперечном сечении тракта ускорителя.

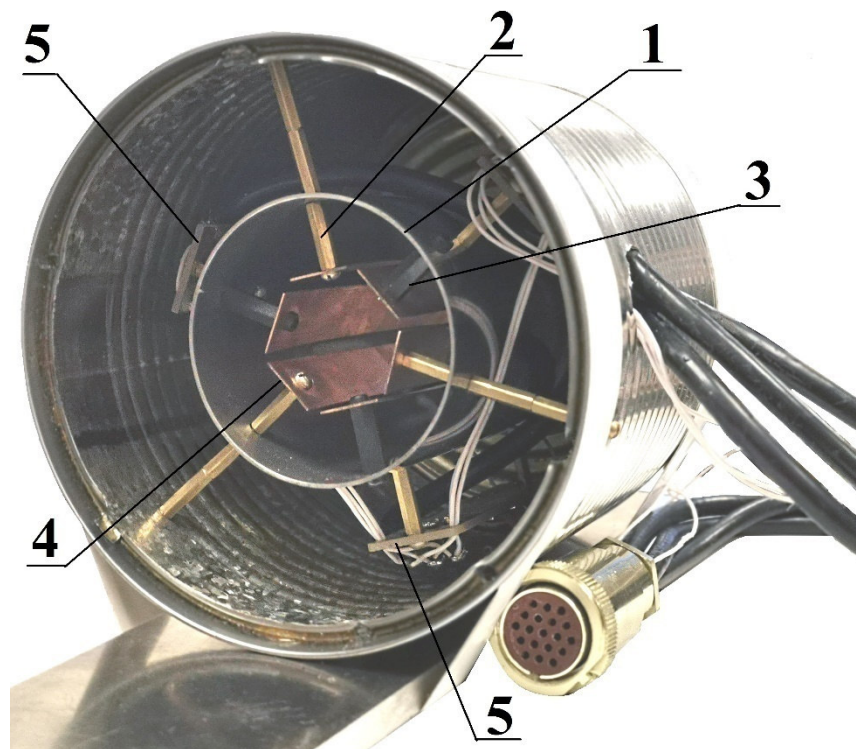
В работе [364] рассмотрена конструкция на основе плоскопараллельных конденсаторов, позволяющая измерять отклонения микрочастицы по сечению тракта ускорителя. Проведенные исследования показали, что точность датчика составляет от 0,09 мм до 0,14 мм в зависимости от положения частиц пыли в детектора при соотношении сигнал/шум равном 700. Максимальная ошибка получалась для микрочастиц, проходящих через центр датчика.

Развитием идей из работы [364] стала конструкция датчика, представленная в работе [332\*] (рисунки 4.2, 4.3). В данной конструкции использовались три измерительных и три заземлённых электрода. Путем анализа сигналов с каждого из трех измерительных электродов оценивается положение микрочастицы в поперечном сечении тракта ускорителя.



1 – экран (сталь); 2 – диэлектрическая втулка (полиэстер); 3 – металлическая втулка (латунь); 4 – пластина (медь); 5 – зарядочувствительный усилитель; 6 – осциллограф

Рисунок 4.2– Структурная схема датчика шести электродного датчика

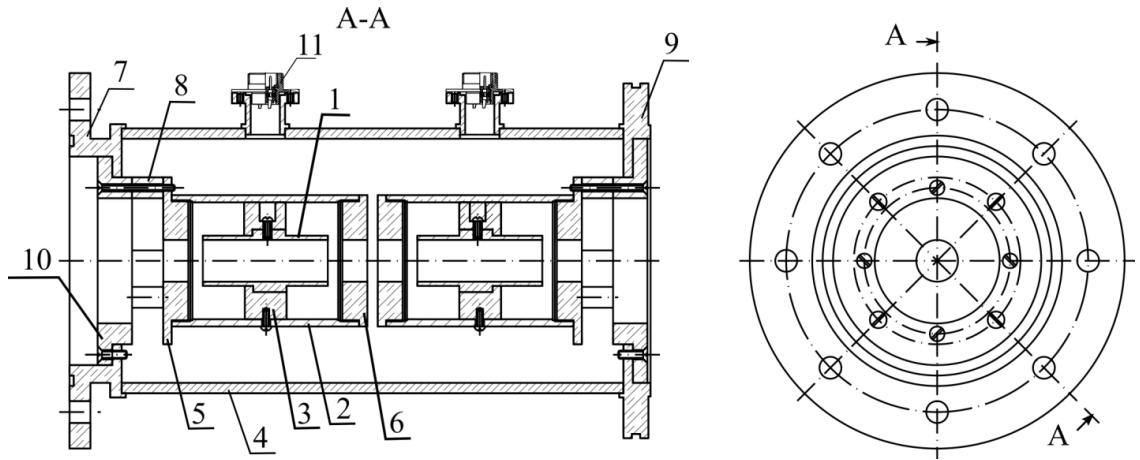


1 – экранирующая трубка, 2 – диэлектрическая стойка, 3 – латунная стойка, 4 – медная пластина, 5 – зарядочувствительный усилитель, 6 – заглушка (на фотографии передняя заглушка для наглядности изображения снята), 7 – корпус

Рисунок 4.3– Фотография прототипа трехэлектродного датчика

Одними из самых распространенных датчиков, которые используются в ускорителях различных типов являются индукционные датчики, форма которых представляет собой

полый цилиндр (цилиндр Фарадея), выполненный из проводящего материала (рисунки 4.4-4.6) [335, 336, 101\*]. Как правило такие датчики используется парами, как показано на рисунке 4.13.



1 - цилиндр Фарадея (латунь), 2 - экран цилиндра Фарадея (нержавеющая сталь), 3 - крепежное кольцо (оргстекло), 4 - внешний корпус индукционного датчика (нержавеющая сталь), 5 - крепежная заглушка экрана (дюраль), 6 - заглушка экрана (дюраль), 7 - фланец стыковки с инжектором (нержавеющая сталь), 8 - втулка (оргстекло), 9 - фланец для стыковки с линейным электростатическим ускорителем (нержавеющая сталь), 10 - стыковочное кольцо (оргстекло), 11 - герметизированный разъем 2РМГ14Б4Ш1Е12Б

Рисунок 4.4 - Конструкция измерительной линейки из цилиндрических электродов



Рисунок 4.5 – Фотография цилиндра Фарадея в экране

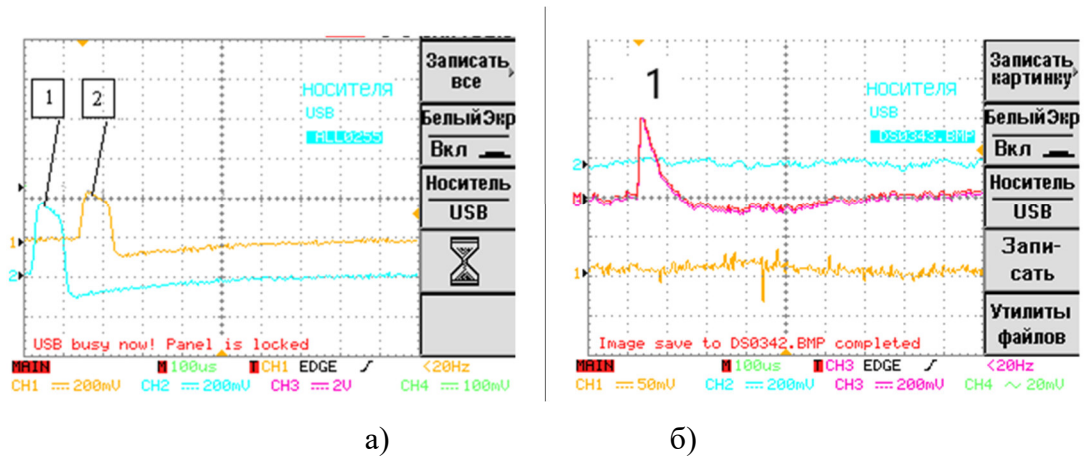


Рисунок 4.6 –Примеры осциллограмм сигнала:

а) с двух (1 и 2) цилиндров Фарадея, расположенных на одной измерительной оси при условии пролета микрочастицы; б) при ударе микрочастицы в 1 цилиндр Фарадея

В первом приближении можно положить, что скорость микрочастицы по оси тракта ускорителя существенно преобладает над её радиальной скоростью. Тогда скорость микрочастицы можно определить согласно формуле:

$$V = \frac{L}{t_L},$$

где  $L$  - расстояние между цилиндрами Фарадея,  $t_L$  - время пролета микрочастицей расстояния  $L$ .

Дифференциальное уравнение, описывающее сигнал на выходе цилиндра определяется выражением:

$$\frac{d}{dt}U_H(t) + \frac{1}{R_H C}U_H(t) = i_H(t) \frac{1}{C},$$

где  $U_H(t)$  - напряжение на сопротивлении нагрузки  $R_H$ , которая подключена к цилиндру Фарадея,  $C$  - емкость цилиндра.

Согласно исследованиям, проведенным в работах [335, 365] выделяют два важных предельных случая, которые получаются при решении дифференциального уравнения представленного выше:

1) при  $t_u = L_u / V \ll \tau = R_H \cdot C$  заряд микрочастицы определяется выражением  $Q = C \cdot U_H$ , где  $t_u$  - время пролета микрочастицей цилиндра Фарадея,  $L_u$  - длина цилиндра Фарадея.

2) при  $t_u \gg \tau$  получаем  $Q = \int_0^t U_H(t) dt$ . В этом случае сигнал  $U_H(t)$

пропорционален изменению во времени заряда на датчике  $dQ/dt$ .

Согласно расчётам, проведенным в работе [366], электрический потенциал на измерительном цилиндре, при условии движения частицы по оси цилиндра можно определить согласно выражению:

$$\phi(z) = \frac{R \cdot \sigma}{2 \cdot \varepsilon_0} \ln \left( \frac{z + \sqrt{z^2 + R^2}}{z - L + \sqrt{(z - L)^2 + R^2}} \right),$$

где  $R$  - радиус цилиндра,  $z$  - текущая координата,  $\sigma = \frac{Q_1}{2\pi \cdot R \cdot L} = \frac{C \cdot U_1}{2\pi \cdot R \cdot L}$  - поверхностный

заряд на цилиндре,  $C$  - емкость цилиндра,  $U_1 = 1$  - приведенный потенциал на цилиндре,

$C = 4\pi^2 \cdot R \cdot \varepsilon_0 \cdot C_1$ , где  $C_1 \approx \frac{\pi \cdot L}{4R} \cdot \frac{1}{\ln^2(8L/R) + \pi^2/12}$  для  $10 < L/R < 20$  [367].

Сигнал при пролете микрочастицы цилиндра Фарадея имеет колоколообразную форму с искаженными фронтами, определяемыми параметрами входной цепи (рисунок 4. ба). В большинстве случаев временные интервалы измеряют по максимальному значению наведенного импульса. При ударе же микрочастицы в цилиндр, можно наблюдать процесс разряда заряда, переданного микрочастицей измерительному электроду (рисунок 4.6б). Согласно полученной осциллограмме (рисунок 4.6б) можно оценить заряд микрочастицы, а также постоянную времени входной RC цепи.

С точки зрения, измерения заряда микрочастицы необходимо сделать цилиндр Фарадея как можно длиннее, но при этом увеличивается емкость измерительного электрода, что приводит к уменьшению входного сигнала. Также слишком длинные измерительные цилиндры приводят к увеличению длины ускорителя в целом, так как в тракте обычно устанавливается от несколько штук до несколько десятков штук подобного типа датчиков. Проведенный анализ показал, что оптимальное соотношение для длины цилиндра находится в диапазоне от 10 до 20 радиусов цилиндра Фарадея.

В работах [34, 368, 369] приводится выражение, которое может быть использовано для расчета массы микрочастицы на основе её измеренного заряда:

$$m = \frac{Q^3 \cdot \rho}{48\pi^2 \varepsilon_0^3 \Phi^3},$$

где  $\rho$  -плотность микрочастицы,  $\epsilon_0$ - диэлектрическая постоянная,  $\phi$ - поверхностный потенциал, который зависит от максимальной пробивной напряжённости электрического поля на поверхности микрочастицы [301\*].

Проведенный анализ конструкций датчиков показал, что обобщенная структурная схема блока измерения с индукционного датчика должна выглядеть согласно рисунку 4.7. Блок измерения может состоять из одного или нескольких измерительных модулей, сигнал с которых через зарядочувствительный усилитель [371,372] поступает на АЦП, где происходит процесс перевода сигнала в цифровой вид. В дальнейшем цифровой сигнал поступает на ПЛИС, где происходит обработка (фильтрация) сигнала [373\*, 374-377]. К ПЛИС часто подключается микроконтроллер, на котором достаточно просто реализовать стандартные интерфейсы обмена, но в случаях большой емкости ПЛИС, можно реализовать модуль микроконтроллера внутри ПЛИС [378]. Проведение экспериментов на ускорителях микрочастиц сопряжено с использованием высокого напряжения (от десятков до сотен киловольт). В связи с этим, для обеспечения помехозащищенности и защиты оборудования от пробоев, передача данных осуществляется по оптической развязке. Сигнал с линии оптической связи направляется в модуль сбора и обработки информации, который объединяет управляющие и измерительные модули ускорителя.

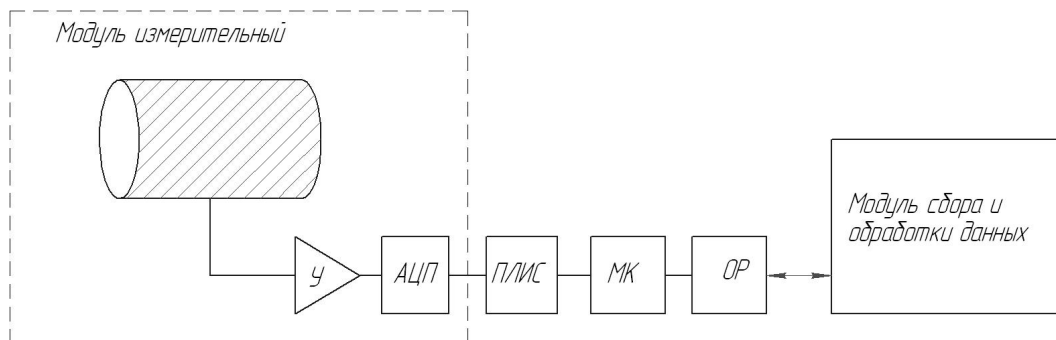


Рисунок 4.7 – Структурная схема измерения: У –усилитель, АЦП-аналогово-цифровой преобразователь, ПЛИС –программируемая логическая интегральная схема, МК-микроконтроллер, ОР- оптическая развязка

На основе рассмотренных конструкций соискателем предлагается конструкция датчика для измерения распределения микрочастиц в поперечном сечении тракта ускорителя, показанная на рисунке 4.8.

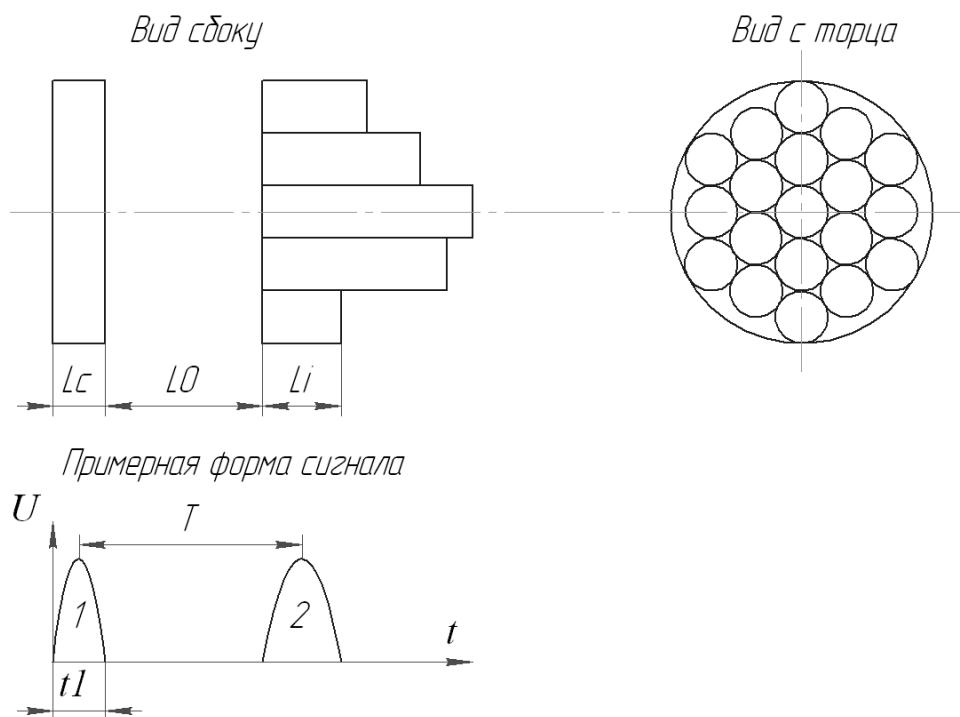


Рисунок 4.8 - Конструкция для измерения распределения микрочастиц в поперечном сечении тракта ускорителя [334\*]

Принцип действия такой конструкции следующий, усилитель подключается к двум электродам, один из которых выполнен в виде цилиндра Фарадея а второй в виде набора трубочек переменной длины. Микрочастица, пролетая эти два электрода, наводит на них сигнал, форма которого показана на рис. 4.8 (сигнал 1 и 2), при этом длительность сигнал 2 зависит не только от скорости микрочастицы, но также от размеров трубки, которую пролетает микрочастица. Зная длину трубки, через которую пролетает частица, можно определить распределения частиц по тракту ускорителя с точностью определяемой поперечном сечением этих трубок. Длину же трубок можно рассчитать при измерении временных интервалов  $T, t_1$  (рис. 4.18) согласно выражению:

$$L_i = L_c \cdot (2T/t_1 - 1) - 2 \cdot L_0$$

Конечно, использование цилиндрических электродов в представленной конструкции (рисунок 4.18) приводит к потерям частиц, которые попадают между трубок. Решением данной проблемы может являться использование прямоугольного профиля трубок.

### Краткие выводы

Проведенный анализ различных конструкции для измерения параметров микрочастиц в тракте ускорителя показал, что конструкции, использующие оптические схемы регистрации обладают помехозащищенностью от паразитных наводок, однако

необходимо использовать лазерное излучение мощностью достаточной для срабатывания фотодатчика. Подобного типа датчики работают в режиме прерывания лазерного излучения или на рассеянном от микрочастицы излучении. Однако оптические способы не позволяют определить заряд микрочастиц и как правило используются для регистрации низкоскоростным микрочастиц.

Наибольшее распространения в ускорителях микрочастиц получили датчики индукционного типа, как правило выполненные в виде полого цилиндра из проводящего материала. Рассмотренные датчики позволяют решать задачи по определению скоростей, зарядов и оценки масс микрочастиц. Рассмотренные модификации датчиков, как правило, используются для определения распределения микрочастиц в поперечном сечении тракта ускорителя.

#### **4.1 Моделирование движения заряженных микрочастиц в тракте ускорителя**

На рисунках 4.9, 4.10 приведены фотография и структурная схема линейного ускорителя для моделирования микрометеоритов, тракт которого состоит из инжектора, линейного электростатического ускорителя (ЛЭСУ), линейного электродинамического ускорителя (ЛЭДУ), трех измерительных линеек и камеры для экспериментов. Вакуум в системе обеспечивают две откачных системы, каждая из которых состоит из вакуумного диффузионного масляного агрегата АВМД -250, форвакуумного насоса НВПР-16 и необходимых задвижек (КВЭ-63). Предельное остаточное давление в системе составляло  $10^{-5}$  мм.рт.ст [101\*, 379\*, 380, 381].



Рисунок 4.9 – Ускоритель микрочастиц

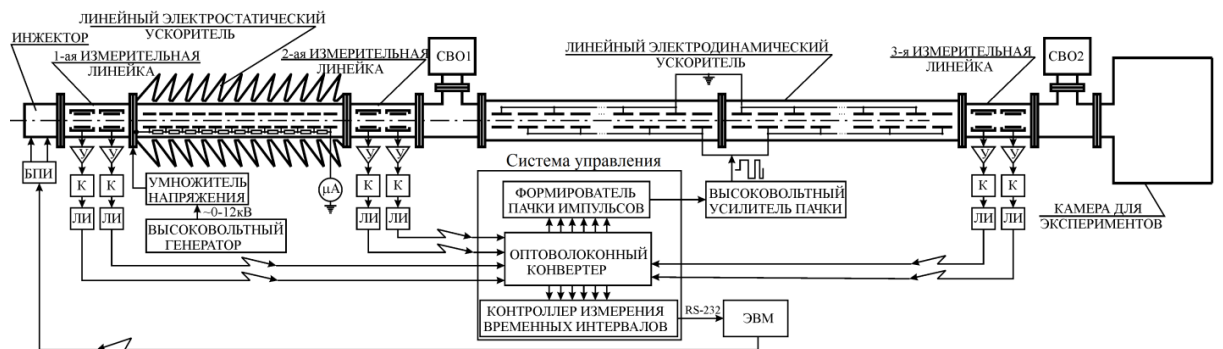


Рисунок 4.10 - Структурная схема линейного ускорителя микрометеоритов: У – усилитель, К – компаратор, ЛИ – Лазерный излучатель, СВО1, СВО2 – система вакуумной откачки 1 и 2 соответственно, БПИ – блок питания инжектора.

Ускоритель работает следующим образом. Инжектор генерирует заряженные частицы в заданном диапазоне масс с частотой порядка 1 Гц. Заряженная частица последовательно проходит первый индукционный датчик, линейный ускоритель, второй индукционный датчик, цилиндрические электроды, третий индукционный датчик и попадает на мишень. Первая пара индукционных датчиков и линейный ускоритель предназначены для определения параметров частицы (удельного заряда  $Q/m$  и начальной скорости микрочастицы  $V_0$ ). Пролетая внутри индукционного датчика, частица наводит на него электрический потенциал пропорциональный заряду и скорости микрочастицы. Анализируя параметры сигналов, поступающих с индукционных датчиков, селектор скоростей и селектор удельных зарядов формируют на своих выходах цифровой код

начальной скорости частицы и код её удельного заряда. В селекторе скоростей измеряются временные интервалы пролёта частицей центров датчиков для первого и второго индукционных датчиков. Измеренные временные интервалы прямо пропорциональны скорости движения частицы. Пройдя через линейный ускоритель, частица получает приращение скорости. Аналогично первому датчику работает второй. По поданным в генератор изменяемых во времени частоты и длительности импульсов в пачке кодам начальной скорости и удельного заряда на его выходе формируется пачка импульсов, которая создаёт ускоряющее поле между каждой парой электродов. Данное поле меняется во времени соответственно положению частицы в ускоряющем тракте. Параметры пачки выбираются из ряда данных для формирования импульсов, заранее заложенных в генератор изменяемых во времени частоты и длительности импульсов в пачке с ЭВМ. Усилитель пачки импульсов переменной длительности усиливает сформированные генератором изменяемых во времени частоты и длительности импульсов в пачке импульсы. Усиленные импульсы поступают на цилиндрические электроды. Третий индукционный датчик подключён к блоку сопряжения и служит для получения выходных данных. Затем уже ускоренная частица попадает на мишень и весь процесс повторяется. ЭВМ производит статистику эксперимента и динамическое управление ускорителем.

Для обеспечения функционирования электродинамического контура ускорителя микрометеоритов используется система управления (рисунок 4.11).

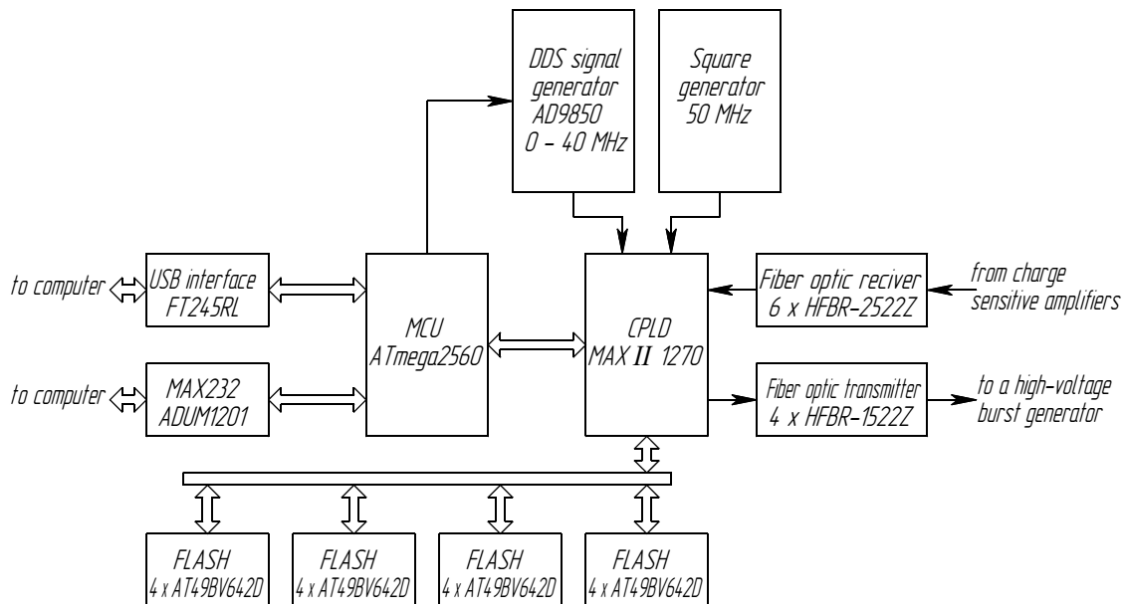


Рисунок 4.11 - Функциональная схема системы управления электродинамического ускорителя

Система управления работает следующим образом. В FLASH памяти записаны интервалы времени между переключениями напряжения на трубках дрейфа линейного электродинамического ускорителя. По поступающим на CPLD MAXII 1270 сигналам с оптических приемников определяется скорость частицы до и после линейного электростатического ускорителя. Коды скоростей поступают на шину адреса FLASH памяти для выбора требуемой пачки импульсов, соответствующей ускоряемой частице. Реализованный на CPLD счетчик начинает считать тактовые импульсы DDS генератора. При совпадении количества импульсов на счетчике и числа в памяти FLASH происходит формирование импульсов на оптических передатчиках. Микроконтроллер служит для передачи данных о работе системы в ЭВМ. Для перепрограммирования памяти используется высокоскоростной интерфейс USB, однако из-за помех во время работы ускорителя данный интерфейс непригоден для передачи данных. Поэтому в системе управления был реализован более помехозащищенный оптически развязанный интерфейс RS-232 [311\*].

В алгоритмах управления ускорения микрочастиц заложена длительность пролета микрочастицей расстояния между двумя электродами с допущением, что поле между электродами имеет равномерный характер. Соискателем была проведена оценка влияния неравномерности электрического поля на время пролета заряженной микрочастицей межэлектродного пространства с целью совершенствования алгоритмов управления ускорителя микрочастиц и повышение его эффективности работы.

На рисунке 4.12 представлены два электрода ускорителя микрочастиц, на которые в определенный момент времени подается напряжение  $U_0$  и  $-U_0$  соответственно.

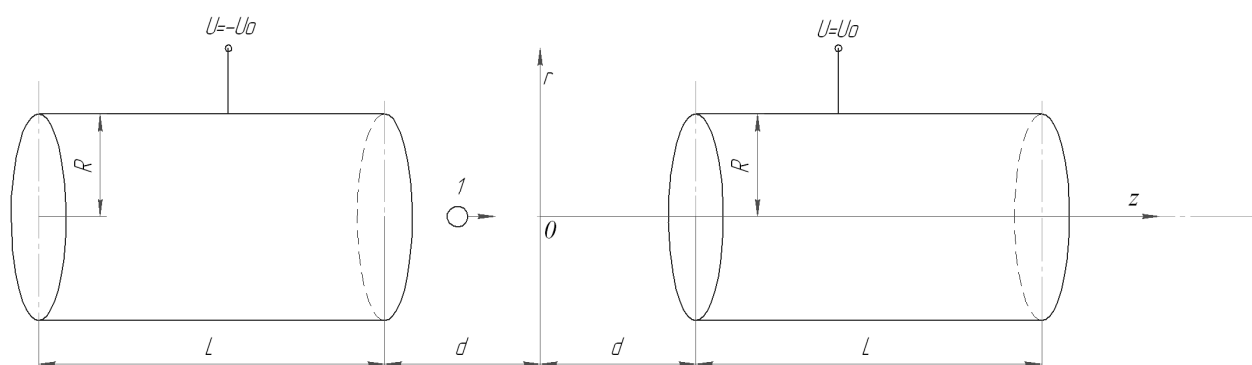


Рисунок 4.12– Система ускорение частицы в поле двух цилиндрических электродов: 1 – заряженная микрочастица

Движение заряженной частицы в электрическом поле при движении по оси цилиндров описывается выражением [382, 383]:

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \vec{F}_q,$$

где  $\vec{F}_q = \vec{E}(\vec{r}) \cdot Q$  - сила, действующая на микрочастицу массой  $m$  и зарядом  $Q$ ,  $\vec{E}(\vec{r})$  - напряженность электрического поля, зависящая от расстояния  $r$ .

Будем рассматривать случай осевого движения заряженной микрочастицы, поэтому в дальнейшем перейдем от векторных величин к проекциям векторов на ось  $z$ .

В случае равномерного поля движение заряженной микрочастицы описывается известным выражением:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{U_0}{d} \cdot Q$$

Оценим степень влияния процессов поляризации микрочастицы в электрическом поле на процесс ее ускорения. Микрочастицы могут быть двух типов: металлические (проводящие) и диэлектрические (твердые или жидкие). В процессе анализа пренебрежем временем поляризации микрочастицы.

Дипольный момент металлической частицы, приобретаемый в электрическом поле, можно рассчитать согласно выражению [384]:

$$\vec{p} = 4\pi R^3 \varepsilon_0 \vec{E},$$

где  $R$  - радиус частицы,  $\varepsilon_0$  - диэлектрическая постоянная, окружающей среды,  $\vec{E}$  - напряженность внешнего поля в точке расположения микрочастицы.

Дипольный момент диэлектрической же микрочастицы можно рассчитать согласно выражению [324]:

$$\vec{p} = 4\pi R^3 \varepsilon_1 \varepsilon_0 \left( \frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 + 2\varepsilon_1} \right) \vec{E} = 4\pi R^3 \varepsilon_0 \left( \frac{\varepsilon_2 - 1}{\varepsilon_2 + 2} \right) \vec{E},$$

где  $R$  - радиус частицы,  $\varepsilon_1 = 1$  - диэлектрическая проницаемость, окружающей среды,  $\varepsilon_2$  - диэлектрическая проницаемость сферической частицы.

Согласно [383] сила, действующая на микрочастицы с дипольным моментом  $\vec{p}$  определяется выражением:

$$\vec{F}_d = (\vec{p} \cdot \nabla) \vec{E} - [\vec{p} \cdot \text{rot} \vec{E}]$$

Так как рассматривается движение частицы в постоянном электрическом, то

$$\vec{F}_d = (\vec{p} \cdot \nabla) \vec{E}$$

Для осевого движения микрочастицы можно записать выражение:

$$F_d = p \cdot \text{grad}_z E$$

При появлении неравномерности электрического поля сила уравнение, описывающие движение заряженной частицы, будет иметь вид

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = F_q + F_d$$

Оценим вклад поляризации в процесс ускорения микрочастицы. В таком случае ускорение металлической микрочастицы может быть представлено следующим выражением:

$$a = E \cdot \left( Q/m + \frac{4\pi R^3 \varepsilon_0}{m} \cdot \text{grad}_z E \right) = E \cdot \left( Q/m + \frac{3\varepsilon_0}{\rho} \cdot \text{grad}_z E \right),$$

где  $\rho$  - плотность микрочастицы.

С учетом выражения для максимального соотношения заряда микрочастицы к ее массе  $Q/m = \frac{3\varepsilon_0 E_{\parallel}}{\rho \cdot R}$  ( $E_{\parallel} = 2 \cdot 10^9 \text{ В/м}$ ) [34] получаем выражение:

$$a = E \cdot \left( \frac{3\varepsilon_0 E_{\parallel}}{\rho \cdot R} + \frac{3\varepsilon_0}{\rho} \cdot \text{grad}_z E \right) = E \cdot \frac{3\varepsilon_0}{\rho} \cdot \left( \frac{E_{\parallel}}{R} + \text{grad}_z E \right)$$

Так как  $\frac{3\varepsilon_0}{\rho} \cdot \text{grad}_z E \ll Q/m$ , то поляризацией металлической микрочастицы можно пренебречь. Аналогично доказывается, что и поляризацией диэлектрической микрочастицы можно пренебречь.

Для случаев распределение напряженности электрического поля, показанных на рисунке 4.13, с помощью численных методов были проведены расчета времени движения заряженной микрочастицы в неравномерном поле относительно времени движения в равномерном поле.

Приняты следующие допущения:

- пренебрегаем размерами микрочастицы с точки зрения искажения электрического поля;
- пренебрегаем инерционными свойствами образования зарядов на поверхности микрочастицы;
- движение микрочастицы в тракте ускорителя осевое.

Результаты расчетов представлены на рисунке 4.14.

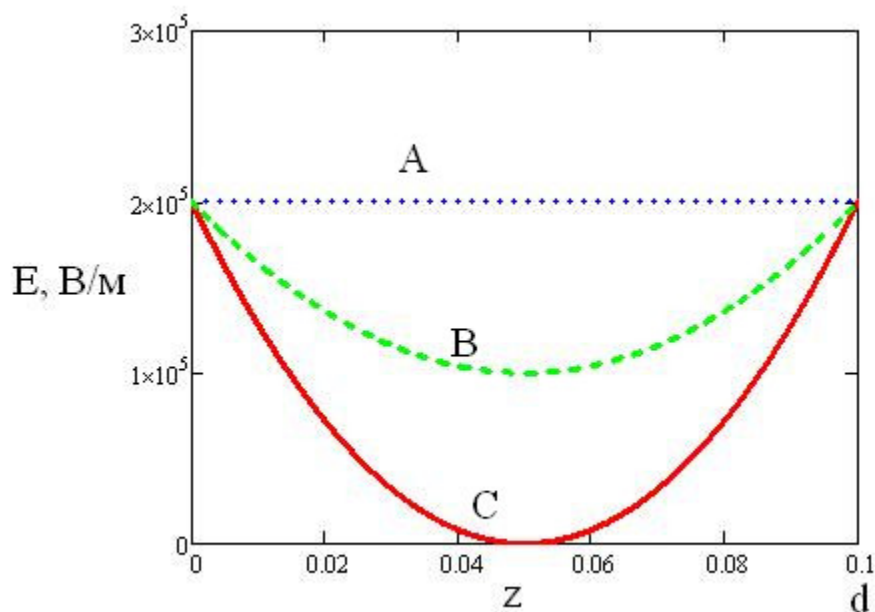
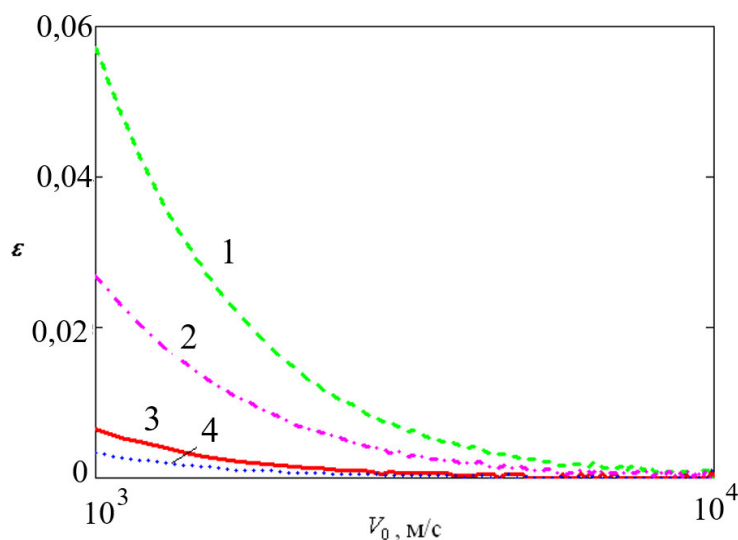


Рисунок 4.13– Распределение напряженности поля между двумя цилиндрическими электродами



Для случая В: 2 – $Q/m=100$ , 4 – $Q/m=10$ ; Для случая С: 1 – $Q/m=100$ , 3 – $Q/m=10$

Рисунок 4.14– Относительная разность времен прихода микрочастицы при различных структурах поля

### Краткие выводы

На основании проведенных расчетов была скорректирована база данных требуемой пачки импульсов, соответствующей ускоряемой частице. Проведенная коррекция привела к повышению средней скорости ускоряемой микрочастицы на 2%. Дальнейшим направлением повышения эффективности системы управления ускорителем микрочастиц является использование нейронных сетей, построенных на базе программируемых

логических элементах, встраиваемых в компьютер. Полученные данные могут быть использованы для улучшения алгоритмов управления ускорителей микрочастиц, а также совершенствование его конструктива.

## 4.2 Описание метода обработки сигналов с индукционного датчика цилиндрической формы. Численное моделирование работы модификаций конструкций индукционных датчиков

### 4.2.1 Описание методики обработки сигналов с индукционного датчика цилиндрической формы

В работах [385, 386] рассмотрена конструкция ускорителя микрочастиц (микрометеороидов и частиц космического мусора) для моделирования воздействия факторов космического пространства на поверхность космического аппарата. С целью ускорения микрочастиц, они заряжаются до некоторого заряда, и впоследствии ускоряются под действием электрического поля. Так как ускоряющее поле в описываемом ускорителе формируется синхронно движению частицы в ускоряющем тракте, то важной задачей является точная регистрация таких параметров ускоряемой частицы как её скорость, удельный заряд и положение частицы в тракте в момент регистрации. В большинстве ускорителей микронных заряженных частиц для измерения таких параметров частиц как их скорости и заряды используются два последовательно расположенных вдоль оси ускорителя цилиндра Фарадея. На рисунке 4.15 приведена фотография измерительной линейки, состоящий из двух цилиндров Фарадея [101\*].



Рисунок 4.15 - Фотография корпуса участка ускорителя микрочастиц с двумя цилиндрами Фарадея

К левому фланцу измерительной линейки присоединен инжектор заряженных микронных частиц. Подробное описание конструкции инжектора и характеристик его работы приведено в [385]. Правый фланец измерительной линейки соединен с трактом линейного электростатического ускорителя. Внешний корпус индукционного датчика выполнен из трубы с внешним диаметром 127 мм и толщиной стенки 5 мм. Материал трубы - нержавеющая сталь марки 12X18H10. Такая толщина стенок обеспечивает необходимую прочность конструкции, принимая во внимание нагрузку, вызванную наличием вакуума внутри измерительной линейки. Экран цилиндра Фарадея (2) также выполнен из трубы нержавеющей стали внешним диаметром 63 мм и толщиной стенок 3,5 мм. Цилиндр Фарадея выполнен из латуни и имеет внутренний диаметр 20 мм, что соответствует диаметру ускорительного тракта, толщину стенок 2 мм и длину 60 мм. Расстояние между внутренними краями цилиндров Фарадея составило 43 мм (шаг следования цилиндров Фарадея 103 мм). В центральной части цилиндра имеется утолщение, обеспечивающее его крепление к экрану посредством крепежного кольца. Фотография одного цилиндра Фарадея в экране приведена на рисунке 4.5.

Для соединения цилиндра Фарадея с разъемом используется посеребренный провод в экране и фторопластовой изоляции. Разъем 2РМГ14Б4Ш1Е12Б был выбран из необходимости герметизировать ввод. Следует отметить, что корпус данного разъема выполнен из нержавеющей стали, что обеспечивает прочность соединения с усилителем (фактически усилитель крепится только посредством резьбового соединения с разъемом), а также электрическое соединение усилителя с разъемом. Единственным недостатком использования данного провода является его достаточно большая удельная емкость (130 пФ/м). После сборки общая индуктивность измерялась посредством измерителя RLC E7-22. Общая выходная емкость датчика составила 46,8 пФ и 43,3 пФ для первого и второго цилиндров Фарадея соответственно. Уменьшить длину используемого провода не представлялось возможным ввиду конструкции корпуса индукционного датчика, который предполагает пайку провода к разъему после установки цилиндра Фарадея в экран внутри корпуса, что делает необходимым иметь некоторую избыточную длину провода для доступа к местам пайки. Альтернативой могло бы быть соединение посредством дополнительного разъема внутри корпуса, однако в этом случае к собственному сопротивлению провода добавилось бы сопротивление контакта, что неприемлемо ввиду низких потенциалов, наводимых на цилиндр Фарадея.

#### **Теоретическая модель работы индукционного датчика**

Для функционирования линейного ускорителя [31] необходима синхронизация движения ускоряемой частицы в тракте и напряжения на трубках дрейфа линейного

электродинамического ускорителя. Для расчета времён переключения напряжений на трубках дрейфа необходимо измерения таких параметров частицы как ее удельного заряда и скорости. Необходима также синхронизация времени влета частицы в тракт и времени начала формирования пачки ускоряющих импульсов. Таким образом, ставится задача разработки теоретической модели для расчета напряжения на цилиндре Фарадея индукционного датчика от параметров частиц.

В первом приближении можно положить, что скорость частицы по оси тракта ускорителя существенно преобладает над радиальной скоростью частицы.

Введем допущение, что заряженная микрочастица представляет собой точечный заряд. Согласно [98] заряд, наведенный на  $k$ -м электроде, равен произведению влияющего заряда  $Q$  на потенциал фиктивного поля Лапласа системы в точке нахождения  $Q$ , которое возникло бы, если бы на  $k$ -й электрод был задан безразмерный потенциал, остальные же электроды были бы заземлены, а сам заряд  $Q$  удален из системы на бесконечность.

Так как система состоит из двух электродов: измерительного (цилиндр Фарадея) и экрана, представляющие собой два соосно расположенных цилиндра, то при подлете заряженной частицы к измерительному электроду (цилиндру Фарадея), на нем наводится заряд:

$$Q_{ik} = -Q \cdot \varphi_Q(x, y, z), \quad (4.1)$$

где  $Q$  - заряд микрочастицы,  $\varphi_Q(x, y, z)$  - потенциал фиктивного поля Лапласа в точке нахождения заряда  $Q$ . Как можно заметить из формулы (4.1)  $Q_{ik} = -Q$  при  $\varphi_Q(x, y, z) = 1$ , что справедливо когда частица находится внутри цилиндра Фарадея.

Перейдем к понятию тока, который протекает в измерительном электроде. Заряд, подлетая к электродам, наводит на них импульс тока, форму которого можно рассчитать с использованием теоремы Шамо-Рокли [98, 99]. Согласно этой теореме, если в пространстве, в котором располагаются электроды со скоростью  $\vec{V}$  движется заряд  $Q$ , то на  $k$ - электрод наводится ток:

$$i_k(t) = Q \cdot (\vec{V} \cdot \vec{E}_k), \quad (4.2)$$

где  $\vec{E}_k$  — эффективная (взвешенная) напряжённость поля в точке, где находится заряд  $Q$  в момент времени  $t$ , рассчитанная по схеме: заряд удалён, потенциал проводника, с которого снимается ток, равен 1, потенциал оставшихся проводников равен 0 [99].  $(\vec{V} \cdot \vec{E}_k)$  - скалярное произведение вектора скорости и эффективной напряженности.

Формула (1) выведена в предположении [99], что поле движущегося заряда удовлетворяет уравнению Лапласа, и не учитывает конечной скорости распространения электромагнитных волн. В связи с этим будет некоторая задержка в распространение сигнала [98].

$$i_k(t) = Q \cdot (\vec{V} \cdot \vec{E}_k) + \int_W (\vec{E}_k \cdot \vec{j}_{см}) dW ,$$

где  $\vec{j}_{см} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$  - плотность тока смещения,  $W$  –объем через, который протекает ток  $\vec{j}_{см}$  .

Пренебрегая током смещения, можно составить эквивалентную схему для расчета выходного напряжения нашего датчика (рисунок 4.16) [98].

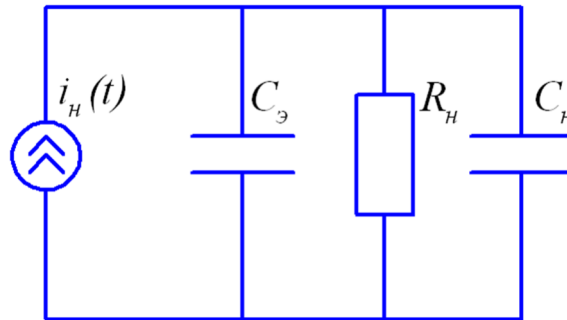


Рисунок 4.16 – Эквивалентная измерительная схема

Пренебрегая емкостью нагрузки по сравнению с емкостью цилиндра Фарадея относительно Экрана получим следующее дифференциальное уравнение, связывающее наведенный ток в измерительном электроде, параметры входной части усилителя и параметры высокоскоростной микрочастицы:

$$\frac{d}{dt} U_n(t) + \frac{1}{R_H C_3} U_n(t) = i_n(t) \frac{1}{C_3} , \quad (4.3)$$

где  $U_n(t)$  - напряжение на сопротивлении нагрузки  $R_H = 2 \text{ МОм}$ , которая подключена к цилиндру Фарадея,  $C_3 = 32,2 \text{ нФ}$  - емкость цилиндра Фарадея.

С учетом выражения (4.2) выражение (4.3) можно представить в виде:

$$\frac{d}{dt} U_n(t) + \frac{1}{R_H C_3} U_n(t) = Q (\vec{V} \cdot \vec{E}_3) \frac{1}{C_3} . \quad (4.4)$$

Так как согласно допущению о малости радиальной составляющей скорости, то преобладает только компонента скорости микрочастиц, направленная по оси цилиндра. Тогда:

$$\frac{d}{dt} U_n(t) + \frac{1}{R_H C_3} U_n(t) = Q \cdot (V_z \cdot E_z(r, z)) \frac{1}{C_3} , \quad (4.5)$$

где  $E_z(r, z)$  - осевая компонента фиктивной напряженности электрического поля цилиндра Фарадея.

Так как цилиндр симметричен относительно своего центра, то и распределение фиктивной напряженности электрического поля цилиндра Фарадея должно обладать симметрией, относительно средней линии цилиндра. Таким образом, получаем, что наведенный ток при подлете микрочастицы к цилиндру Фарадея и наведенный ток при вылете частицы из цилиндра Фараде должны протекать в разные стороны.

Рассмотрим момент времени от появления заряженной микрочастицы перед цилиндром Фарадея до момента, когда частица долетает до средней линии цилиндра.

Напряжение на сопротивлении нагрузки из практики измерения имеет колоколообразный импульс, обладающий асимметрией относительно своего центра.

При максимальном значении  $U_n(t)$ , очевидно, что:

$$\frac{d}{dt}U_n(t) = 0 \quad (4.6)$$

Согласно (4.6) получим:

$$U_n(t) = Q \cdot V_z \cdot E_z(r, z) \quad (4.7)$$

Таким образом, получаем, что напряжение  $U_n(t)$  примет свое максимальное значение при максимальном значении  $E_z(r, z)$ .

После зарядки измерительного электрода до заряда равного заряду микрочастицы наведенный ток должен обратиться в 0. Заряд на цилиндре Фарадея должен быть равен согласно (1) заряду микрочастицы в центре цилиндра, где

$$Q_n = \int i_n(t)dt = -Q \cdot \varphi_Q(r, z)|_{\varphi_Q(r, z)=1} = -Q \quad (4.8)$$

$$\int C_3 \frac{d}{dt}U_n(t)dt + \int \frac{1}{R_H}U_n(t)dt = \int Q \cdot (V_z \cdot E_z(r, z))dt \quad (4.9)$$

$$C_3 \cdot U_n(t) + \int_{-\infty}^t \frac{1}{R_H}U_n(t)dt = Q_n(t) \quad (4.10)$$

При достаточно большом сопротивлении нагрузки  $R_H$  можно пренебречь токами разряда через измерительную нагрузку и формула превращается в простую формулу [98].

$$C_3 \cdot U_n(t) = Q_n(t) \quad (11)$$

Проведенные же нами эксперименты показали, что пренебречь  $R_H$  нельзя.

Поэтому

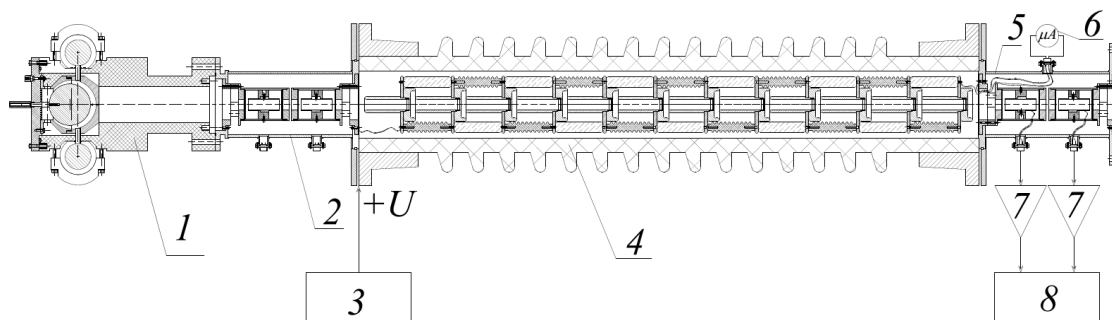
$$C_s \cdot U_n(t_Q) + \int_{-\infty}^{t_Q} \frac{1}{R_H} U_n(t) dt = Q_n(t_Q) = Q, \quad (4.12)$$

где  $t_Q$  - момент времени, когда заряженная микрочастица достигает средней линии цилиндра Фарадея.

Согласно (4.4) регистрируемое напряжение будет зависеть как от скорости и заряда микрочастицы, так и от траектории ее пролета цилиндра Фарадея, в частности отклонения ее траектории от оси тракта ускорителя. То есть, зная эффективную напряженность измерительного электрода, можно оценить распределения траекторий микрочастиц по тракту ускорителя.

### Результаты экспериментов

Для экспериментальной проверки была проведена серия экспериментов с использованием лабораторного стенда моделирования факторов космической среды [386]. Схема проведения эксперимента приведена на рисунке 4.17. В качестве усилителя был разработан и собран зарядочувствительный усилитель с коэффициентом усиления  $K_u = 1000$  [387].



1 – Инжектор; 2 – первый индукционный датчик, 3 - высоковольтный источник (до 150 кВ), 4 - линейный электростатический ускоритель; 5 – второй индукционный датчик, 6 - микроамперметр, 7 - зарядочувствительный усилитель, 8 - осциллограф GDS-4002

Рисунок 4.17 – Структурная схема проведения эксперимента [386]

Для того, чтобы иметь возможность исследовать сигналы с цилиндров Фарадея для высокоскоростных частиц, к осциллографу были подключены усилители, соединенные с цилиндрами Фарадея второго индукционного датчика, установленного после линейного электростатического ускорителя.

Для контроля напряжения на линейном электростатическом ускорителе использовался микроамперметр, измеряющий ток в цепи резистивного делителя ускорителя. По известному ускоряющему напряжению и скоростям частицы до и после

линейного электростатического ускорителя можно определить удельный заряд частицы [385].

В ходе эксперимента снимались осциллограммы с цилиндров Фарадея при различных параметрах микрочастиц. На рисунке 4.18 представлена типовая осциллограмма, а на рисунке 4.19 - результаты экспериментов, обработанные таким образом, что вместо оси времени ось абсцисс отображает координату до средней линии цилиндра Фарадея для семи скоростей микрочастиц.

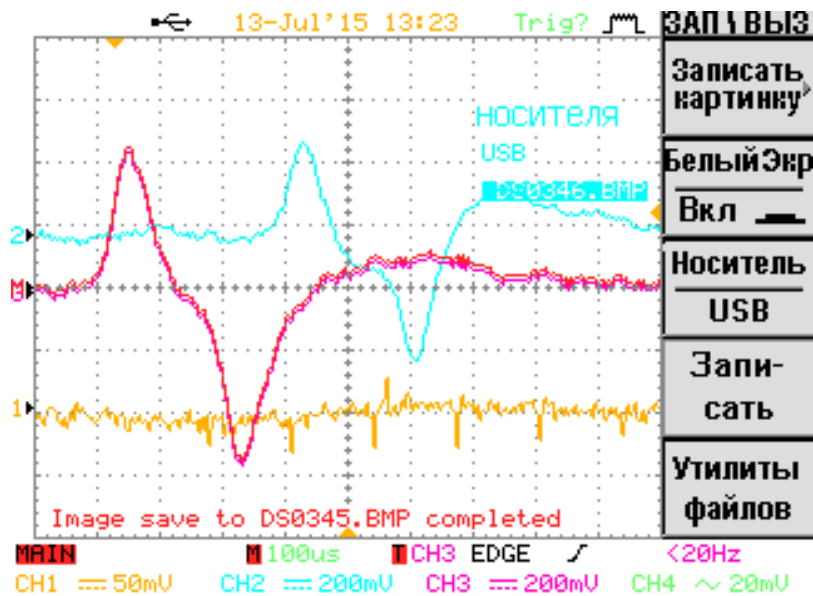
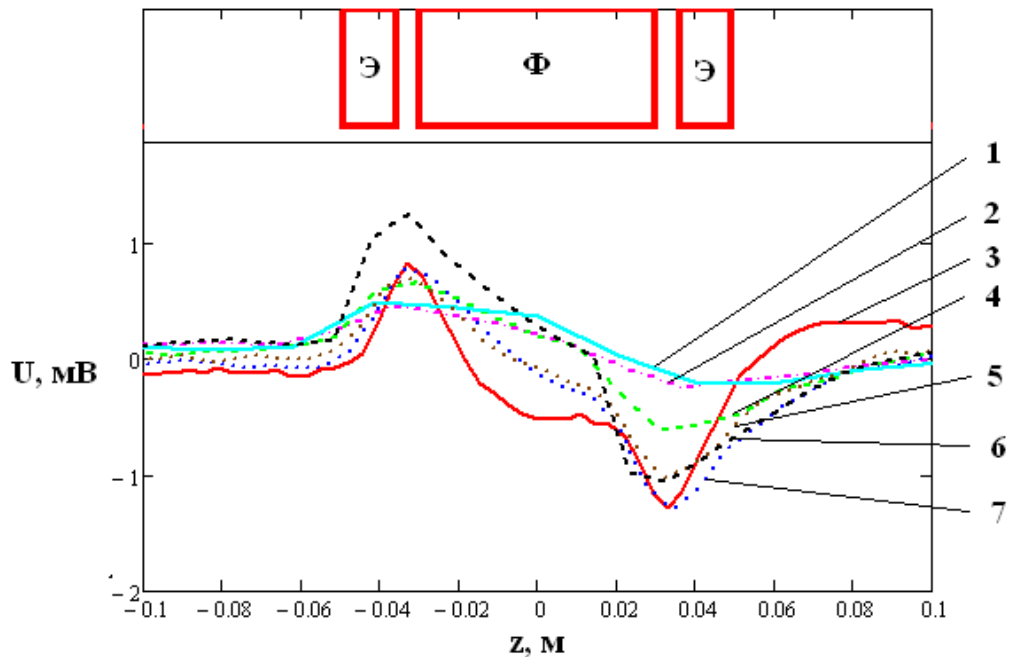


Рисунок 4.18– Осциллограмма сигнала с усилителей



Э- экран, Ф – цилиндр Фарадея; скорость микрочастицы: 1 – 2060 м/с; 2 – 1471 м/с; 3 – 368 м/с; 4 – 1030 м/с; 5 – 643 м/с; 6 – 936 м/с; 7 – 687 м/с

Рисунок 4.19 – Результаты экспериментов

В ходе проведения эксперимента было выявлено, что максимальное напряжение и минимальное напряжение на  $R_H$  разнесены на расстояние 66 мм, независимо от скорости частицы. Это подтверждается соотношениями (4.6, 4.7).

### **Краткие выводы**

Приведено теоретическое обоснование формы импульса с кольца Фарадея, которое было подтверждено экспериментальным исследованием на ускорителе частиц. Были обнаружены некоторые искажения в осциллограмме напряжения, что связано с внутренними шумами усилителями и помехами, возникающими в процессе функционирования ускорителя.

В большинстве случаев [316] индукционные датчики используются для регистрации скорости частицы, поэтому необходимо зарегистрировать сам момент пролета частицы цилиндра Фарадея. Частицы с малым зарядом наводят малый импульс тока, в связи с этим они могут быть пропущены на фоне шумов. Для устранения этого недостатка используется методы оптимального приема сигнала [374]. Можно также использовать модификацию входной цепи усилителя с целью изменения формы входной характеристики по методике, предложенной в работе [363]. Проработка этих направлений исследований может служить дальнейшим развитием данной темы.

Дальнейшим направлением исследований является анализ различных траекторий движения частиц в тракте ускорителя и накопление соответствующих статистических данных. Также предполагается произвести модификацию формы цилиндра Фарадея с целью измерения всех компонентов вектора скорости микрочастицы. Необходимо также произвести доработку теоретической модели с учетом конечного размера микрочастицы.

### **4.2.2 Моделирование наведённого заряда на измерительных электродах, используемых для регистрации параметров микрочастиц в тракте ускорителя**

Для контроля же параметров высокоскоростных микрочастиц в тракте ускорителя используют датчики пролетного типа, в основном, оптического и индукционного принципа действия [388]. В данной части диссертационной работе стоит задача моделирования конструкций измерительных индукционных электродов. Использование средств компьютерного моделирования для анализа конструкций измерительных электродов позволит оценить форму сигнала, а также существенно сэкономить средства и время на проведения выбора формы электрода для дальнейшего совершенствования системы регистрации ускорительного тракта.

Типовая форма сигнала, полученная экспериментально при пролете микрочастицей двух цилиндров Фарадея, показана на рисунке 4.20 [101\*].

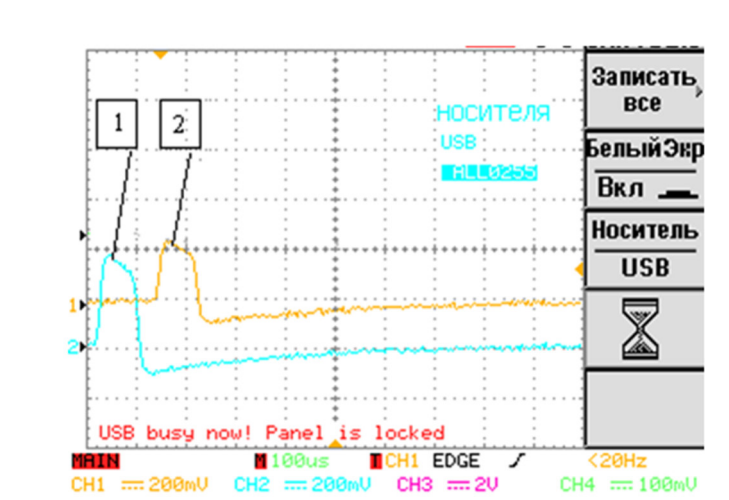


Рисунок 4.20 –Пример осциллограмм сигнала с двух цилиндров Фарадея (1 и 2), расположенных на одной измерительной оси

### Моделирование измерительных электродов

Для исследования измерительных электродов был использован программный продукт FEMM. При этом использовались библиотеки PYTHON – pyFEMM, которые позволили автоматизировать процесс моделирования [389\*]. Принцип работы программы следующий: FEMM рассчитывает численными методами электрическое поле, создаваемое микрочастицей вблизи измерительного электрода, далее заряд на поверхности измерительного электрода вычисляется путем вычисления интеграла, который возвращает общий поток вектора электрической индукции через заданную поверхность.

Результаты моделирования заряда на измерительных электрода для четырех вариантов выбранных конструкций (рисунки 4.21-4.24) при условии осевого движения заряженной микрочастицы диаметром 8 мм с зарядом 1 Кл показаны на рисунке 4.27. Анализ графиков на рисунке 4.25 показал, что максимальный наведенный заряд наблюдается для электродов цилиндрической и сферической форм, при этом на сферическом электроде амплитуда сигнала на 3% больше, чем на цилиндрическом. Также согласно полученным результатам моделирования цилиндрические электроды надо делать как можно длиннее для того, чтобы увеличить амплитуду наведенного заряда. Однако, конструктивно делать электроды слишком длинные нецелесообразно: так как это приведет к увеличению длины тракта ускорителя в целом, а также повышению собственной емкости электрода. Конусообразный и цилиндрический электроды с фланцем имеют практически одинаковую форму наведенного заряда, отличающуюся при этом от цилиндрического и

сферического электродов. Следует отметить, что с точки зрения изготовления измерительных электродов, легче всего изготавливать электроды цилиндрической формы без фланца и с фланцем.

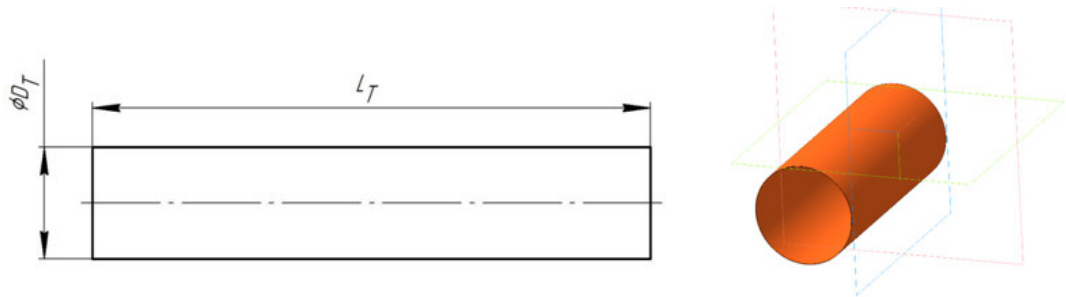


Рисунок 4.21 – Цилиндрический электрод

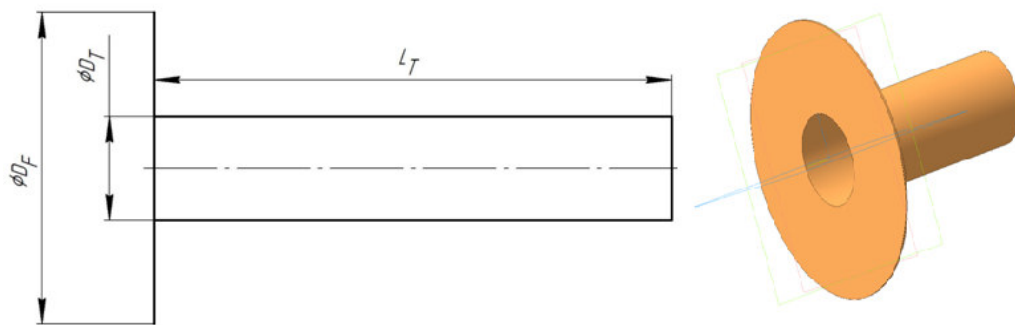


Рисунок 4.22 – Цилиндрический электрод с фланцем

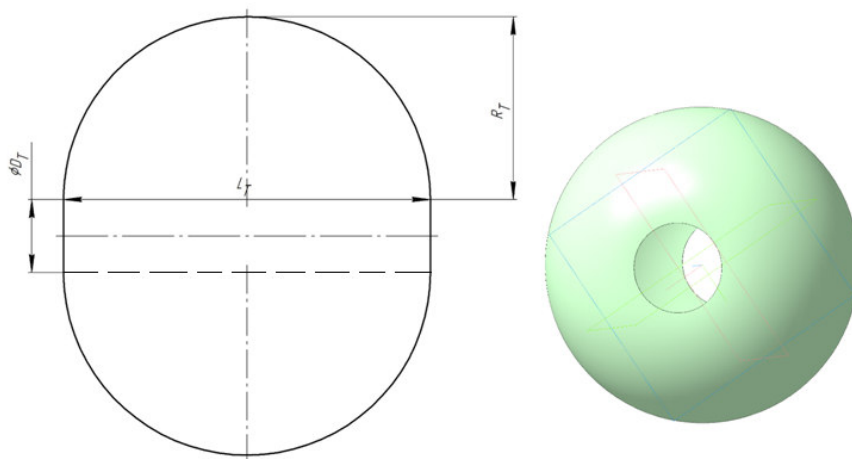
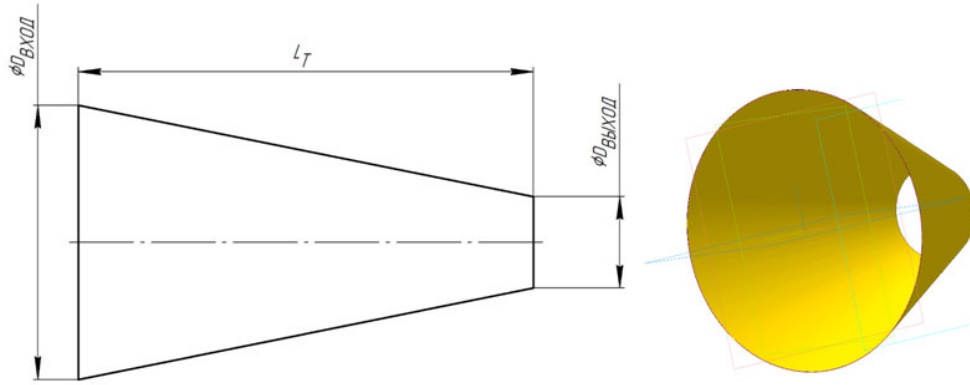
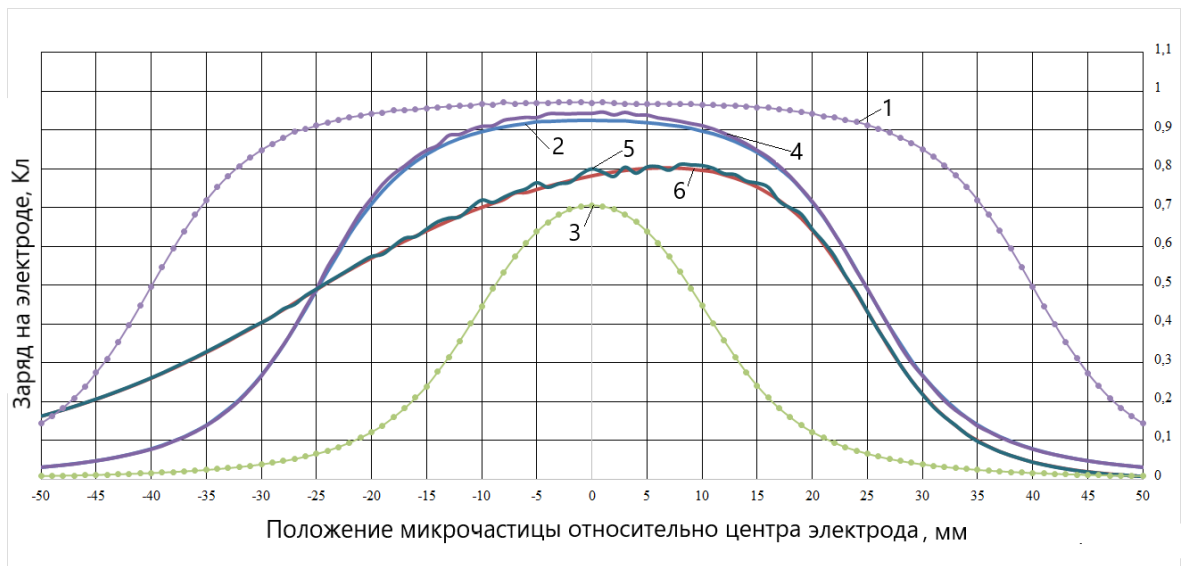


Рисунок 4.23 – Электрод сферического типа



Вариант 4.24 – Конусообразный электрод



- 1 – цилиндрический электрод ( $D_T = 20 \text{ мм}$ ,  $L_T = 80 \text{ мм}$ );  
 2– цилиндрический электрод ( $D_T = 20 \text{ мм}$ ,  $L_T = 50 \text{ мм}$ ); 3– цилиндрический электрод ( $D_T = 20 \text{ мм}$ ,  $L_T = 20 \text{ мм}$ ); 4- электрод сферического типа ( $D_T = 20 \text{ мм}$ ,  $L_T = 20 \text{ мм}$ ); 5- конусообразный электрод ( $D_T = 20 \text{ мм}$ ,  $L_T = 50 \text{ мм}$ ,  $R_T = 25 \text{ мм}$ ); 5- конусообразный электрод ( $D_{ВХОД} = 60 \text{ мм}$ ,  $L_T = 50 \text{ мм}$ ,  $D_{ВЫХОД} = 20 \text{ мм}$ ); 6- цилиндрический электрод с фланцем ( $D_F = 60 \text{ мм}$ ,  $L_T = 50 \text{ мм}$ ,  $D_T = 20 \text{ мм}$ )

Рисунок 4.25 – Изменение заряда на измерительных электродах при движении микрочастицы

Форма реального наведенного сигнала (рисунок 4.30) с измерительных электродов будет зависеть также от параметров измерительной цепи, подключенной к этим электродам, а точнее от соотношения между временем пролета микрочастицей и постоянной времени цепи [335].

Было проведено моделирование изменения заряда на измерительных электродах в зависимости от параллельного смещения траектории микрочастицы относительно оси

тракта ускорителя для двух вариантов конструкций электродов (рисунок 4.26). Анализ результатов моделирования (рисунки 4.27, 4.28) показал, что параллельное смещение траектории микрочастицы для цилиндрического электрода без фланца приводит к увеличению сигнала на краях цилиндра, а для цилиндрического электрода с фланцем к резкому отличию сигналов от базового для момента, когда частица уже вылетела из измерительного электрода.

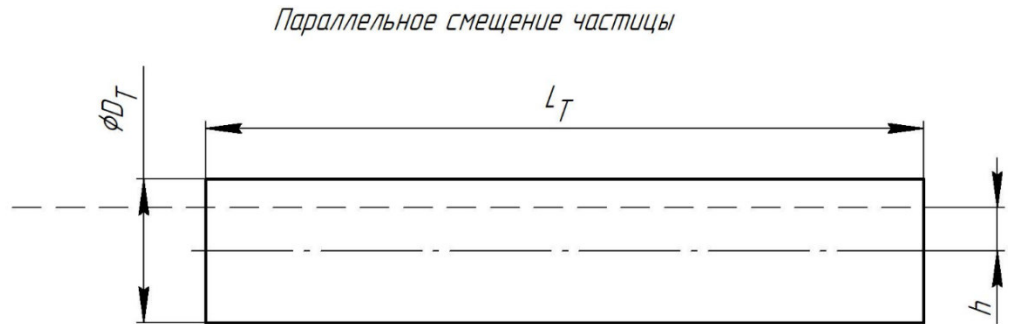


Рисунок 4.26 - Параллельное смещение – смещение траектории полёта частицы на расстояние  $h$  от оси тракта ускорителя

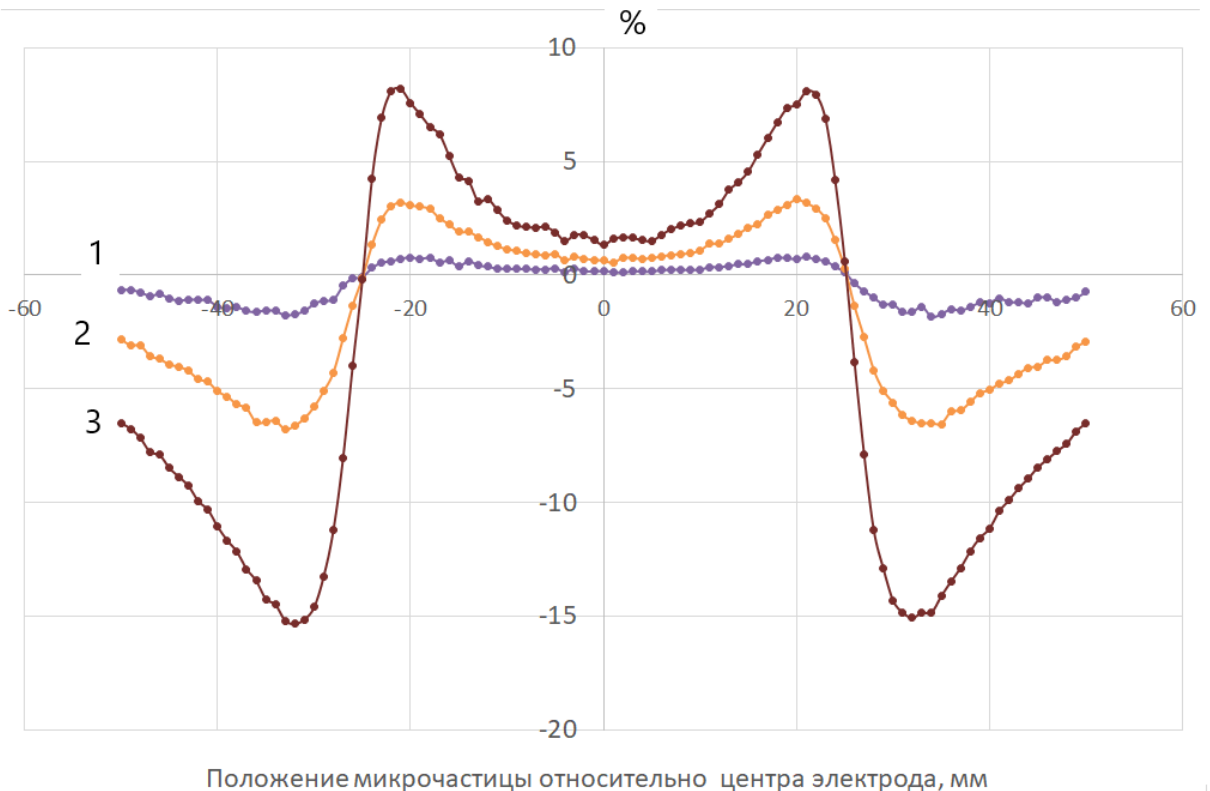


Рисунок 4.27 – Графики отличия значения заряда на цилиндрическом электроде ( $D_T = 20 \text{ мм}$ ,  $L_T = 80 \text{ мм}$ ) при отклонении от оси тракта ускорителя относительно наведённого заряда при осевом движении: 1-  $h=3 \text{ мм}$ ; 2 -  $h=5 \text{ мм}$ ; 3-  $h=7 \text{ мм}$

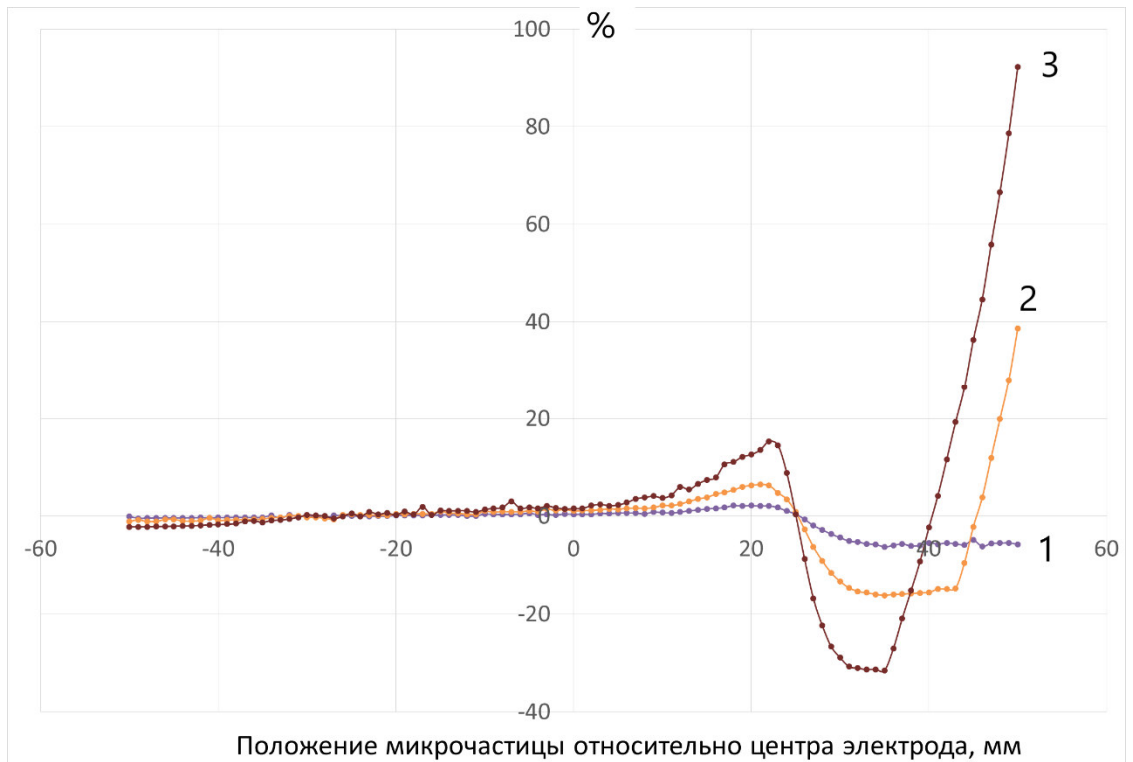


Рисунок 4.28 – Графики отклонения значения заряда на цилиндрическом электроде с фланцем ( $D_F = 60$  мм,  $L_T = 50$  мм,  $D_T = 20$  мм) при отклонении от оси тракта ускорителя относительно наведённого заряда при осевом движении микрочастицы: 1-  $h=3$  мм; 2 -  $h=5$  мм; 3-  $h=7$  мм

Также было проведено моделирование влияния на форму сигнала с измерительного электрода угла влета микрочастицы согласно схеме, показанной на рисунке 4.29. Результаты моделирования представлены на рисунках 4.30, 4.31.

*Угловое смещение частицы*

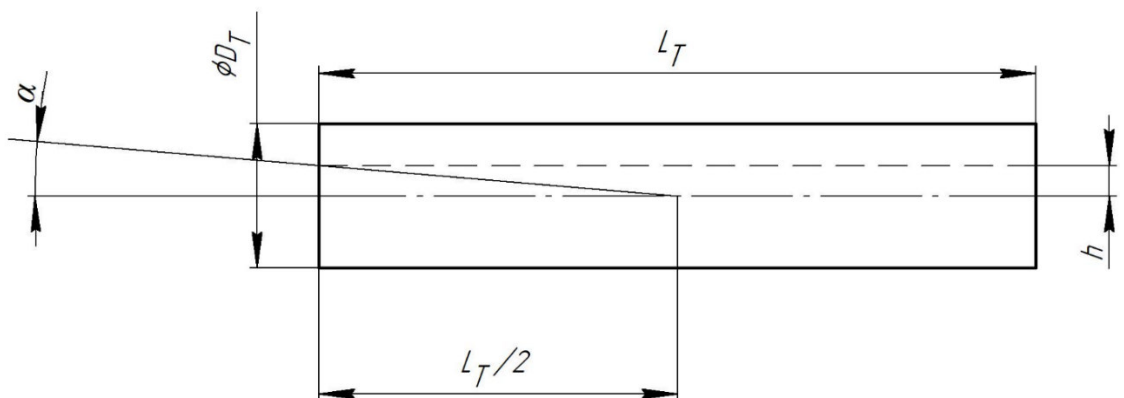


Рисунок 4.29 - Угловое смещение траектории полета микрочастицы

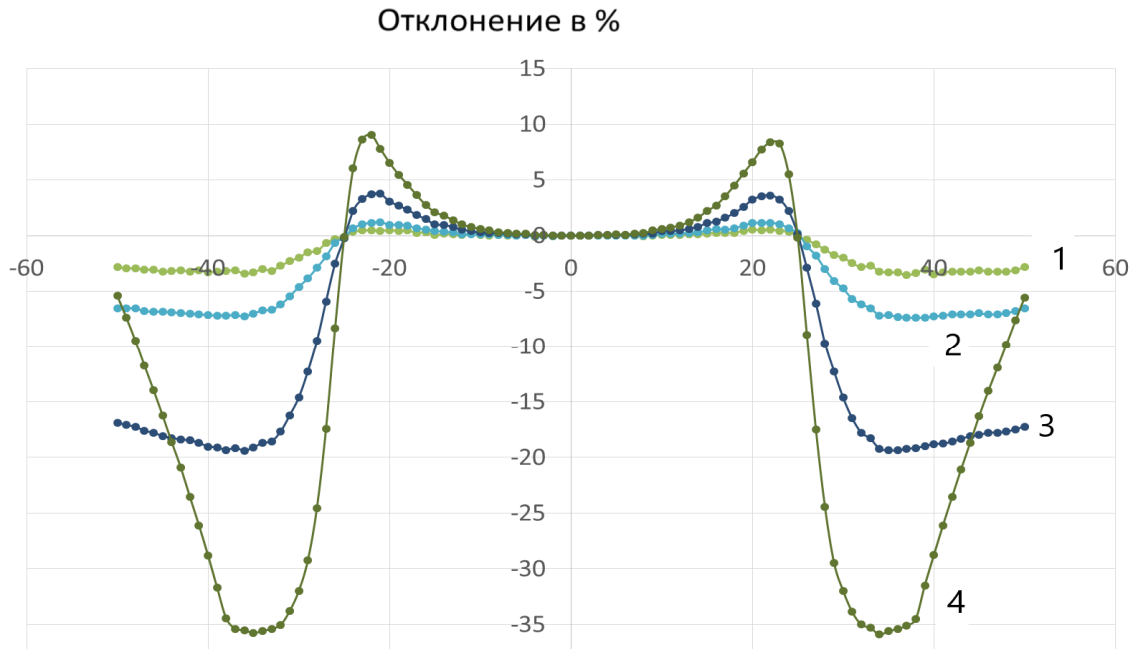


Рисунок 4.30 – Графики отклонения значения заряда на цилиндрическом электроде ( $L_T = 50 \text{ мм}$ ,  $D_T = 20 \text{ мм}$ ) в зависимости от угла влета относительно наведённого заряда при осевом движении микрочастицы

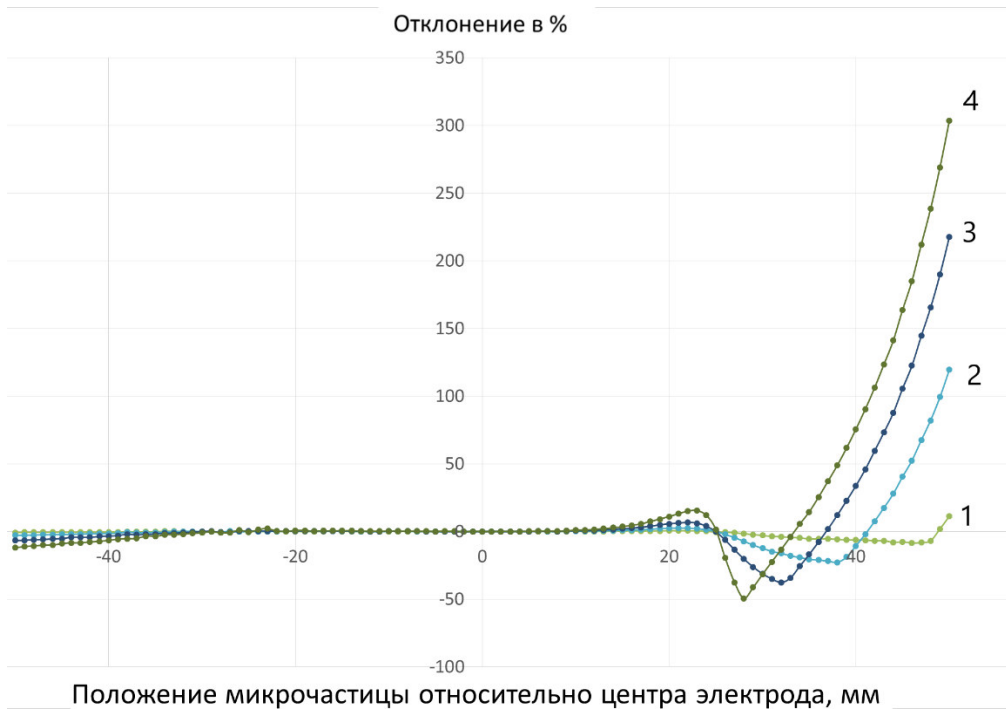


Рисунок 4.31 – Графики отклонения значения заряда на цилиндрическом электроде с фланцем ( $L_T = 50 \text{ мм}$ ,  $D_T = 20 \text{ мм}$ ) в зависимости от угла влета относительно наведённого заряда при осевом движении микрочастицы

### **Анализ полученных данных**

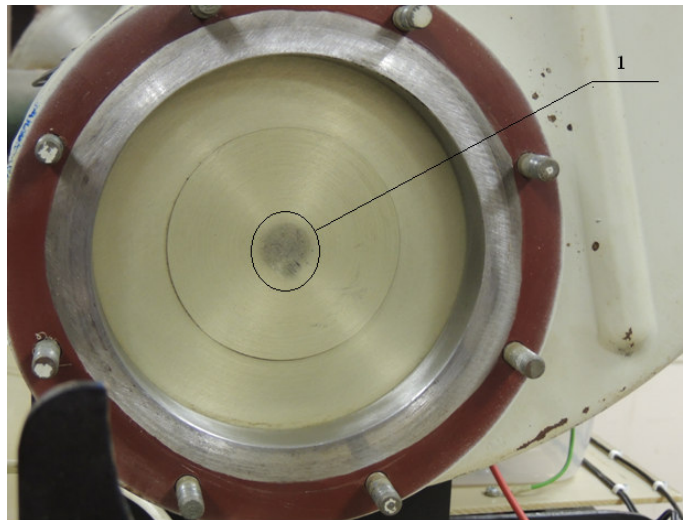
Проведенное исследование показало теоретическую возможность определения траектории микрочастицы путем анализа формы наведённого сигнала. При этом, конечно, существуют несколько проблем, связанных с обработкой и классификацией полученного сигнала: форма полезного сигнала искажается за счет влияния параметров измерительной цепи, а также внутренних и внешних помех. Одним из способов анализа сигналов является использование нейронных сетей для решения задачи классификации. Подобного типа задача, например, решалась для другой конструкции электрода в работе [103].

Модификация формы измерительных электродов позволяет расширить возможности измерения заряженных микрочастиц: увеличить чувствительность сигнала к изменению траектории движения микрочастиц, а использование электрода сферического типа позволяет повысить амплитудное значение наведенного сигнала при той же длине электрода, что и для электрода цилиндрического типа. Дальнейшем направлением исследования, с точки зрения авторов, является исследование совместного использования цилиндрического электрода, как опорного, и электрода с модифицированной конструкцией.

### **4.3 Методика обработки сигнала с индукционного датчика с модифицированной конструкцией электродов**

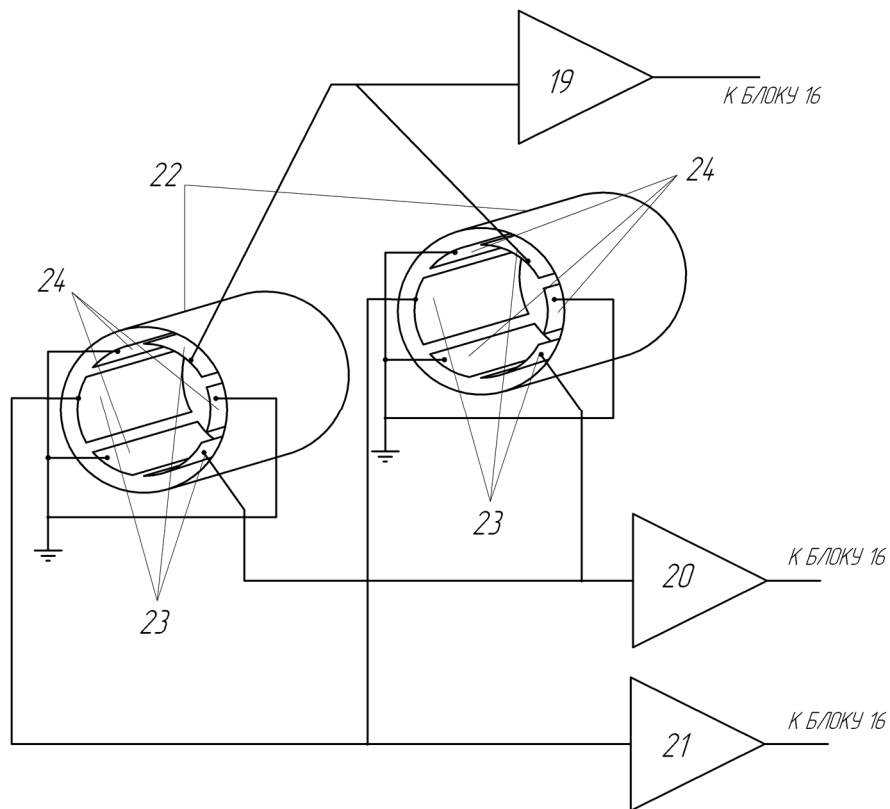
Для улучшения законов управления электродинамического ускорителя и повышение его КПД необходимо измерять координаты пролета микрочастицами сечения тракта ускорителя, а также контролировать вектор скорости микрочастицы [328, 390, 391\*, 392\*]. Рисунок 4.32 показывает, что микрочастицы летят в тракте ускорителя не строго по центру, а распределены по всему сечению.

Для измерения скорости высокоскоростных микрочастиц в тракте ускорителя была предложена конструкция на основе модифицированных измерительных электродов (рисунок 4.33) [391\*, 392\*].



1 – область распыления микрочастиц в тракте

Рисунок 4.32 - Разобранный тракт ускорителя (задвигка в вакуумной камере)



16 – усилитель пачки импульсов переменной длительности ускорителя микрочастиц, 19, 20, 21- измерительные усилители; 22 - земляной экран; 23 - измерительные электроды; 24 - земляные электроды

Рисунок 4.33 - Конструкция датчика измерителя вектора скорости (нумерация элементов устройства сохранена согласно патенту [391\*])

Принцип работы устройство следующий. Устройство по своей сути состоит из двух устройств для измерения координат пролета сечения тракта ускорителя микрочастиц. В ускорителе микрочастиц заряженные микрочастицы ускоряются под действием

электрического поля до скорости 10 км/с. При пролете заряженной микрочастицы через устройство, на измерительные электроды наводится потенциал, зависящий в соответствии с теоремой Рамо-Шокли [101\*] от заряда, скорости микрочастицы и расстояния от микрочастицы до измерительного электрода. Если траектория движения микрочастицы отклонена от оси симметрии датчика, то на каждый из измерительных электродов наводится разный электрический потенциал, зависящий от близости микрочастицы к конкретному измерительному электроду. Обработывая полученные данные можно судить об отклонении микрочастицы относительно оси ускорителя. А зная отклонения от оси ускорителя можно судить о векторе скорости, согласно следующим выражениям:

$$V_{\rho} = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\Delta t} ;$$

$$V_{\varphi} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\Delta t} ;$$

$$V_z = \frac{z_2 - z_1}{\Delta t} ,$$

где  $V_{\rho}$ ,  $V_{\varphi}$ ,  $V_z$  - проекция вектора скорости микрочастицы на координатные оси в цилиндрической системе координат (направление оси OZ совпадает с осью тракта ускорителя),  $\Delta t$  - время пролета между двумя устройствами для измерения координат пролета сечения тракта ускорителя, 1,2 –индексы соответствующие первому и второму устройствам для измерения координат пролета сечения тракта ускорителя.

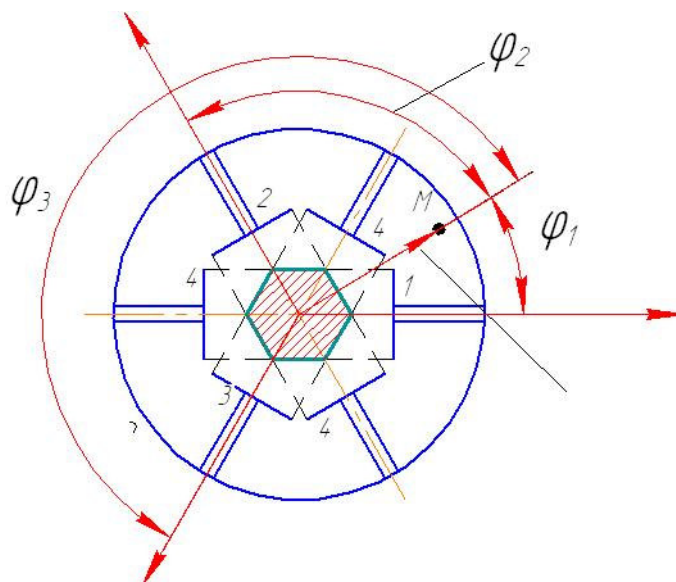
Рассмотри более подробно формулы, описывающий принцип измерения устройства для измерения координат пролета сечения тракта ускорителя.

$$\varphi_{ind}^*(t) = Q \cdot \varphi^*(t)$$

где  $\varphi_{ind}^*(t)$  - потенциал, наведенный на электродах при условии, что емкость  $C=1$ .

Скорость по оси OZ высокоскоростной микрочастицы можно оценить также по длительности наведенного импульса [101\*].

На рисунке 4.34 представлена конструкция устройства (вид с торца).



1,2,3 – измерительные электроды; 4 – земляные электроды;

М - некоторая точка внутри;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  - углы между радиусом вектором точки М и осями, перпендикулярно которым расположены измерительные электроды

Рисунок 4.34 – Конструкция устройства (вид с торца)

Микрочастица, подлетая к устройству, наводит электрический потенциал на три измерительных электрода, представляющих собой прямоугольные металлические пластины, нормали к которым расположены под углом 120 градусов друг к другу. Максимальное значение потенциала на измерительном электроде будет достигнуто, когда частица будет находиться в середине измерительного электрода относительно оси OZ. Введем допущения, что у нас имеются шесть конденсаторных датчиков, расположенных под углом 120 градусов друг относительно друга и они не оказывают влияния на процесс измерения друг друга. Это допустимо с погрешностями в пределах заштрихованной области (рисунок 4.34).

Тогда напряжение, которое измеряется с каждого измерительного электрода определяется с учетом теоремы Рамо-Шокли:

для 1 измерительного электрода

$$U_1 = (K_1/C_1) \cdot Q \cdot \left( \frac{d/2 + \rho \cdot \cos(\varphi_1)}{d} \right)$$

для 2 измерительного электрода

$$U_2 = (K_2/C_2) \cdot Q \cdot \left( \frac{d/2 + \rho \cdot \cos(\varphi_2)}{d} \right)$$

для 3 измерительного электрода

$$U_3 = (K_3/C_3) \cdot Q \cdot \left( \frac{d/2 + \rho \cdot \cos(\varphi_3)}{d} \right)$$

где  $Q$  - заряд микрочастицы,  $\rho$  - расстояние от центра устройства до точки М,  $d$  - расстояние между измерительным и земляным электродами, расположенными на одной оси;  $\varphi_2 + \varphi_1 = 120^\circ$ ;  $\varphi_3 + \varphi_1 = 240^\circ$ ,  $K_1, K_2, K_3$  - коэффициенты усиления усилителей, подключенных соответственно к 1,2,3 - измерительным электродам;  $C_1, C_2, C_3$  - соответственно емкости между 1,2,3 - измерительными электродами и земляными электродами.

Согласно рисунку 4.44 и выше рассмотренным выражениям получим:

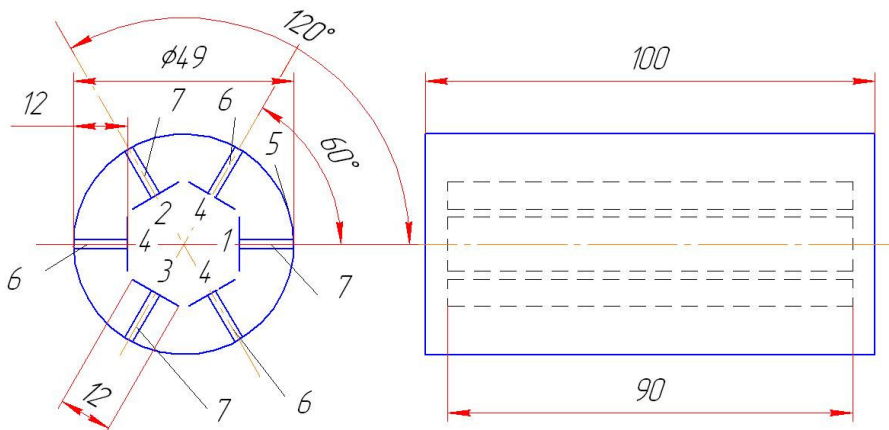
$$\varphi_1 = \arctg \left( \sqrt{3} \frac{U_3 \cdot (C_3/K_3)/(U_1 \cdot (C_1/K_1)) - U_2 \cdot (C_2/K_2)/(U_1 \cdot (C_1/K_1))}{U_3 \cdot (C_3/K_3)/(U_1 \cdot (C_1/K_1)) + U_2 \cdot (C_2/K_2)/(U_1 \cdot (C_1/K_1)) - 2} \right),$$

$$\rho = \frac{(U_2 \cdot (C_2/K_2)/(U_1 \cdot (C_1/K_1)) - 1) \cdot d}{2 \cdot (\cos(120^\circ - \varphi_1) - (U_2 \cdot (C_2/K_2)/(U_1 \cdot (C_1/K_1))) \cdot \cos(\varphi_1))}.$$

В случае использования симметричных каналов для каждого измерительного электрода упростим, получившиеся выражения:

$$\varphi_1 = \arctg \left( \sqrt{3} \frac{U_3/U_1 - U_2/U_1}{U_3/U_1 + U_2/U_1 - 2} \right), \quad \rho = \frac{(U_2/U_1 - 1) \cdot d}{2 \cdot (\cos(120^\circ - \varphi_1) - (U_2/U_1) \cdot \cos(\varphi_1))}.$$

Рассмотрим конструкцию устройства для измерения координат пролета сечения тракта ускорителя, которое входит как составная часть устройства для измерения скорости микрочастицы (рисунок 4.35).



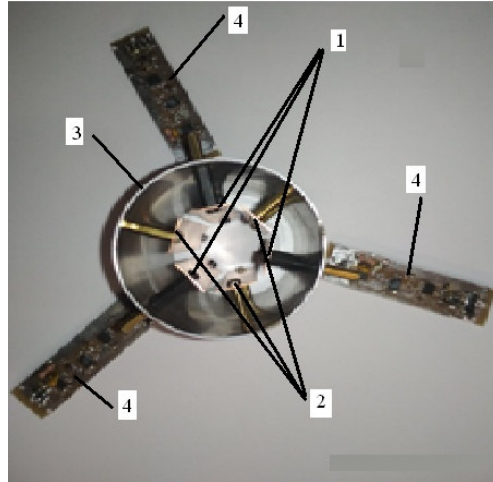
1, 2, 3 – измерительные электроды; 4 – земляные электроды; 5 –металлический экран; 6 – стойки из латуни; 7 стойки из полиэстера

Рисунок 4.35 - Конструкция устройства

Сигнал с измерительных электродов усиливается с помощью зарядочувствительных электродов, обладающих большим входным сопротивлением и оказывающих малое

влияние на процесс измерения сигнала. Заземленные электроды 2 (рисунок 4.45) введены для упрощения обработки сигналов с измерительных электродов.

Был изготовлен прототип устройства (рисунок 4.36) [271\*, 391\*-393\*]. Емкость измерительных электродов относительно земляного электрода составляет приблизительно 10 пФ.



1 – три измерительных электрода, 2 – три заземленных электрода,  
3 – экран, 4 – три зарядочувствительных усилителя, подключенных к  
измерительным электродам

Рисунок 4.36 – Фотография устройства для измерения координат пролета тракта ускорителя

Для регистрации сигнала с измерительного электрода был использован ЗЧУ, собранный согласно схеме электрической принципиальной, представленной на рисунке 4.37 [328].

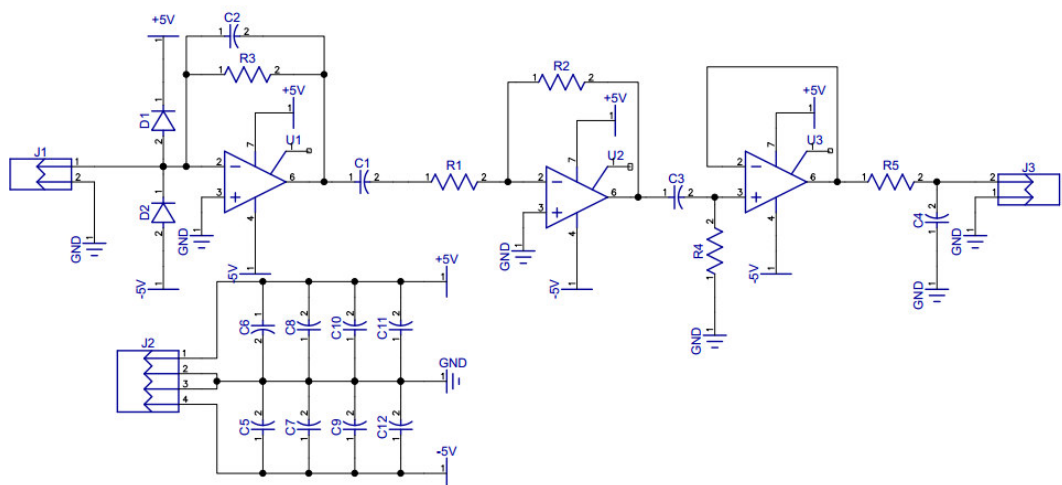


Рисунок 4.37 - Электрическая схема усилителя

Для регистрации момента пролета микрочастицей датчика предложена схема, представленная на рисунке 4.38 [271\*, 392\*].

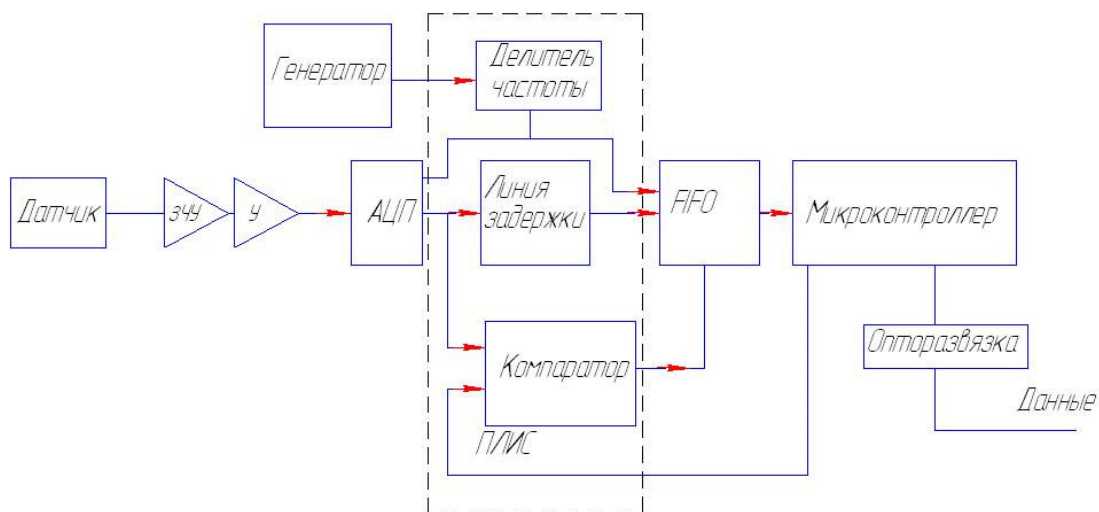


Рисунок 4.38 - Схема электрическая структурная модуля оцифровки данных с измерительного электрода (датчика) на ПЛИС

Сигнал с измерительных электродов (датчиков) усиливается с помощью ЗЧУ, далее сигнал оцифровывается с помощью АЦП и записываются в FIFO память, из которой информация считывается микроконтроллером. АЦП выбрано конвейерного типа и работает постоянно. Для определения момента удара микрочастицы в мишень используется цифровой компаратор, выполненной на ПЛИС. Порог срабатывания цифрового компаратора регулируется с использованием микроконтроллера. На ПЛИС также реализована задержка сигнала между АЦП и FIFO для того, чтобы цифровой компаратор успел сработать и зафиксировать предысторию сигнала перед его срабатыванием.

Так как предлагается использовать три электрода, тогда структурная схема (рисунок 4.48) была преобразована в схему, показанную на рисунке 4.39.

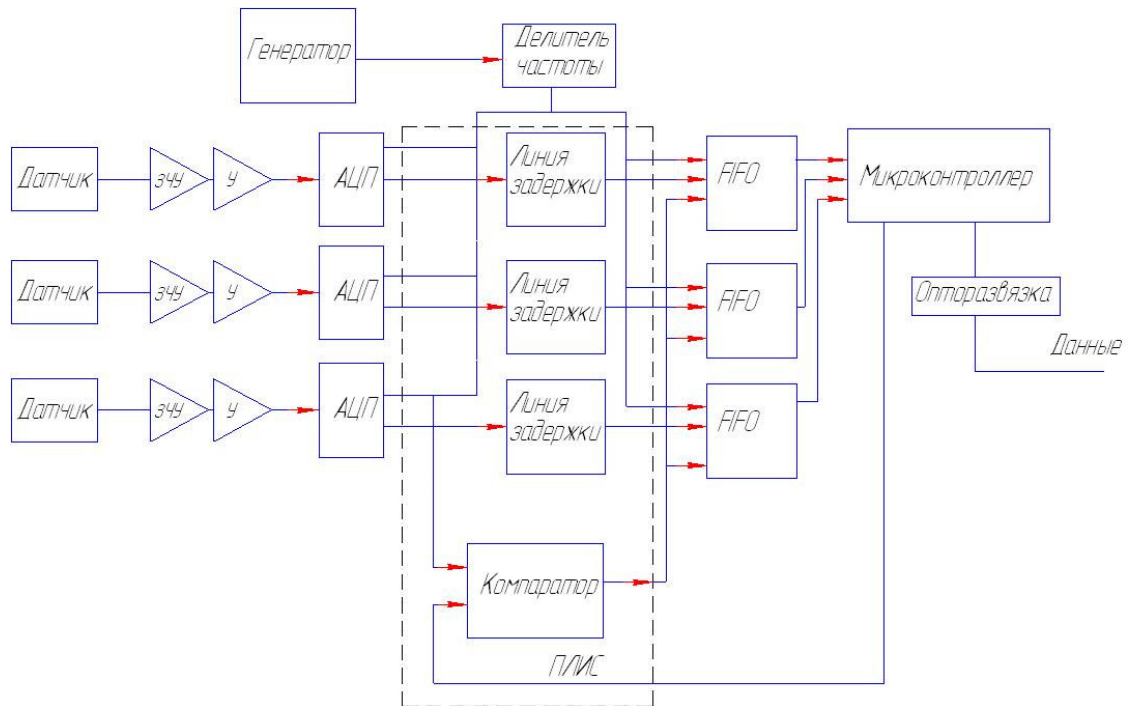


Рисунок 4.39 - Схема электрическая структурная для многоэлектродной системы измерения

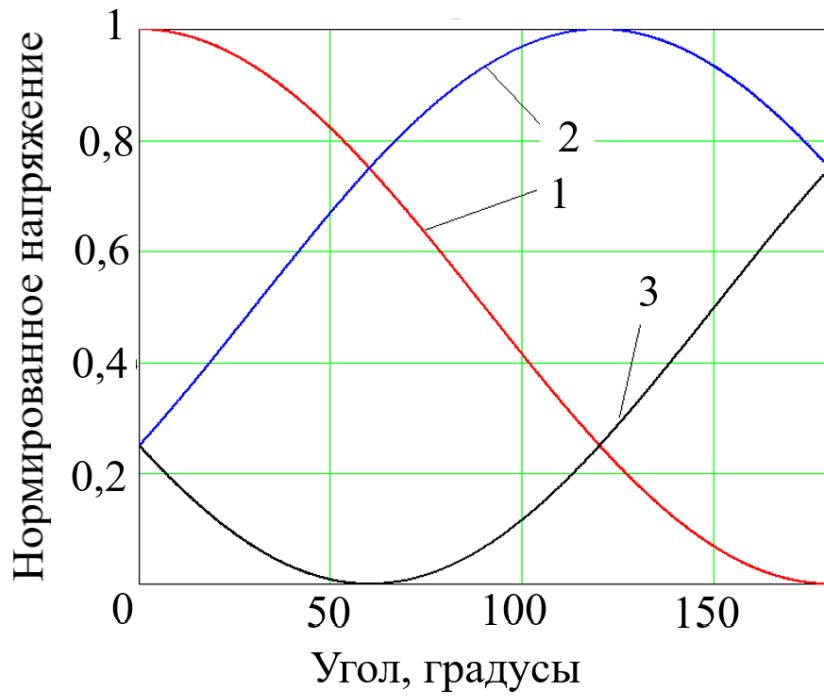
Для защиты устройства от внешних электромагнитных помех все устройство было помещено в защитный экран, а вывод сигналов осуществлен с использованием экранированных проводов (рисунок 4.40).



Рисунок 4.40 – Фотография устройства в защитном экране

### Моделирование работы устройства для измерения скорости высокоскоростных микрочастиц

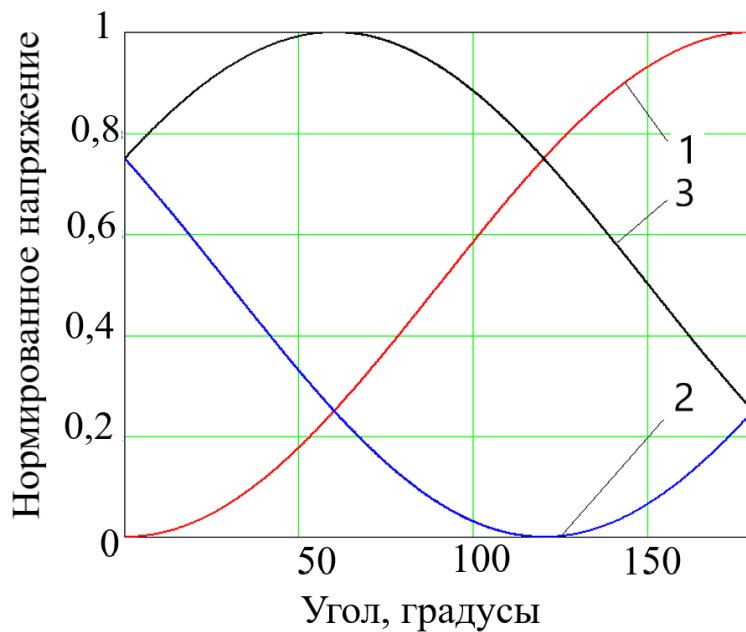
На рисунках 4.41 – 4.43 представлены результаты моделирования нормированного напряжения с измерительных электродов в зависимости от угла  $\varphi_1$ .



1 - сигнал с первого измерительного электрода; 2 - сигнал с второго измерительного электрода; 3 - сигнал с третьего измерительного электрода;

Рисунок 4.41 – Результаты моделирования напряжения для измерительных

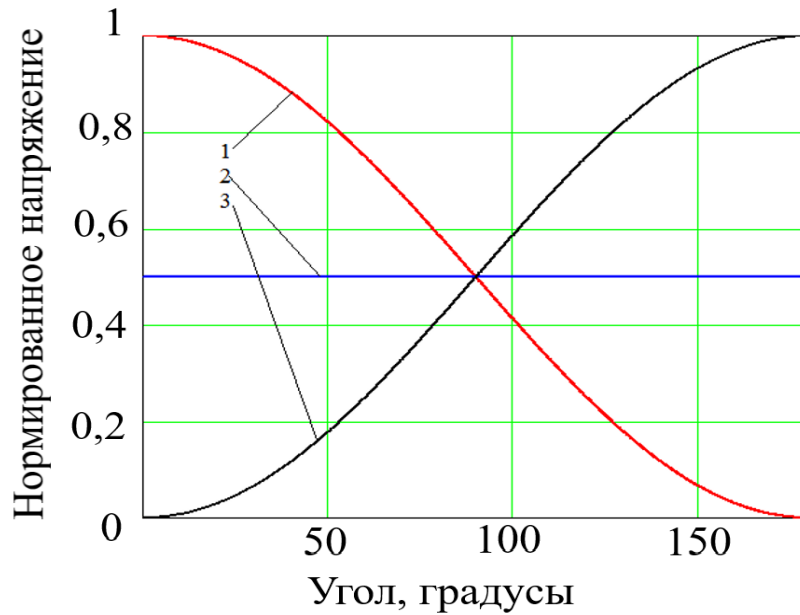
электродов в зависимости от угла  $\varphi_1$  при  $\frac{\rho}{d} = 0,5$



1 - сигнал с первого измерительного электрода; 2 - сигнал со второго измерительного электрода; 3 - сигнал с третьего измерительного электрода;

Рисунок 4.42 – Результаты моделирования напряжения для измерительных

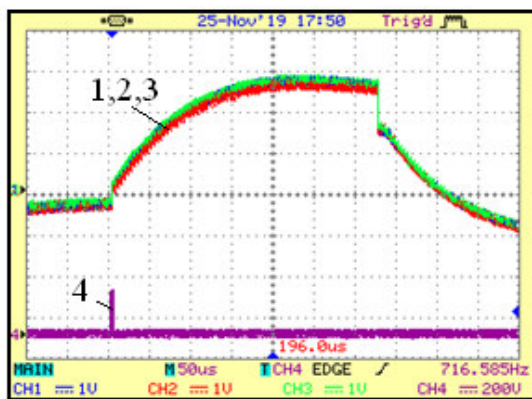
электродов в зависимости от угла  $\varphi_1$  при  $\frac{\rho}{d} = -0,5$



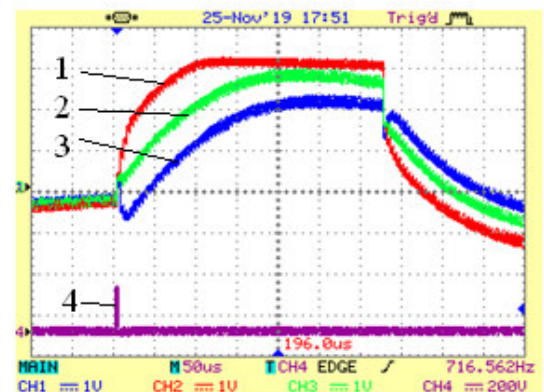
1 - сигнал при  $\frac{\rho}{d} = 0,5$ ; 2 - сигнал при  $\frac{\rho}{d} = 0$ ; 3 - сигнал при  $\frac{\rho}{d} = -0,5$ ;

Рисунок 4.43 – Результаты моделирования напряжения с первого измерительного электрода в зависимости от угла  $\varphi_1$

Для проверки симметричности конструкции устройства и равенства усиления зарядочувствительных усилителей по оси устройства был помещен провод, подключенный к генератору импульсов. Осциллограммы с усилителей измерительных электродов представлены на рисунке 4.44. Данные осциллограммы подтверждают работоспособность устройства тем, что амплитуда сигналов с измерительных электродов зависит от отклонения провода от оси устройства. На 4-ый канал (самый нижний график на рисунке 4.44) осциллографа выведен синхроимпульс генератора.



а)



б)

1, 2, 3 – каналы датчика; 4 – импульс с синхрогенератора

Рисунок 4.44 – Осциллограммы с зарядочувствительных усилителей при тарировке: а – провод расположен по оси датчика, б – провод смещен от оси датчика

Устройство было помещено в вакуумную камеру ускорителя микрочастиц (рисунок 4.45). Центровка оси устройства проводилась с помощью лазерного уровня. Эксперименты на ускорителе доказали работоспособность устройства.

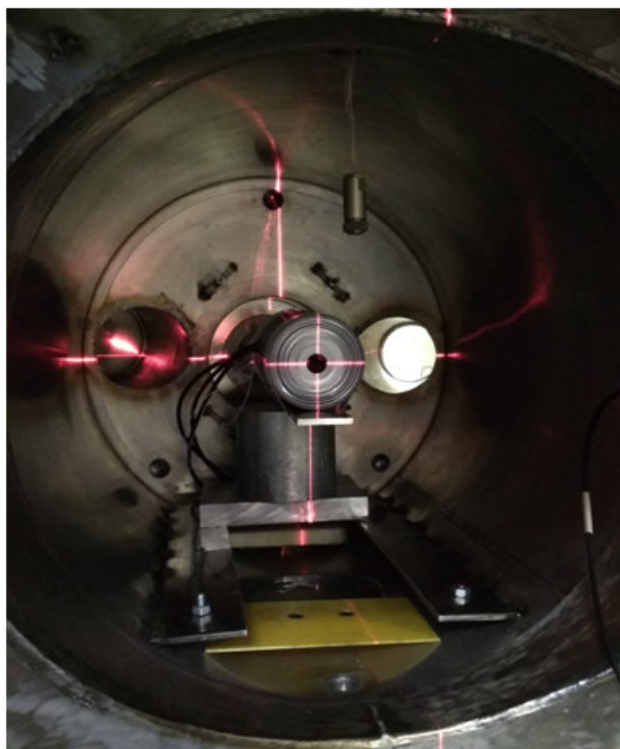


Рисунок 4.45– Фотография устройства в вакуумной камере

Была произведена оценка погрешностей измерения расстояния заряженной микрочастицы от оси данного устройства (рисунок 4.46). При этом надо отметить, погрешность измерения резко возрастает при приближении к центра симметрии датчика.

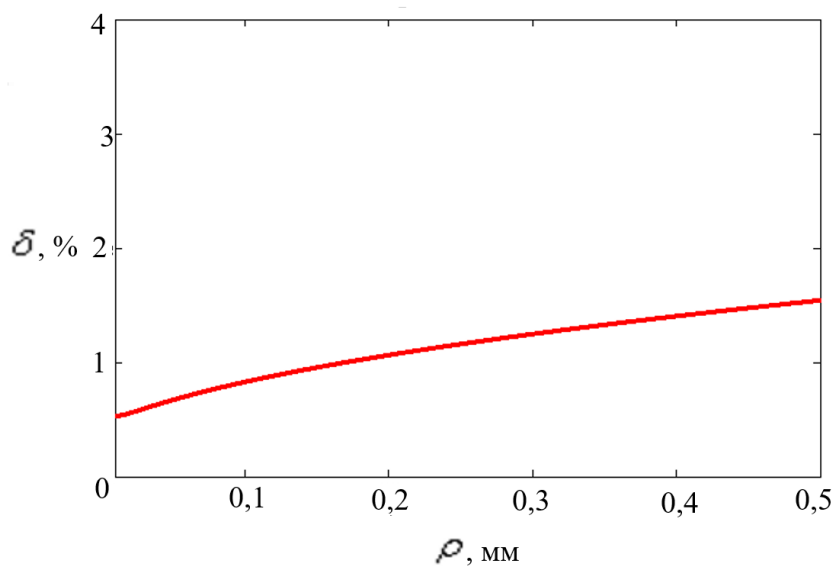


Рисунок 4.46 –Зависимость относительной погрешности измерения (в %) от расстояния до оси симметрии датчика

### **Краткие выводы**

Таким образом, было показано, что вектор скорости микрочастицы можно измерить с использованием устройства, состоящего из двух датчиков с модифицированными электродами для измерения координат пролета сечения тракта ускорителя микрочастиц.

Погрешность измерения координат микрочастицы резко возрастают при приближении к оси симметрии датчика, однако так как данный датчик предполагается использовать в системе управления ускорителя для уменьшения

Необходимо проведение дальнейших экспериментальных и теоретических исследований с точки зрения подбора оптимальной конструкции измерительных электродов для измерения вектора скорости микрочастицы в тракте ускорителя.

Полученные в ходе работы данные могут быть использованы для создания конструкции устройства для определения места пролета высокоскоростной микрочастицы через сечения тракта ускорителя микрочастиц, а также измерителя вектора скорости микрочастицы, что позволяет в дальнейшем улучшить фокусировку ускорителя заряженных микрочастиц и тем самым повысить КПД работы ускорителя. Результаты по исследованию устройства позволяют расширить функциональные возможности наземной аппаратуры для имитации факторов космического пространства в лабораторных условиях.

#### **4.4 Выводы к главе 4**

Анализ литературных источников и существующих конструкций датчиков для ускорителей микрочастиц показал, что оптические методы регистрации (лазерные барьеры, SCMOS-камеры) обладают помехозащищенностью, но не позволяют измерять заряд микрочастиц и имеют ограничения по быстродействию и области регистрации. Индукционные датчики (цилиндры Фарадея) наиболее распространены, однако в известных моделях не учитывается влияние неравномерности электрического поля на точность определения времени пролета и не оценивается возможность определения поперечных координат частицы по форме наведенного сигнала. Существующие конструкции не позволяют в полной мере измерять все три компоненты вектора скорости микрочастицы в тракте ускорителя.

Использование теоремы Рамо-Шокли и численного моделирования в среде FEMM позволило создать модели для четырех типов измерительных электродов (цилиндрических, сферических, конических и с фланцем), обеспечивающие расчет наведенного заряда с погрешностью не более 3%. Моделирование показало, что сферические электроды обеспечивают на 3% большую амплитуду сигнала по сравнению с цилиндрическими, а анализ формы сигнала позволяет определять отклонение траектории частицы от оси

ускорителя (параллельное смещение до 7 мм и угловое до  $5^\circ$ ), что создает основу для измерения всех компонент вектора скорости.

Приведено теоретическое обоснование формы импульса с кольца Фарадея, которое было подтверждено экспериментальным исследованием на ускорителе частиц. Были обнаружены некоторые искажения в осциллограмме напряжения, что связано с внутренними шумами усилителями и помехами, возникающими в процессе функционирования ускорителя.

Для оценки отклонения положения микрочастицы от заданной траектории в электромагнитном ускорителе разработан метод математической обработки данных, поступающих от прибора с модифицированной системой регистрации в виде трех электродов, расположенных на окружности, сосной оси ускорителя микрочастиц. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили работоспособность разработанного метода для измерения координат микрочастицы относительно оси ускорителя микрочастиц, при этом погрешность измерения резко возрастает при приближении к оси симметрии датчика, но не превышает 2%. Экспериментальное исследование показало, что распределение микрочастиц по оси тракта ускорителя подчиняется нормальному закону распределения, что согласуется с исследованиями проведенными с помощью пленочного резистивного датчика.

## **Глава 5. Приборы для регистрации удара высокоскоростных микрочастиц, использующие элементы конструкций космических аппаратов**

Контроль микрометеороидов и частиц космического мусора с помощью приборов, описанных в предыдущих главах, как правило, осуществляется в ограниченной области пространства, что обусловлено аппаратными возможностями регистрирующей техники. Вместе с тем нередко возникает необходимость мониторинга значительных по площади частей поверхностей космического аппарата [24, 172\*, 353\*, 394]. За последние два десятилетия было спроектировано множество различных методов, с помощью которых можно фиксировать не только место столкновения оболочки аппарата с частицами, но и его характеристики - степень повреждений, размер отверстия и т.д.

В работе [394] выделяют следующие методы контроля поверхности КА:

- 1) Диагностика по электромагнитному излучению;
- 2) Акустическая диагностика;
- 3) Контроль деградации поверхности;
- 4) Использование роботов;
- 5) Визуализация поверхности КА;
- 6) Термография.

В данный список можно добавить метод с использованием регистрации ионной эмиссии, образовавшейся при высокоскоростном ударе микрочастицы с поверхностью космического аппарата.

При выборе метода регистрации необходимо выбрать физический эффект, который будет использоваться для регистрации высокоскоростного взаимодействия микрометеороидов и частиц космического мусора с поверхностью космического аппарата [24, 201\*].

Как видно из таблицы 5.1 [24], основная часть энергии при столкновении частиц с поверхностью КА уходит на выброс осколков и взаимный нагрев сталкивающихся тел, причем в большей степени происходит именно нагрев корпуса КА. Также немалая часть энергии уходит на дробление, и лишь малая часть энергии удара тратится на ионизацию и световую вспышку. Все это позволяет сделать вывод о том, что наиболее информативным является детектирование по изменению температуры и по ударным волнам, возникающим в результате удара. Регистрация столкновений по процессам ионизации и световой вспышке также возможна, однако, на неё тратится гораздо меньше энергии высокоскоростных микрочастиц, что, в свою очередь, вызывает потребность в высокочувствительном оборудовании для обнаружения данных событий. Поэтому представляется целесообразным рассмотреть данные методы регистрации в зависимости от

физической природы процессов лежащих в их основе, что определит границы их применения.

Таблица 5.1 – Относительные затраты энергии на различные процессы

Процесс	$\varepsilon/\varepsilon_{кин}, \%$
Нагрев, включая плавление и испарение:	
Частицы	5-10
Мишени	20-25
Дробление	10-25
Выброс осколков	40-50
Ударная вспышка	<1
Световая вспышка	<1

### Использование ионной эмиссии

В работах [201\*, 220\*, 395] предлагается для контроля поверхности космического аппарата использовать вторично электронный умножитель (ВЭУ), который располагается на некотором расстоянии над поверхностью КА, при этом с помощью ВЭУ фиксируется факт ионообразования, вызванного высокоскоростным соударением тел (рисунки 5.1) [201\*, 220\*].

Во время высокоскоростного столкновения (порядка нескольких км/с) часть материала микрочастицы и поверхности КА испаряется и ионизируется. Практически мгновенно после удара на его месте создается плазменное облако, которое распространяется в окружающий вакуум [129].

Разлет плазмы будет иметь сложный характер и наиболее подробно рассмотрен в работах [125\*, 129, 133, 396, 397]. Образовавшееся плазменное облако состоит из ионизированного газа микрочастицы и материала оболочки КА, а также электронов, при этом происходят процессы рекомбинации ионов. Протекание процессов при этом происходит во внешнем электрическом поле. С увеличением скорости микрочастиц, на которой происходит столкновение, увеличивается число выходящих ионов. В [133] авторы провели исследование о влиянии ряда параметров (например, исходного заряда микрочастиц, угла падения) на распределения массы и скорости частиц космической пыли, обнаруженных в типичных датчиках 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. На рисунке 5.1 показана схема, объясняющая образование ионов, и способ их регистрации. Когда космическая частица 4 ударяется о корпус космического аппарата 1, возникают ионы 5, которые притягиваются к

ионному приёмнику 2, которые относительно корпуса космического аппарата 1 имеет разность потенциалов. При таком построении преобразователя возникает зависимость параметров ионного импульса от параметров частицы. Для увеличения сбора ионов, перед приёмником установлена электростатическая линза 3 [395\*].

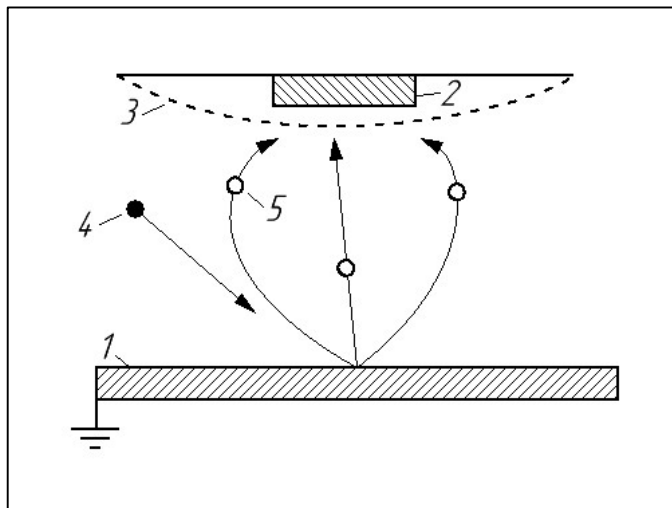


Рисунок 5.1 – Структурная схема, поясняющая движение ионов, образовавшихся при высокоскоростном ударе

Опыт работы соискателя с ионизационными датчиками высокоскоростных микрочастиц показывает, что параметры информационного сигнала зависят от конструктивной реализации прибора. Для регистрирующей аппаратуры желательно выбирать частоты дискретизации порядка 20-100 МГц.

### **Диагностика по электромагнитному излучению**

Методы диагностики поверхности по индуцированному электромагнитному излучению условно разделяются на две группы: определение столкновения при помощи световой вспышки (фотоэмиссии) и при помощи микроволнового излучения, возникающего при ударе.

Под световой вспышкой понимается тормозное излучение горячей плазмы высокого давления, из которой в первоначальный момент времени состоит плазмод, образовавшейся при высокоскоростном соударении. Данный свет может быть зафиксирован при помощи небольшого телескопического датчика-фотометра с диаметром зеркала порядка 0,2 м и чувствительным фотоэлектронным умножителем (ФЭУ), а также с помощью чувствительных ПЗС-матриц [139\*, 398-402]. При этом длительность сигнала находится в диапазоне 0,5-2 мс [73\*].

В работах [400\*, 401, 402] предлагается использовать несколько фотоэлектронный умножитель (ФЭУ) для обнаружения места соударения высокоскоростной микрочастицы с поверхностью космического аппарата.

Помимо оптического диапазона, при данном взаимодействии фиксируется также микроволновое излучение в гигагерцовом диапазоне, генерируемое плазмой. Физический механизм этого явления, предположительно, связан с разделением зарядов в плазменном облаке, выбрасываемом с места удара. Ввиду значительной разницы в массах, электроны покидают область взаимодействия с гораздо большей скоростью, чем ионы, что и создает условия для генерации импульса. Регистрируемая задержка сигнала составляет несколько микросекунд после момента соударения. Так, например, в работе [403] изучалось влияние материала, с которым произошло столкновение, на микроволновую эмиссию. При столкновении микрочастиц с алюминиевой пластиной сигнал наблюдался спустя 4 и 22 микросекунды после столкновения. Данное излучение может использоваться для наблюдения за высокоскоростными столкновениями при помощи антенны и радиочастотных воспринимающих катушек [163, 404]. Однако стоит отметить, что при данных измерениях важную роль играет диаграмма направленности антенны. Если столкновение произошло за пределами диаграммы направленности принимающей антенны, то событие не будет зарегистрировано. Следовательно, при проектировании подобной системы данный фактор также следует учитывать. Например на рисунке 4 приведены антенны в виде несимметричных вибраторов, а в работе [398] использовались печатные антенны.

На рисунке 5.2 представлены несколько антенн, по сигналам с которых можно судить о месте удара высокоскоростных микрочастиц [404]. Подробно излучение плазмы рассмотрены в работах [129, 398, 405].

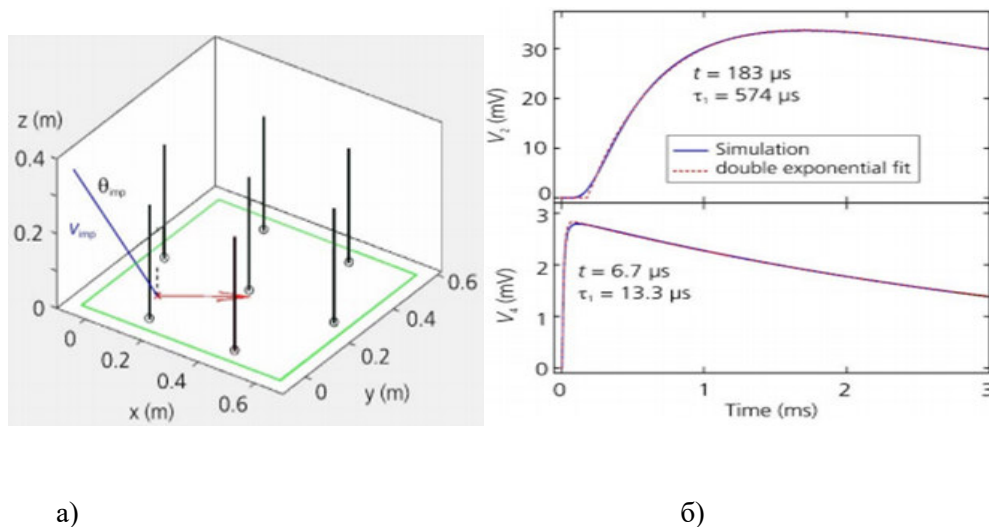


Рисунок 5.2 - Серия антенн и сигнал с антенн: а) серия антенн; б) сигнал с антенн [404]

В работе [150] отмечено, что в процессе разлета плазмы ее плотность изменяется согласно выражению:

$$n_e(t) = \frac{n_e(0)}{(1 + c_s \cdot t / r_0)^3},$$

где  $c_s = \sqrt{\frac{\gamma \cdot k \cdot T_e}{m_i}}$  - изотермическая скорость звука,  $\gamma$  - удельная теплоемкость,  $k$  - постоянная Больцмана,  $r_0$  - начальный радиус плазмы, который в первом приближении можно принять равным радиусу кратера, образовавшегося при соударении микрочастицы с поверхностью КА.

Тогда полная излучаемая мощность находится по известной формуле Лармора [150]:

$$P = \frac{\omega_{p,0}^4 \left( \frac{\mathcal{G}_{th,e}}{\omega_{p,0}} \right)^2 e^2 N \cdot \sin^2 \left( \omega_{p,0} \frac{r_0}{c_s} [1 + c_s \cdot t / r_0]^{-0,5} \right)}{6\pi \cdot e_0 \cdot c^3 \cdot (1 + c_s \cdot t / r_0)^{9/2}},$$

где плазменная частота  $\omega_{p,0}^2 = \frac{n_e(0) \cdot e^2}{m_e \cdot \varepsilon_0}$ ,  $\mathcal{G}_{th,e} = \dot{\xi}(0)$ ,  $\xi = r(t) - c_s \cdot t$ ,  $N$  - число электронов, участвующих в движении плазмы.

### Акустическая диагностика

Одним из методов определения местоположения места удара микрометеорита с поверхностью КА является метод фиксации распространения акустических волн в твердом теле, распространяющихся вдоль поверхности обшивки корпуса от места попадания частицы. Поскольку скорость поперечных и продольных акустических волн в твердом теле напрямую зависит от механических свойств используемого материала корпуса КА через модули упругости и сдвига, а также коэффициент Пуассона, то детектирование по данному методу позволяет не только зафиксировать сам удар, но и охарактеризовать его, дать оценку конкретному столкновению [15, 406]. При этом надо учитывать, что поверхность космического аппарата анизотропная и скорость распространения колебаний меняется в зависимости от направления.

Для регистрации таких акустических сигналов можно воспользоваться пьезодатчиками, оптоволоконными датчиками, акселерометрами. Вкратце остановимся на технических характеристиках данных устройств и особенностях их использования.

Пьезодатчики—это датчики, преобразующие механическую деформацию в электрический сигнал на основе явления пьезоэффекта [252, 197\*, 198\*]. При их механическом сжатии или растяжении, на соответствующих выводах будет накапливаться некоторый заряд  $Q$ . Количество заряда, сообщенное ёмкости  $C$  (которая имеется в датчике), будет пропорционально изменению напряжения [407\*]:

$$Q = CU.$$

К примеру, при сжатии датчика, будет формироваться положительное напряжение, а при растяжении - напряжение отрицательной полярности. Для снятия данных с пьезодатчиков применяется зарядочувствительный предусилитель, который согласовывает комплексный импеданс датчика с последующими каскадами обработки сигнала [407\*]. Пьезоэлектрические датчики и усиленные с них сигналы показаны на рисунке 5.3 [407\*].

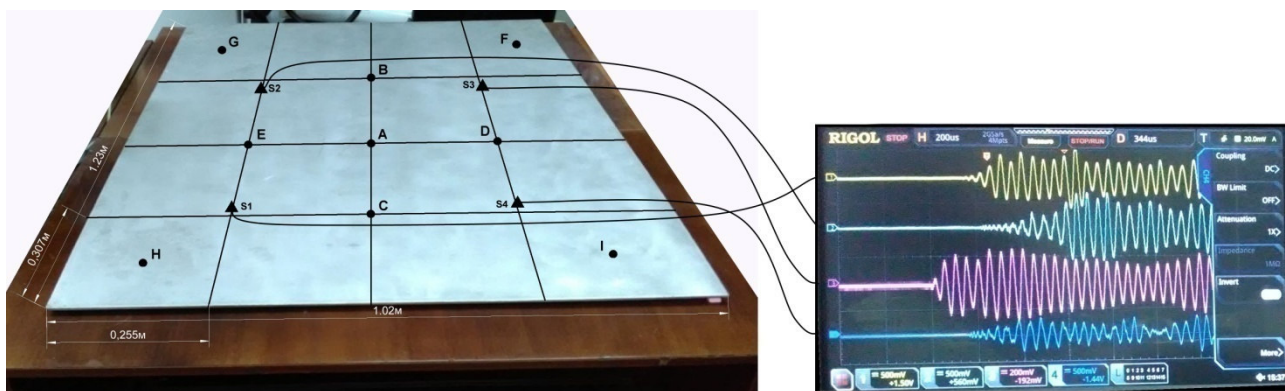


Рисунок 5.3 – Пластина с пьезоэлектрическими датчиками и их осциллограммами (200мкс/дел по горизонтальной развёртке) [407\*]

Пьезоэлектрические датчики имеют малые массогабаритные характеристики и экономические затраты. Однако они имеют погрешность измерения сигналов, ввиду различных наводящихся электромагнитных полей внутри и снаружи космического аппарата. Также на погрешность ещё влияют и методы регистрации удара. Одним из лучшим методом, с нашей точки зрения, является корреляционный способ обнаружения сигнала [407\*]. Он выигрывает по погрешности относительно порогового обнаружения сигнала.

Применяются различные методики определения места удара: с использованием восьми [409], шести [410], четырёх [411], трёх [412] и одного датчика [413]. В первых трёх случаях расчёт производится по гиперболическим кривым, которые представляют собой путь, проделанный механической волной за интервал времени запаздывания сигнала  $\Delta t$ . В методах с использованием одного пьезодатчика, применяется многолучевая модель распространения механических волн, статистический метод предсказания места удара, и

применение нейронных сетей (свёрточной архитектуры или архитектуры автокодировщика).

В работе [423] описывается исследование, использующее глубокое обучение нейронной сети для определения зоны источника акустико-эмиссионных волн. Рассматривались всего две архитектуры нейронной сети: сложенные автоэнкодеры и свёрточные сети. Входными данными служили выборки модулей Вейвлет коэффициентов, а выходными данными – номера зон, в которых произошло силовое воздействие.

Для фиксирования момента механического удара возможно применение акселерометров. Работающие по данному методу датчики делятся по измерению возмущений в «ближней», «средней» и «дальней» зонах. Уровни ускорений варьируются от  $0,001 \text{ м/с}^2$  до  $2 \times 10^6 \text{ м/с}^2$ , частоты от нулевых до 200-250 кГц, в зависимости от принципа работы датчика и конкретной структуры [394].

**Оптоволоконные датчики** могут быть разбиты на две категории: резонаторные и на основе решеток Брэгга (ВБР). Резонаторные датчики выполняются на основе интерферометрических резонаторов в волокне. Однако, несмотря на возможность применения данных датчиков в высокотемпературной среде с большим количеством электромагнитных помех, данный тип датчиков нельзя мультиплексировать на одном волокне, а потому их применение ограничено для задач, где требуется множество датчиков.

Датчики же на основе решеток Брэгга, в свою очередь, легко мультиплексируются на одном волокне. Делается это при помощи встраивания множества решеток, работающих на разных длинах волн [414\*, 415\*]. При деформации оптоволоконна, расстояние между решётками Брэгга изменяется, вследствие чего возникает изменение длины волны  $\lambda_b$ . При растяжении оптоволоконна длина волны увеличивается, а при сжатии - уменьшается. Фиксируя частоту колебаний отражённого участка спектра, можно получить качественное преобразование вибрация - свет - электрический сигнал.

Датчики на основе решеток Брэгга имеют достаточно быстрый отклик, а потому подходят для непрерывной и автономной работы. С помощью этих датчиков можно провести осмотр структуры в реальном времени, в процессе её эксплуатации. Также система детектирования на основе ВБР обладает неравномерной чувствительностью в зависимости от направления распространения волны. Продольная чувствительность решетки выше, чем поперечная, и, следовательно, при возникновении удара в направлении, перпендикулярно датчику, чувствительность будет меньше. Данную особенность следует учитывать при проектировании систем контроля поверхности КА на основе ВБР (рисунок 5.4) [416].

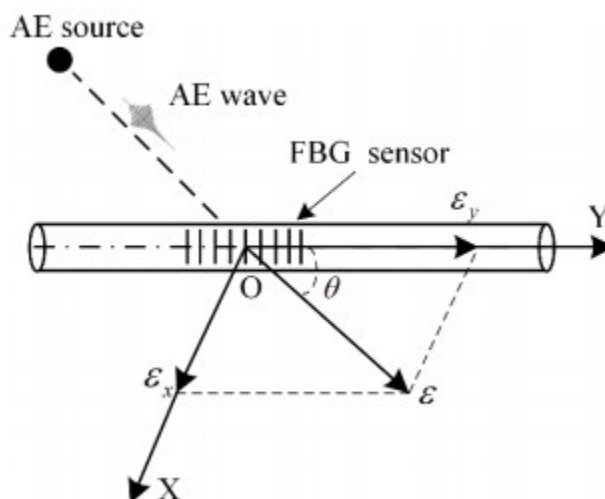


Рисунок 5.4 – Координатная система датчика на основе ВБР [416]

Центральная длина волны ВБР определяется как

$$\lambda_B = 2n\Lambda,$$

где  $n$  – эффективный показатель преломления,  $\Lambda$  – период решетки.

При достижении акустической волной датчика, ВБР меняет свои параметры  $n$ ,  $\Lambda$  и  $\epsilon$  (деформацию), как показано на рисунке 5.4. Здесь точка  $O$  является центром координат и, соответственно, центром датчика. Ось  $Y$  идёт вдоль самой решётки, а ось  $X$  – перпендикулярно ей. Вызываемая волной деформация  $\epsilon$  разбита на соответствующие проекции  $\epsilon_x$  и  $\epsilon_y$ .  $\Theta$  – угол между осью решетки и направлением распространения волны, который варьируется от  $0$  до  $90^\circ$ . Когда акустическая волна распространяется в произвольном направлении, сдвиг брэгговской длины волны  $\Delta\lambda_B$  может быть разбит на  $\Delta\lambda_{Bx}$  и  $\Delta\lambda_{By}$ . Тогда:

$$\Delta\lambda_B = \Delta\lambda_{Bx} + \Delta\lambda_{By} = (C_x \sin\theta + C_y \cos\theta)\lambda_B \epsilon,$$

$$\text{где } C_x = \left( \mu - \frac{n_0^2}{2} \left[ -\mu P_{12} + \frac{1}{2}(P_{11} + P_{12}) \right] \right), C_y = \left( 1 - \frac{n_0^2}{2} \left[ P_{12} - \frac{\mu}{2}(P_{11} + P_{12}) \right] \right).$$

В работе [417] приведены эксперименты по регистрации места удара с использованием ВБР (рисунки 5.5).

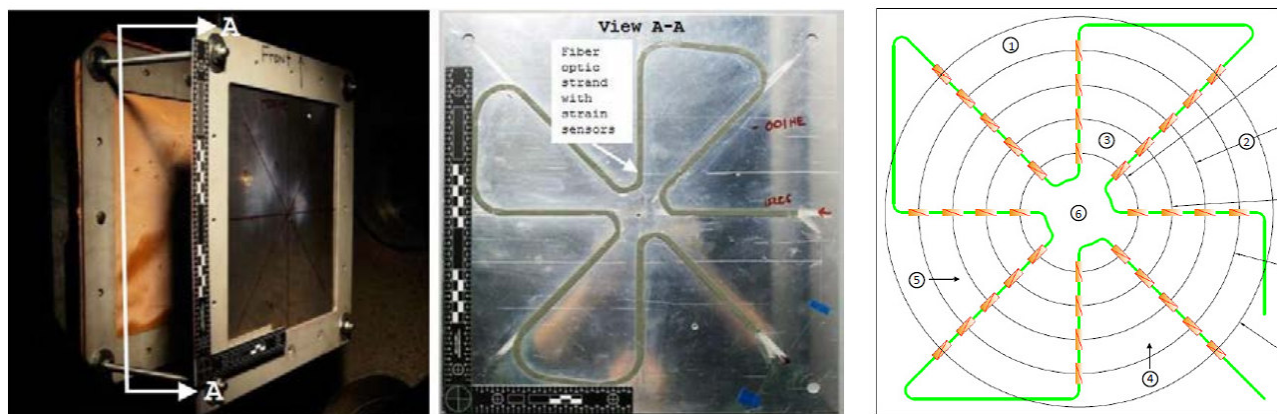


Рисунок 5.5 - Схема расположения и установки с ВБР [417]

В работе [417] эксперименты проводили с алюминиевой пластиной 2024-T3 Al-clad толщиной 1,6 мм, размером 38 см×38 см с испытательным участком размером 30,5 см × 30,5 см. Матрица датчиков, состоящая из тензодатчиков ВБР, была разработана для максимизации чувствительности к градиенту деформации, который излучается от центра испытуемого изделия к границе испытуемого изделия. Брэгговская решетка чувствительна только к деформации вдоль своей основной оси, поэтому выравниванию по направлению к центру испытуемого изделия был придан высокий приоритет. Учитывая размер целевой области испытуемого изделия (30,5 см × 30,5 см) и плотность установки сенсоров (1 брэгговская решетка на 0,3937 см), было определено, что наилучший охват по площади испытуемого изделия был достигнут при 36 брэгговских решетках [417].

Быстродействие системы захвата сигнала на основе ВБР датчиков зависит от скорости обрабатываемой информации с этих датчиков, а именно - от частоты дискретизации. В работе [417] частота сбора данных равнялась 100 Гц. Для получения информации о локализации места удара и его энергии, необходимо увеличить частоту сбора информации до килогерц.

Таким образом, для регистрации механических вибраций можно использовать следующие типы датчиков [424, 172\*, 196\*, 407\*]: пьезодатчики [252], акселерометры [422], оптоволоконные датчики [394].

### **Использование роботов**

Помимо рассмотренных выше датчиков, ведутся работы над методами контроля поверхности КА с использованием роботов [419] для осмотра и ремонта корпуса. Предполагается, что прототип на рисунке 5.6 будет передвигаться по поверхности КА при помощи чашечных присосов и периодически фотографировать её, отсылая изображения экипажу.

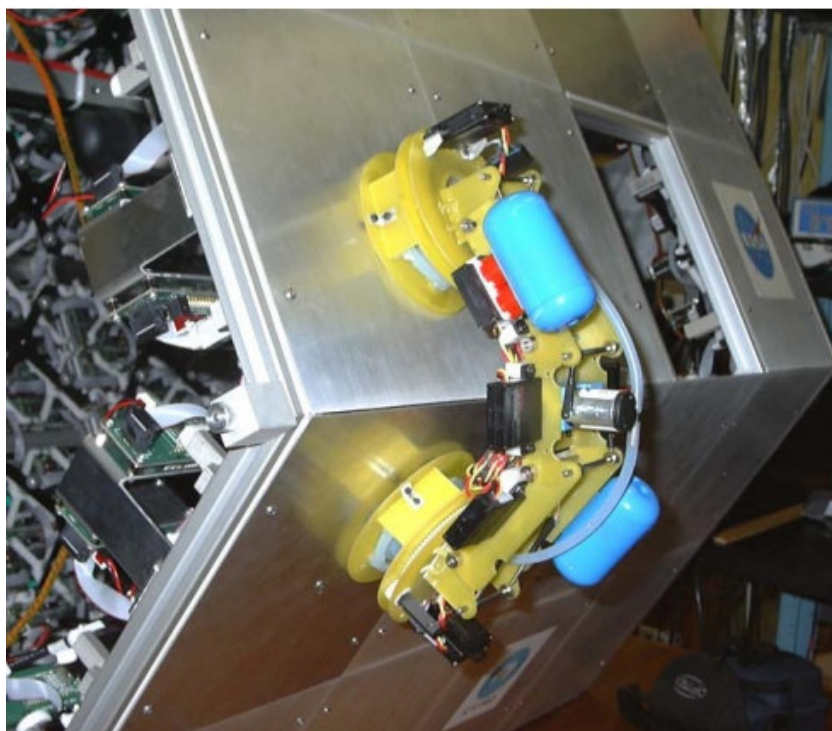


Рисунок 5.6 – Робот для контроля поверхности КА [419]

### Визуализация поверхности КА

Суть этого метода состоит в следующем. При помощи камер наблюдения делается серия статичных изображений поверхности, которые затем отправляются на землю. Поиск мест удара осуществляется путём сравнения фотографий, сделанных в разное время [394]. Примером использования подобного метода является система датчиков на штанге дистанционного манипулятора КА, применяемого NASA с 2005 года (рисунок 5.7).

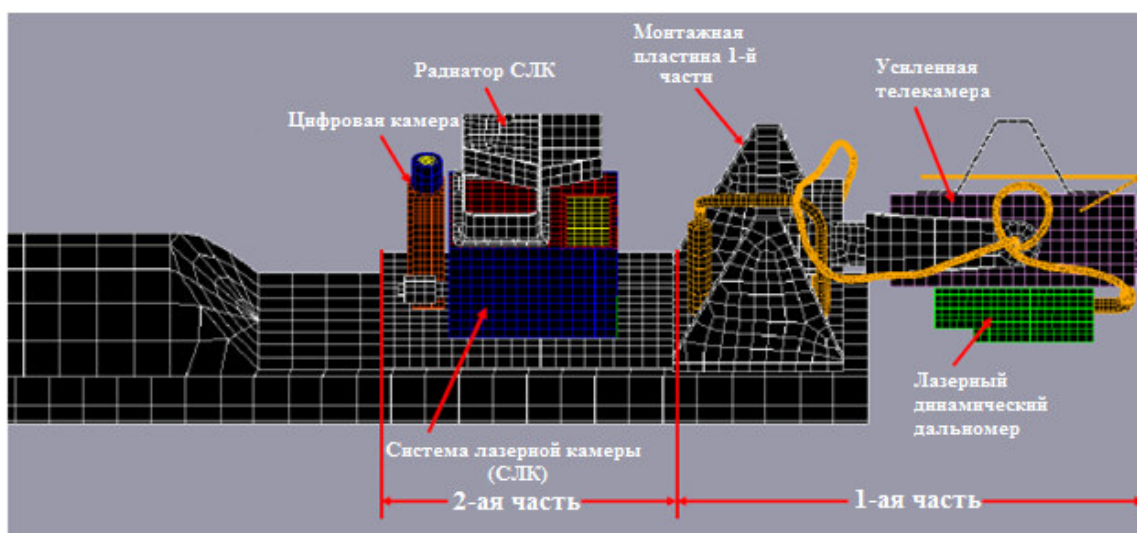


Рисунок 5.7 - Система датчиков на штанге дистанционного манипулятора орбитального шаттла

[394]

## Термография

Термография, показанная на рисунке 5.8 [420], является перспективным методом для обнаружения столкновений в двух различных режимах:

- периодический осмотр;
- непрерывный обзор.

Первый режим подразумевает периодический осмотр поверхности для выяснения, возник ли удар с момента последнего осмотра. Для этого метода необходим подходящий источник теплового излучения для создания тепловых волн внутри материала, которые затем фиксируются инфракрасными камерами. Изменения, возникающие в материале при охлаждении, могут быть связаны с повреждениями. Этот метод особенно подходит для определения расслоения составных панелей.

Что касается второго режима, то в теории, обнаружение столкновения в момент возникновения возможно, поскольку одним из последствий столкновения является сильный локальный нагрев, возникающий крайне близко к месту столкновения. Такой нагрев вызывает инфракрасное излучение, которое может быть зафиксировано соответствующими датчиками [420].

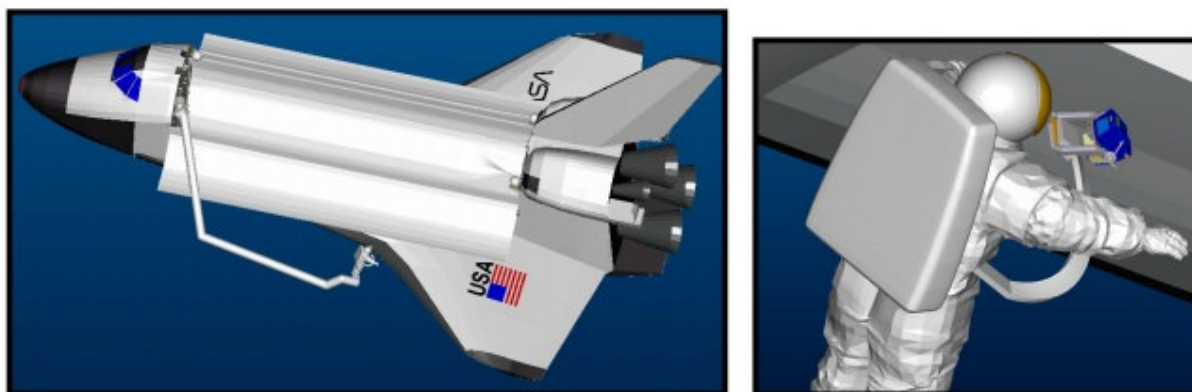


Рисунок 5.8 - Один из концептов методов контроля поверхности КА методом термографии при помощи ручной камеры [420]

## Краткие выводы

На основании рассмотрении основных методов и аппаратных средств контроля поверхности КА можно сделать следующие выводы.

Метод на основе ионной эмиссии удобен с точки зрения установки (монтируется на почти любую выступающую поверхность). Недостатком данного метода является повышенная чувствительность регистрирующих датчиков (микрочанальных пластин, ВЭУ или электродов в виде нитей (пластин)) к шумовым воздействиям внешних факторов космического пространства.

Метод наблюдения за столкновениями микрочастиц с поверхностью КА при помощи световых вспышек и микроволновых излучений в радиочастотном диапазоне требует дальнейших исследований для лучшего понимания данного явления и адаптации этой технологии для наблюдения за поверхностью КА.

Метод акустической эмиссии не имеет значительных недостатков и в целом является перспективным методом для контроля поверхности КА ввиду высокой чувствительности. Для регистрации акустического поля можно использовать оптоволоконные датчики, пьезодатчики и акселерометры.

Пьезоэлектрические датчики имеют малые габариты, массу, и выгодны с точки зрения экономических затрат. Они качественно преобразуют вибрации поверхности космического аппарата в электрический сигнал, который в дальнейшем фиксируется измерительным устройством. Однако такие датчики очень чувствительны к электромагнитным шумам, из-за чего следует применить экранирование датчика или использовать цифровые системы фильтрации.

Метод контроля поверхности при помощи оптоволоконных датчиков находится в активной разработке. Отдельные компоненты систем уже доступны и широко применялись в аэрокосмической промышленности. Данная технология выглядит многообещающей в виду простоты использования, широкой зоны покрытия и сопротивляемости к внешним воздействиям.

Технология регистрации космической пыли на базе пьезоэлектрических плёнок хороша в плане лёгкого веса и большой площади датчика, однако, она имеет большой размер для аппаратов Cubesats, и ограничения, вызванные при соединении нескольких космических аппаратов.

Резистивные датчики могут обнаруживать отверстия, появляющиеся в резистивной плёнке после столкновения с микрочастицами. Применяются детекторы микрочастиц на базе печатных плат, с нанесёнными проводящими полосками, формируя сетку. При попадании частицы в эту решётку, можно определить место удара и геометрические размеры частицы по количеству разорванных полос. Такая же технология, но в модифицированном виде применяется и в солнечных панелях.

При помощи термографического метода можно осмотреть большую площадь за сравнительно короткое время, однако у этого метода имеются проблемы с технической частью в виду высоких требований к вычислительным мощностям для обработки данных.

Использование камер и оптических датчиков являлось способом наблюдения за повреждениями, возникающими после столкновений с микрометеороидами и космическим

мусором. Недостатком подобного метода является человеческий фактор, поскольку именно на плечи людей ложится задача определения местонахождения повреждений и их оценка.

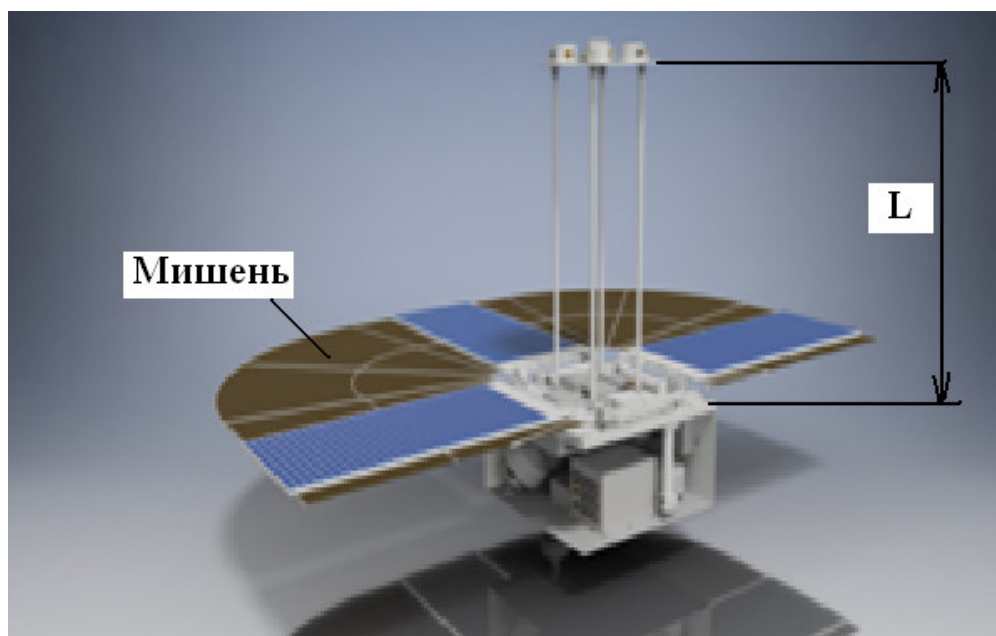
Для повышения достоверности получаемых данных рекомендуется комбинировать несколько методов одновременно [421].

### 5.1 Экспериментальная установка в виде макета космического аппарата для контроля места удара высокоскоростных пылевых микрочастиц

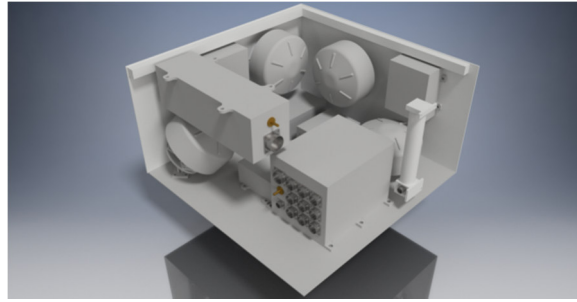
Была разработана компьютерная модель экспериментальной установки в виде МКА для регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора с компоновкой приборов (рисунок 5.9а) [47\*, 220\*, 221\*, 425\*].

Научная аппаратура детектора состоит из мишени и четырёх приёмников ионов в виде микроканальных пластин (МКП), расположенных на фиксированном расстоянии от неё (рисунок 5.9г).

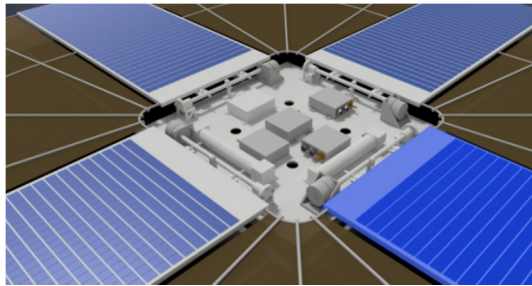
Обслуживающая аппаратура МКА (рисунок 5.9б,в) состоит из пяти датчиков засветки; трёх электромагнитов, расположенных во взаимно перпендикулярных осях; датчика магнитного поля; блока управления; аккумулятора; приёмо-передатчика; источника питания, двух антенн (одна антенна предназначена для приёма команд управления, а другая - для передачи телеметрии) и блока измерительных датчиков, состоящих из датчика Солнца и четырёх микроканальных приёмников.



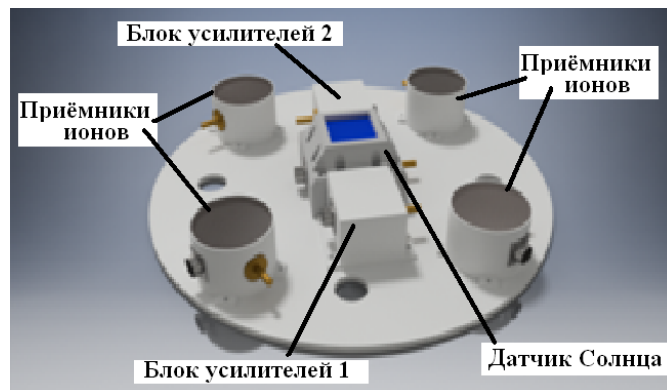
а)



б)



в)



г)

Рисунок 5.9 - 3D – модель МКА

Разработана структурная схема детектора в виде МКА для регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора, содержащего научную и обслуживающую аппаратуру (рисунок 5.10).

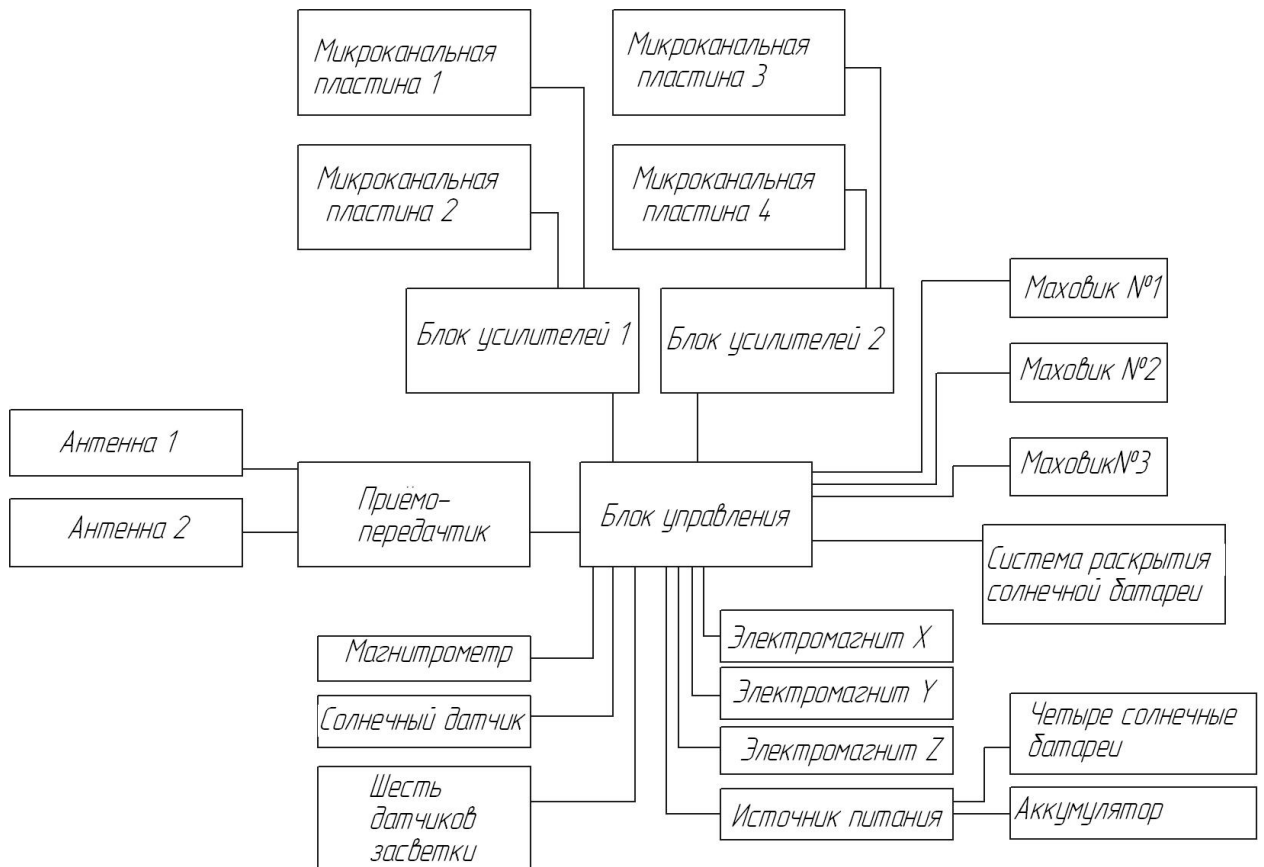


Рисунок 5.10 -Структурная схема детектора в виде МКА

Блок управления и ориентации МКА состоит из трёх маховиков и магнитной системы разгрузки кинетического момента. Такой подход основывается на взаимодействии исполнительных органов системы управления (электромагнитов) с магнитным полем Земли [47\*]. Электромагниты ЭМ являются исполнительными элементами системы ориентации КА. ЭМ предназначен для формирования управляемого механического момента. Во время работы система из трех ортогонально расположенных электромагнитов используется для формирования управляемого магнитного момента, который при взаимодействии с МП Земли, обеспечивает формирование механического момента. ЭМ предназначен для токового управления.

Метод регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора основан на регистрации ионного тока ударной плазмы, которая образуется при высокоскоростном соударении частицы с плёночным детектором. Солнечные батареи и плёнка, натянутая между ними, играют роль мишени для высокоскоростных микрочастиц и находятся под нулевым потенциалом относительно корпуса МКА. На крепёжном основании размещены четыре микроканальные пластины, которые являются приёмником ионного тока. Сигналы со всех четырёх микроканальных пластин объединяются и обрабатываются в блоке управления. Подробно методика измерения изложена в [47\*], а расчёт конструкции детектора приведён в [201\*, 221\*]. Полученные с микроканальных пластин сигналы

(рисунок 5.11) записываются во внутреннюю память блока управления и далее происходит их обработка на Земле.

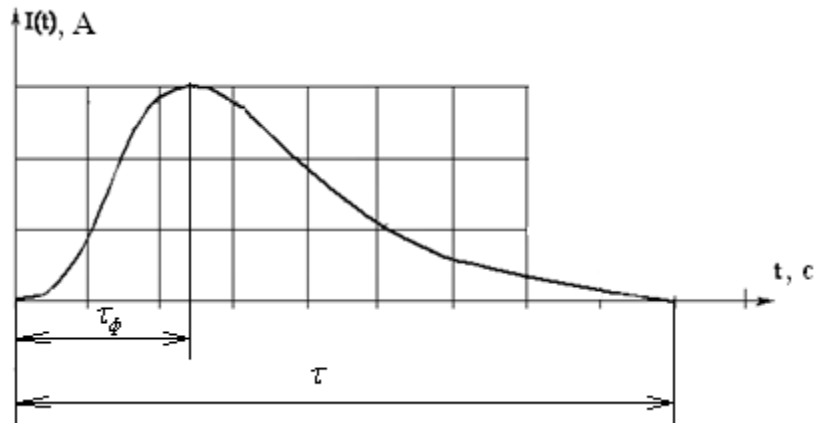


Рисунок 5.11- Форма входного тока

Зависимость сигнала на входе приемника ионов при ударе в мишень от места попадания показаны на рисунке 5.12 [201\*, 426].

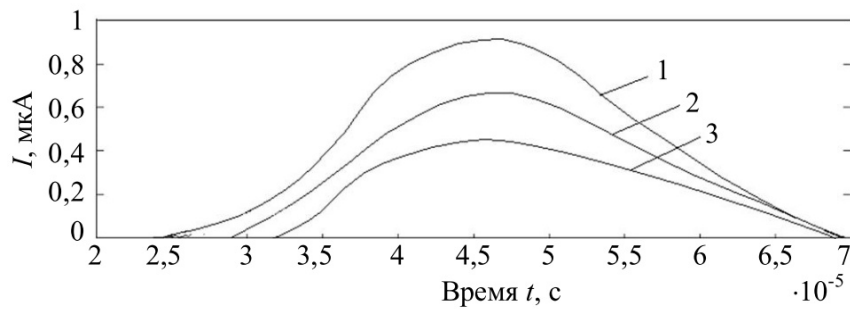
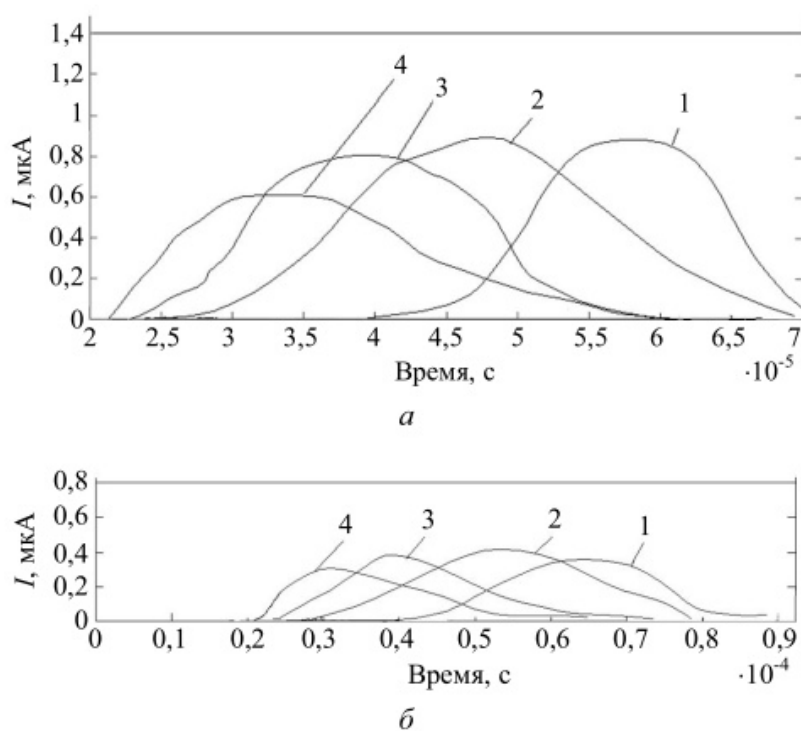


Рисунок 5.12 - Сигнал на входе приемника ионов при ударе в мишень в точке: 1 -  $y = 0$ ; 2-  $y = 0,5$ м; 3-  $y = 1$  м

На рисунке 5.13 а, б изображены сигналы на входе приемника ионов в зависимости от места удара и скорости ударника. Видно, что при увеличении скорости ударника передний фронт импульса уменьшается, и, энергия сигнала на входе приемника должна увеличиваться, но в связи с тем, что при большой скорости увеличиваются потери ионов при их сборе приемником, энергия сигнала на входе приемника начинает убывать. Можно заметить при этом, что сигналы, полученные при  $y=0$  и  $y=1$  м, имеют один и тот же характер при изменении скорости частицы.



а –  $y=0$  м; б –  $y=1$  м;

1 –  $V=5$  км/с; 2 –  $V=10$  км/с; 3 –  $V=15$  км/с; 4 –  $V=20$  км/с.

Рисунок 5.13 – Сигнал на входе приемника ионов при ударе в мишень

При ударе частицы в мишень, состоящей из солнечной батареи и плёнки, образуется плазма, скорость разлёта которой можно оценить согласно выражению:

$$U_{пл} = k \cdot V, \quad (5.11)$$

где  $k = \frac{1}{1 + \sqrt{\rho_y / \rho_M}}$  - коэффициент пропорциональности, зависящий от плотности

частицы (ударника)  $\rho_y$  и плотности мишени  $\rho_M$ ,  $\frac{кг}{м^3}$ ;  $U_{пл}$  - скорость разлёта плазмы, м/с;  $V$

– скорость частицы при ударе, м/с.

Задача определения параметров частиц состоит в измерении импульса ионного и электронного тока, который образуется за счёт приложенного между мишенью и приёмником высокого напряжения. Поверхность МКА имеет сложную форму, поэтому расчёт электростатического поля проводится численными методами с использованием специализированной программы, реализующей выражения, приведённые ниже.

Фронт импульса (рисунок 5.12), регистрируемого приёмником, можно определить согласно выражению:

$$\tau_{\phi} = \frac{L}{U_{nl}}, \quad (5.12)$$

где  $L$  - расстояние от мишени до приёмника ионов (рисунок 5.9а).

Как видно из (5.11), (5.12), скорость высокоскоростной микрочастицы можно определить, зная плотности ударника и мишени и расстояние от мишени до приёмника по переднему фронту импульса, полученного с помощью приёмника при высокоскоростном соударении:

$$V = \frac{L \cdot (1 + \sqrt{\rho_Y / \rho_M})}{\tau_{\phi}}, \quad (5.13)$$

где  $L=0,8$  м для разработанного макета МКА,  $\tau_{\phi}$  определяется исходя из полученной осциллограммы зависимости тока от времени; в качестве плотности мишени можно взять плотность алюминия, в качестве плотности ударника - плотность железа [47\*].

Массу ударяющей частицы можно определить, используя экспериментально полученное соотношение [47\*]:

$$Q^+ = c m^{\alpha} V^{\beta}, \quad (5.14)$$

где  $Q^+$  - суммарный заряд ионов, образовавшихся при ударе;  $\alpha = 0,9 \pm 0,1$ ,  $\beta = 2,8 \pm 0,5$ ;  $c$  - постоянная, зависящая от свойств материала, приблизительно равная  $1 \cdot 10^{-5}$ .

Суммарный заряд ионов, возникших вследствие удара частицы о мишень, пропорционален площади под ионным импульсом:

$$Q^+ = \int_0^{\tau} I(t) dt = \frac{1}{R_{BX}} \times \int_0^{\tau} U(t) dt, \quad (5.15)$$

где  $R_{BX}$  – входное сопротивление приемника ионов,  $U(t)$  – зависимость напряжения на сетке ионизационного датчика от времени,  $\tau$  - длительность ионного импульса (рис.5.30).

Тогда при  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 3$  [410] массу частицы из (5.14) можно определить по формуле:

$$m = \frac{Q^+}{C \cdot V^3}. \quad (5.16)$$

С целью проверки монтажа разрабатываемых блоков обслуживающей и научной аппаратуры разработан макет МКА, который представляет собой габаритную модель для регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора (рисунки 5.14-5.15).

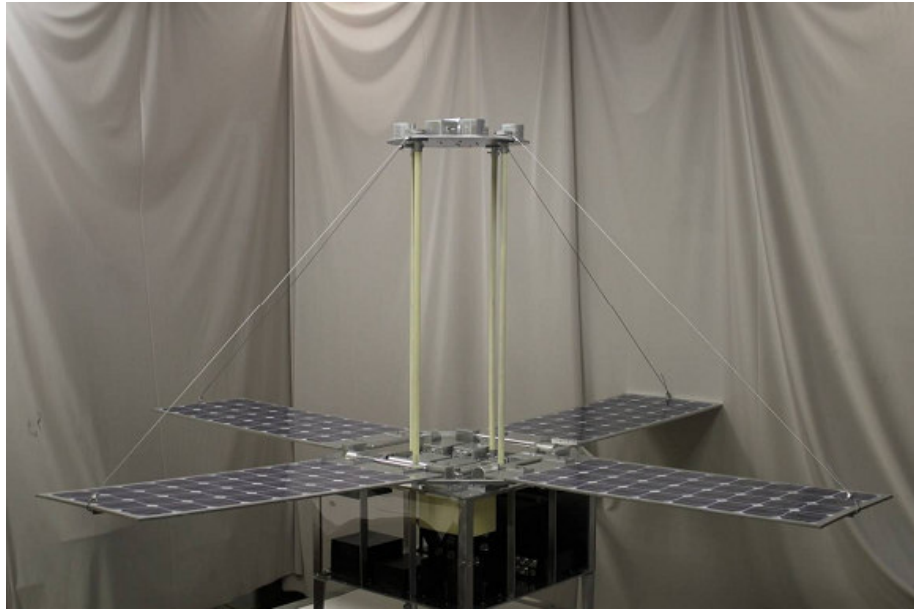


Рисунок 5.14- Внешний вид макета МКА в раскрытом состоянии (без плёночной мишени)

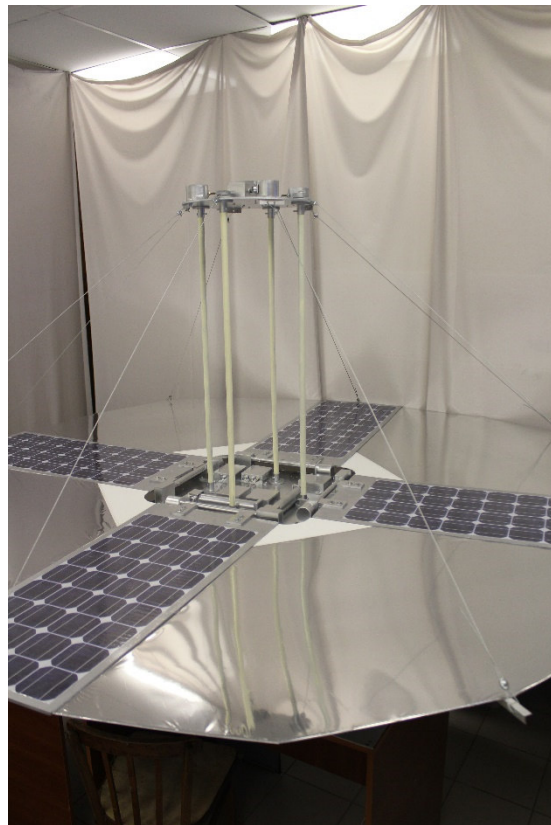


Рисунок 5.15- Внешний вид макета МКА в раскрытом состоянии (с плёночной мишенью)

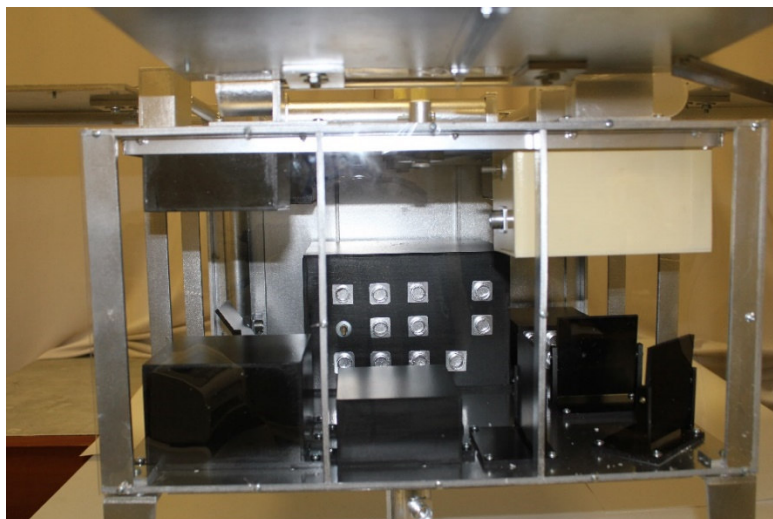


Рисунок 5.16 – Приборный отсек МКА

Макет МКА массой до 50 кг выполнен в соотношении 1:1 с размещёнными в нём габаритными блоками электроники. Отдельные элементы данного космического аппарата были отработаны в институте космического приборостроения Самарского университета (образцы блоков приведены на рисунках 5.17- 5.21) [295, 200\*, 323\*, 427-430].



Рисунок 5.17– Внешний вид блока компенсации микроускорений (КМУ) [200\*]



Рисунок 5.18 – Внешний вид электромагнитов [200\*]



Рисунок 5.19–Внешний вид датчика солнца [200\*]

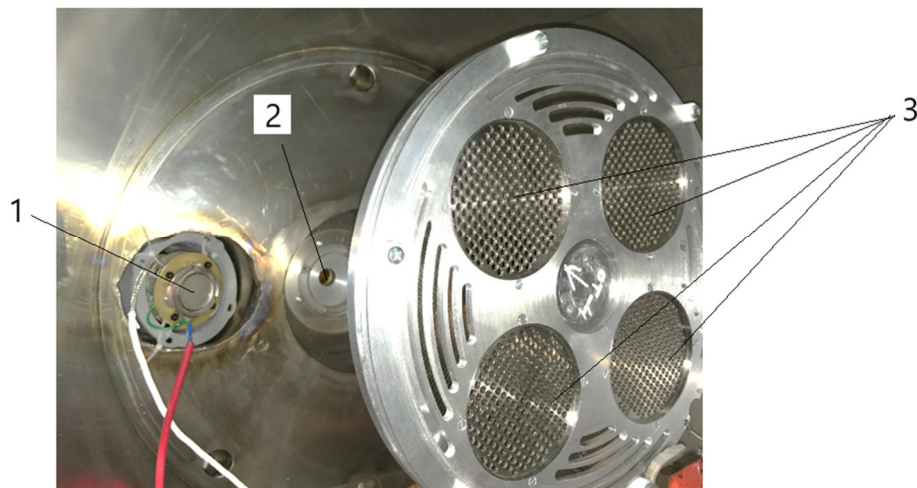


Рисунок 5.20–Внешний вид датчика засветки [200\*]



Рисунок 5.21 – Внешний вид магнитного датчика [200\*]

Была проведена серия экспериментов по сбору ионов, разлетающихся с различных поверхностей. На рисунке 5.22 показано расположение мишени и приёмника ионов в вакуумной камере. Мишень представляет собой титановые образцы с отверстиями, закрепленные в алюминиевой раме. Приёмник ионов не закрыт заземлённой сеткой и его входное окно находится под потенциалом минус 2800 В, что обеспечивает притягивание положительно заряженных ионов в заземленной камере.



1 – микроканальная пластина; 2 – тракт ускорителя; 3 – титановые мишени с отверстиями

Рисунок 5.22 – Фотография с испытаний микроканальной пластины [287\*]

## 5.2 Методики использования поверхности космического аппарата в качестве датчиков высокоскоростных микрочастиц

### 5.2.1 Методика регистрации параметров частиц космического мусора и микрометеороидов с использованием поверхности малого космического аппарата №1

Предлагается следующая конструкция МКА для регистрации частиц космического мусора и микрометеороидов, которая состоит из пленочной структуры металл-диэлектрик-металл, электромагнитов, расположенных по трем взаимно ортогональным осям, приемника ионов, солнечной батареи, согласно изобретению на каждой оси расположен один электромагнит, соединенный с блоком управления электромагнитами, который соединен с блоком управления системой, дополнительно введены блок регистрации, который соединен с пленочная структура металл-диэлектрик-металл зонтичной конструкции и блоком управления системой, введен блок формирования питания, соединенного с солнечной батареей и блоком управления системой, добавлен приемо-передающий модуль, соединенный с командной антенной, телеметрической антенной и блоком управления системой, введен блок развертки пленочного датчика, который соединен с блоком управления системой, к которой подключены шесть солнечных датчиков, расположенные на каждой из граней малого космического аппарата [431\*]. Кроме того, на каждой оси расположено по одному электромагниту (рисунки 5.23-5.26).

Малый космический аппарат (согласно рисункам 5.23-5.26) содержит блок регистрации 1, пленочная структура металл-диэлектрик-металл 2, блок развертки пленочного датчика 3, шесть солнечных датчиков 4, блок формирования питания 5, солнечную батарею 6, блок управления системой 7, приемо-передающий модуль 8,

командную антенну 9, телеметрическую антенну 10, блок управления электромагнитами 11, три электромагнита 12, приемник ионов 13.

Малый космический аппарат работает следующим образом. В нераскрытом состоянии состояние свернуты солнечные батареи 6 и пленочная структура металл-диэлектрик-металл 2. При отстыковки данного малого космического аппарата происходит подача управляющего сигнала от блока управления системой 7 на блок развертки пленочного датчика 3. При этом происходит раскрытие пленочной структуры металл-диэлектрик-металл 2 на подобии зонтика. Формирование необходимых напряжений питания для малого космического аппарата происходит в блоке формирования питания 5, который получает напряжение от солнечной батареи 6. Ориентирование космического аппарата в космическом пространстве происходит с помощью шести солнечных датчиков 4, расположенных на каждой грани космического аппарата, трех электромагнита 12, расположенных по трем взаимно перпендикулярным осям и блока управления электромагнитами 11. По солнечным датчикам 4 в блоке управления системой определяется ориентация космического аппарата на Солнце и формируются управляющие команды для блока управления электромагнитами 11, в котором происходит формирование импульс тока необходимой длительностью и амплитудой для электромагнитных катушек 12.

Обмен информацией с наземным пунктом управления космическими аппаратами происходит по двум каналам командному (по нему посылается команда с наземным пунктом управления космическими аппаратами на космический аппарат) и телеметрическому каналу (по нему происходит передача телеметрической информации с космического аппарата на наземный пункт управления космическими аппаратами). Связь осуществляется с помощью приема-передающего модуля 8, соединенного с блоком управления системой 7, командной антенной 9 (для передачи команд), телеметрической антенной 10 (для передачи телеметрии).

Регистрация микрометеороидов и частиц космического мусора происходит следующим образом. Между пленочным детектором 2 и приемником ионов 13 создается разность напряжения порядка несколько сот вольт, при этом на собирающем электроде находится отрицательный потенциал относительно пленочного детектора. Пленочный детектор представляет собой трехслойную структуру металл-диэлектрик-металл, на которую от блока регистрации 1 подается напряжение несколько десятков вольт. При ударе высокоскоростного микрометеороида или частицы космического мусора по пленочной структуре металл-диэлектрик-металл 2 происходит кратковременное замыкание пленочной структуры металл-диэлектрик-металл, которое регистрируется блоком регистрации 1, а

также происходит образование ионов, которые собирает приемник ионов 13. Информация с приемника ионов 13 и блока регистрации 1 поступает на блок управления системой 7.

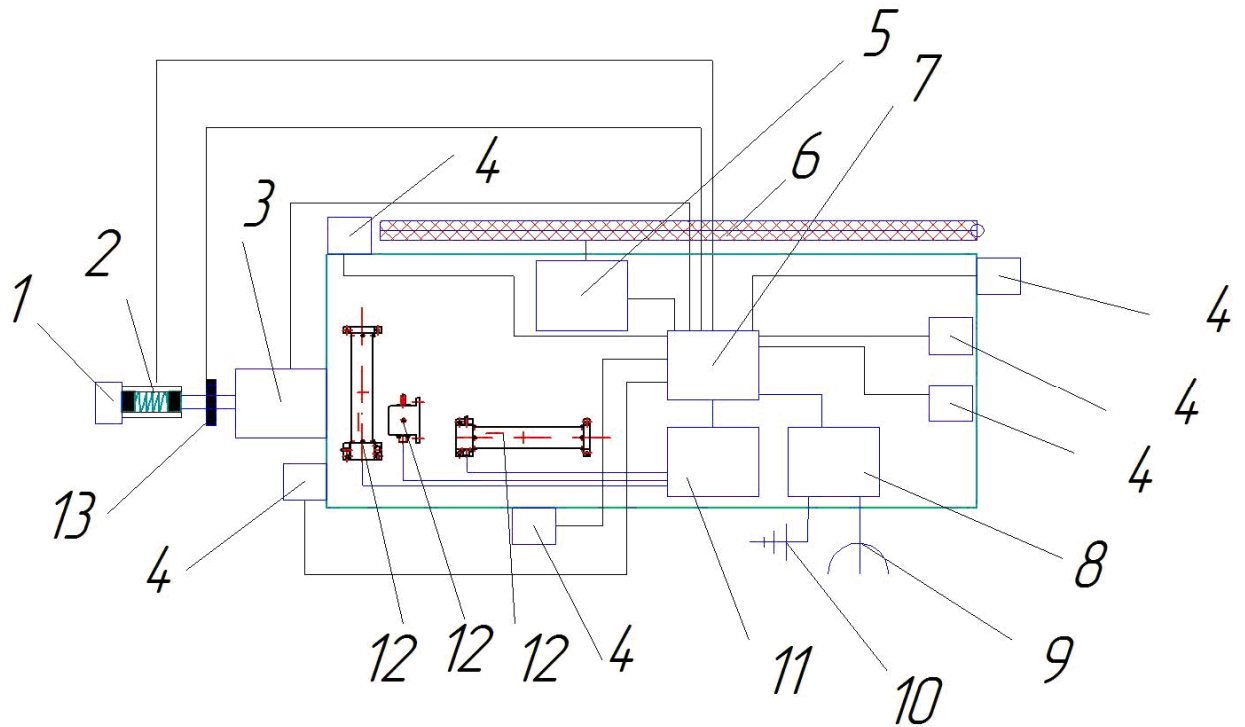


Рисунок 5.23 – Схема МКА для регистрации частиц космического мусора и микрометеороидов в нераскрытом состоянии (перед отстыковкой от космического аппарата или ракетносителя) (вид справа)

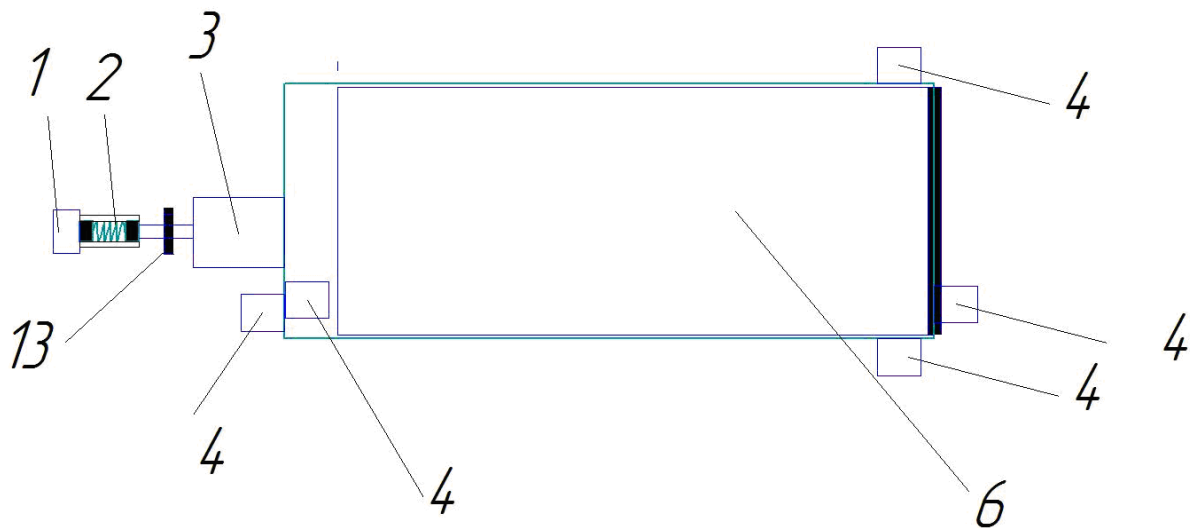


Рисунок 5.24 - Схема МКА для регистрации частиц космического мусора и микрометеороидов в нераскрытом состоянии (перед отстыковкой от космического аппарата или ракетносителя) (вид сверху)

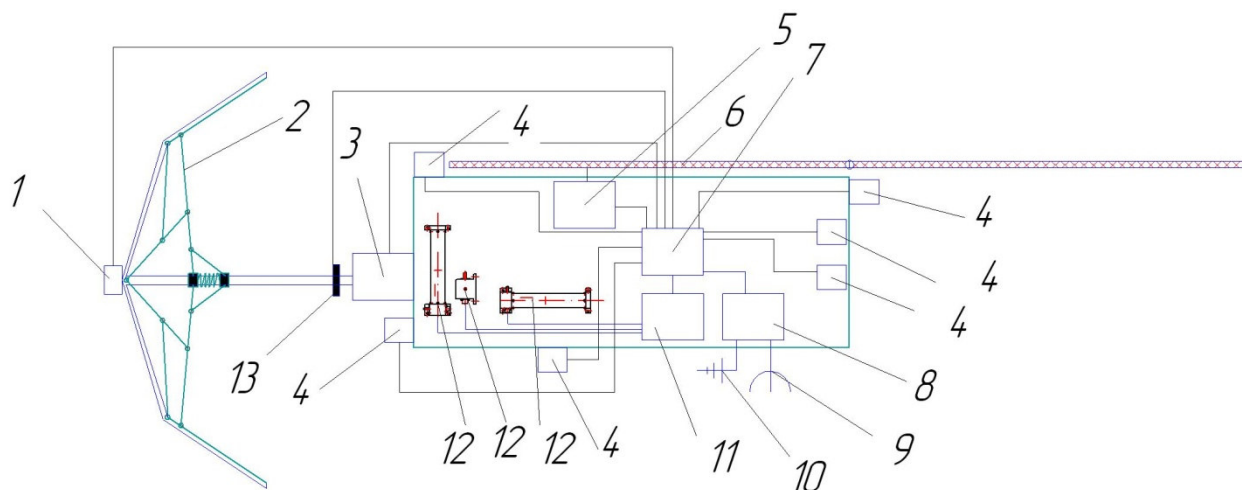


Рисунок 5.25- Схема МКА в раскрытом состоянии (вид справа)

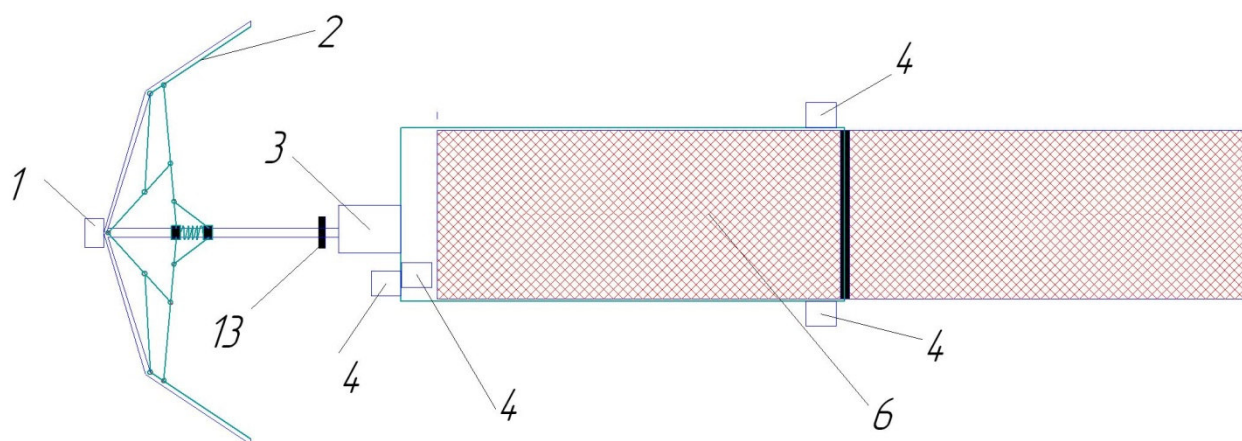


Рисунок 5.26 - Схема МКА в раскрытом состоянии (вид сверху)

### 5.3.2 Методика регистрации параметров частиц космического мусора и микрометеороидов с использованием поверхности малого космического аппарата №2

Предлагается конструкция космического аппарата для регистрации частиц космического мусора и микрометеороидов состоит из двух, разнесённых в пространстве на базовую длину видеокамер (оптических блоков), смонтированных вдоль одной линии, которые состоят из двух оптических блоков, содержащих объективы с ПЗС-матрицами и блендами, соединённых между собой движущейся телескопической штангой, в одном из оптических блоков установлен баллон с химическим отвердителем, соединённый с пьезоэлектрическим натекалем, каждый из оптических блоков снабжен магнитной системой управления в виде магнитометра и трёх электромагнитов, расположенных относительно друг от друга взаимно-перпендикулярно, а также солнечным датчиком, GPS-приёмником, фотодиодами, расположенными на боковых поверхностях и бортовым компьютером, согласно изобретению на одном из оптических блоков установлен пленочный датчик, к которому жестко прикреплены направляющие пленочного датчика,

соединенные с блоком развертки пленочного датчика, а в другом оптическом блоке установлены солнечные батареи и электроды для сбора ионов, которые соединены с блоком питания и усилителями заряда и напряжения [432\*] (рисунки 5.27, 5.28).

На рисунке 5.27 показано устройство, содержащее два оптических блока 1 и 2, два объектива с ПЗС-матрицами ( $\lambda=0,3-0,6\text{мкм}$ ) и блендами 3 и 4, электромагниты 5 магнитной системы управления, солнечные батареи 6, электроды для сбора ионов 7, телескопическая раздвижная штанга 8, баллон с химическим отвердителем 9, фотодиоды 10, солнечный датчик 11, GPS-приёмник 12, передатчик 13, антенна передатчика 14, бортовой компьютер 15, датчики температуры 16, источник питания 17, ПЗС-матрицы 18 и 19, усилители напряжения и зарядов 20, 21 и 22, магнитные датчики 23, пленочный датчик 27, блок развертки пленочного датчика 28, направляющие пленочного датчика 29.

Устройство в начальном нераскрытом состоянии, показанное на рисунке 5.28, содержит преобразователь сигналов 24, блок электроники магнитной системы управления 25, преобразователь сигналов с фотодиодов 26 с фотодиодов 10, бортовой компьютер 15, магнитные датчики 23, солнечная батарея в сложенном состоянии 6, цилиндр плёночной структуры металл-диэлектрик-металл 7 в сложенном состоянии, телескопическая раздвижная штанга 8, баллон с химическим отвердителем и электромагнитным клапаном 9, солнечный датчик 11, приёмник GPS 12, пленочный датчик 27, блок развертки пленочного датчика 28, направляющие пленочного датчика 29.

После вывода устройства в космическое пространство с помощью телескопической штанги происходит выдвижение блоков 1 и 2 на расстояние, равное базе  $L$  ( $\sim 5\text{м}$ ). Далее осуществляется выдвижение оптических систем с блендами 3 и 4. Включается магнитная система управления, содержащая в качестве исполнительных элементов электромагниты магнитной системы 5, после чего производится раскрытие солнечных батарей 6 и включается блок развертки пленочного датчика 28, который развертывает направляющие пленочного датчика 29, которые разворачивают пленочный датчик 27. Пленочный датчик выполнен из майларовой плёнки (металл-диэлектрик-металл) с толщиной 30-40 мкм. Он разворачивается совместно с раздвижением телескопической штанги 8.

На гранях блоков регистрации частиц космического мусора 1 и 2 установлены фотодиоды 10, с помощью которых проводится оценка пространственного положения устройства совместно с солнечным датчиком 11, GPS-приёмником 12 и исполнительными органами 5 магнитной системы ориентации. Для обработки, передачи информации в устройстве введены передатчик 13, его антенна 14, бортовой компьютер 15, термодатчики 16.

Таким образом, после раздвижения блоков 1 и 2, раскрытия солнечных батарей 6 устройство готово к работе, то есть осуществляется первоначальная ориентация устройства в гравитационном поле Земли с помощью указанных обслуживающих систем.

На основе данных навигационного GPS-приёмника 12, солнечного 11 и магнитных датчиков 13 (рисунок 5.27), с помощью формирования соответствующих токов в электромагниты 5 магнитной системы ориентации производится более точная ориентация по трём пространственным осям. Устройство ориентируется таким образом, чтобы солнечный свет не засвечивал видеокамеры, но попадал на солнечные батареи для подзарядки систем питания.

Космический аппарат для регистрации частиц космического мусора и микрометеороидов может быть ориентировано относительно осей  $x$  и  $y$ , таким образом видеокамеры могут сканировать в пространстве.

Регистрация частиц космического мусора (космических объектов) производится следующим образом. Свет (солнечный или от дополнительного источника в случае мелких низкоскоростных частиц в окрестности устройства- малого космического аппарата), отраженный от объекта, попадает на чувствительные элементы (ПЗС – матрицы 18 и 19) видеокамер, видеосигнал с которых обрабатывается в бортовом компьютере 4 (рисунок 5.36). Сигнал с видеокамер содержит в себе информацию о размере объекта (частицы) в виде яркости её изображения, а также о его положении в плоскости изображений данной камеры в виде координат сигнала на площадном чувствительном элементе (угловое положение частицы относительно видеокамеры).

В бортовом компьютере 15 на основе изображений двух камер (при известном расстоянии между камерами  $L$  – стереобазе) восстанавливаются трёхмерные координаты частицы. Базой устройства является телескопическая штанга 8. Чем больше расстояние между блоками 1 и 2, тем выше дальность работы устройства. Путём съёмки исследующих кадров и их обработки получается последовательность трёхмерных кадров движения частиц. При использовании прогнозных алгоритмов количество обрабатываемых кадров резко сокращается (на порядок и более), что позволяет сократить потребности устройства в вычислительной мощности и увеличивает быстродействие.

Для ориентации устройства по вектору магнитного поля Земли сигналы с магнитных датчиков 23 поступают в блок электроники. Для определения углового положения устройства относительно Солнца сигналы с солнечного датчика 11 через преобразователь сигналов 24 поступают на блок электроники 25 магнитной системы управления и его выходы – на бортовой компьютер 15. Сигналы с фотодиодов 10 поступают на блок –

преобразователь сигналов 24 и далее с его выхода на бортовой компьютер 15. Обработка этих сигналов позволяет уточнить пространственное положение устройства.

Регистрация параметров микрометеороидов производится следующим образом. В качестве мишени при регистрации микрометеороидов в устройстве используется пленочный датчик 27 в виде структуры металл-диэлектрик-металл (МДМ) [435\*], на которую от источника постоянного напряжения подается  $-100\text{В}$ , (внешняя обкладка структуры заземлена), а на электроды для сбора ионов подается напряжение  $-300\text{В}$ . При пробое МДМ –структуры микрометеороидом или частицей космического мусора образуется импульс усиливаемый усилителем напряжения и зарядов 20. Образовавшиеся при ударе ионы регистрируются с помощью электродов для сбора ионов 7.

Для контроля температуры на плёночных структурах установлены термодатчики 16. За счет использования пленочного датчика 27 и электродов для сбора ионов 7 можно получить большие площади для регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора.

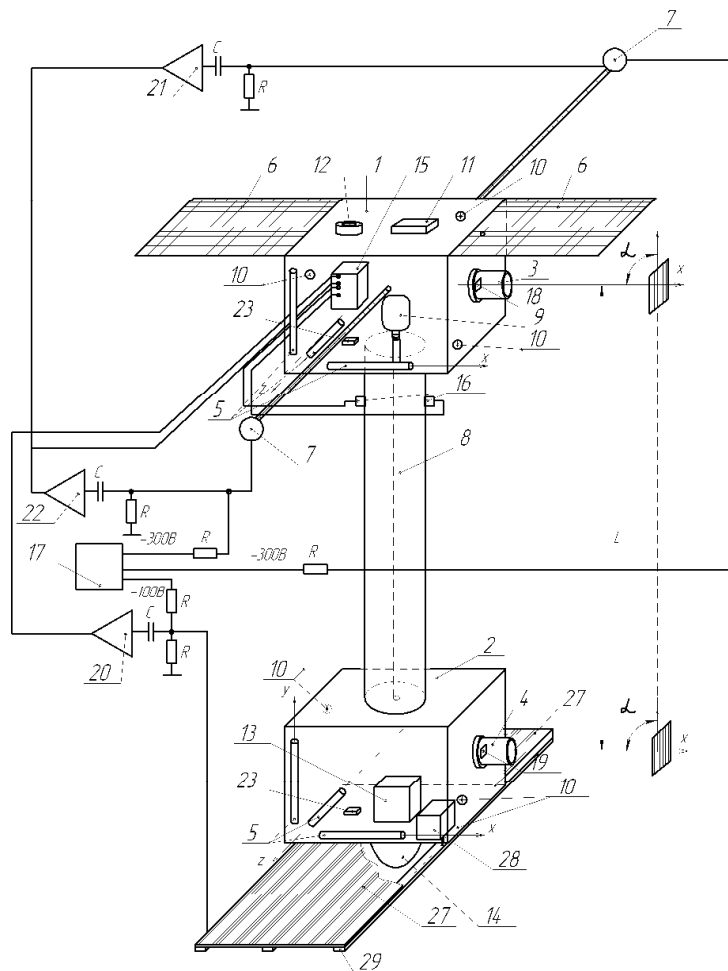


Рисунок 5.27 - Устройство в рабочем состоянии

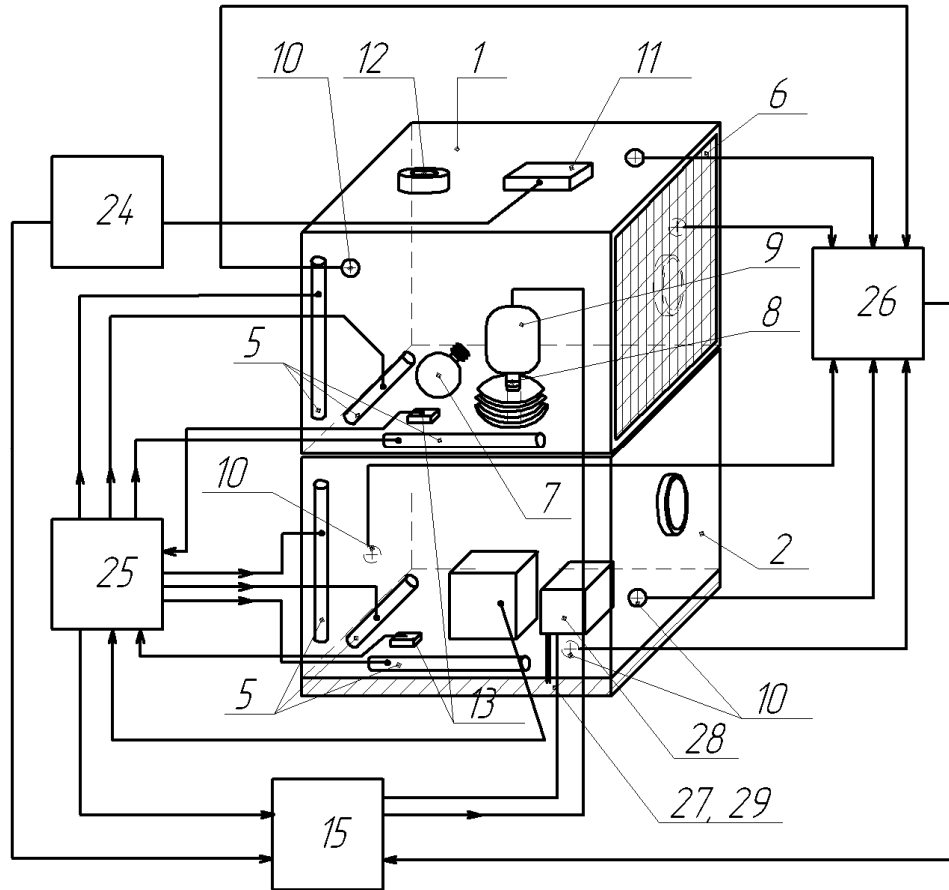


Рисунок 5.28 – Устройство в нераскрытом состоянии

### 5.3.3 Методика регистрации параметров частиц космического мусора и микрометеороидов с использованием поверхности малого космического аппарата №3

Предлагается устройство контроля герметичности элементов конструкции космического аппарата содержит приемник ионов, установленный на расстоянии от контролируемой поверхности космического аппарата, спутниковый модем, устройство формирования сигнала, при этом спутниковый модем, устройство формирования сигналов и приемники ионов заключены в одном защитном корпусе, вход приемника ионов соединен с устройством формирования сигнала, выход которого соединен со входом спутникового модема, соединенного с антенной, фокусирующую сетку, прикрепленную к защитному корпусу, устройством ионизации потока газовых частиц, прикрепленную со стороны фокусирующей сетке к защитному корпусу, в защитном корпусе установлен фотоэлектронный умножитель, а на поверхности контролируемой поверхности космического аппарата установлен пьезодатчик, соединенный с помощью усилителя с устройством формирования сигнала, согласно изобретению на поверхности космического аппарата установлены измерительные антенны не менее трех штук и дополнительно

снабжено антенными усилителями, соединенными с устройством формирования сигнала и измерительными антеннами [433\*]. Измерительных антенн должно быть не менее трех штук, так как для определения вектора скорости в декартовой системе координат необходимо произвести не менее трех измерений.

Устройство контроля герметичности элементов конструкции космического аппарата ионосферы (рисунок 5.29) содержит приемник ионов 1, металлическую сетку 2, заряженную до потенциала  $-300\text{В}$ , устройство для передачи данных на Землю 3 (спутниковый модем), ионизирующее устройство 4, антенну 5, устройство формирования сигнала 6, защитный корпус 7, пьезодатчик 8, усилитель 9, фотоэлектронный умножитель 10, измерительные антенны 11, 12, 13, антенные усилители 14, 15, 16.

Принцип работы устройства следующий. При совпадении микрометеороида с контролируемой поверхностью КА, в месте контакта образуется плазма, ионы которой попадают на приемник ионов 1, сбор их осуществляется за счет напряжения на приемнике, равном  $-350\text{В}$  относительно мишени. С целью увеличения поверхности сбора ионов приемником используется металлическая сетка 2, заряженная до  $-300\text{В}$ . Далее происходит процесс ионизации окружающего пространства с помощью ионизирующего устройства 4. В случае пробоя поверхности космического аппарата, из него начинает выходить поток воздуха, который ионизируется устройством 4 и собирается приемником ионов. Пьезодатчик 8 срабатывает только тогда, когда происходит удар по поверхности космического аппарата. Далее сигнал с пьезодатчика 8 через усилитель 9 поступает на устройство формирования сигнала 6. Фотоэлектронный умножитель 10 регистрирует вспышку, образующуюся при соударении высокоскоростной частицы с поверхностью космического аппарата от разряда на поверхности космического аппарата. Устройство формирования сигнала 6 обрабатывает информацию с приемника ионов и пьезодатчика в форму, удобную для передачи через спутниковый модем 3. Спутниковый модем 3 и антенна 5 передают обработанный сигнал на наземный пункт связи. Пылевые частицы, находящиеся на околоземной орбите обычно заряжены до определенного электрического потенциала. При подлете к поверхности КА на измерительные антенны 11, 12, 13 наводится импульс тока, который усиливается антенными усилителями 14, 15, 16 и подается на вход устройства формирования сигнала. На основе данных с усилителей 14, 15, 16 (по заранее оттарированным характеристикам, полученных в лабораторных условиях) производится корреляция полученных данных с вектором скорости высокоскоростной частицы до удара с поверхностью КА.

Преимуществом данного устройства по сравнению с другими аналогичными устройствами является то, что оно позволяет контролировать поверхность космического

аппарата и измерять вектор скорости высокоскоростных пылевых частиц, при этом, не мешая его работе.

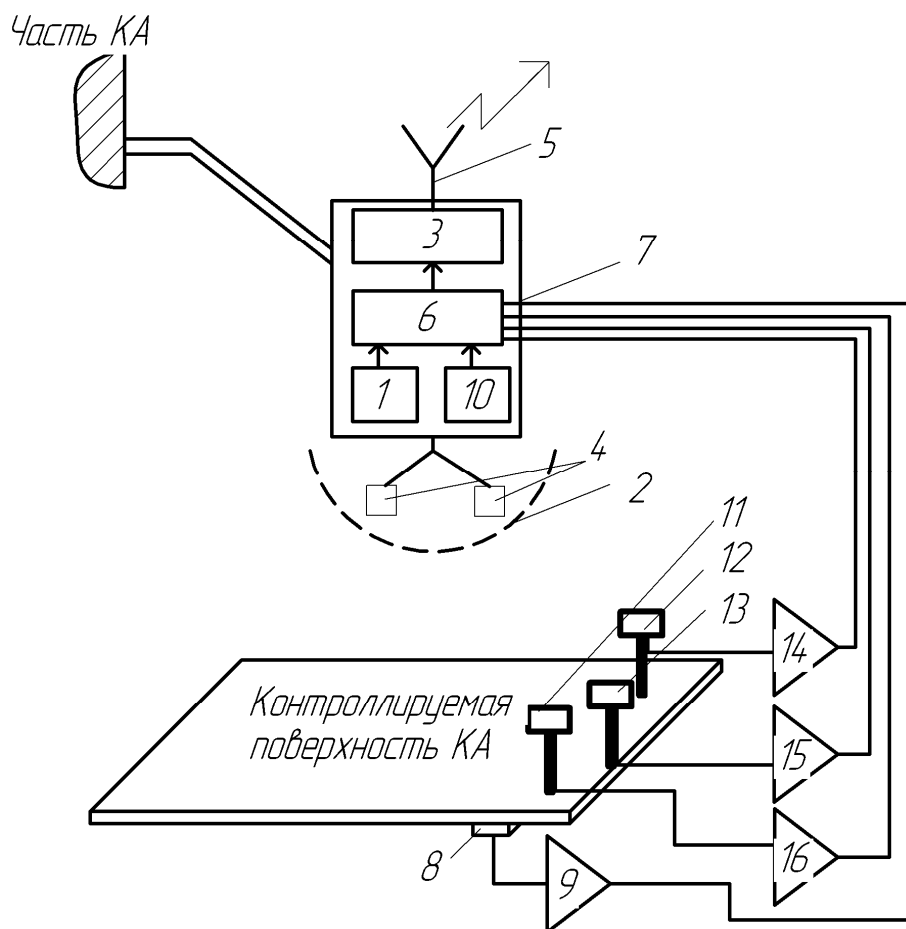


Рисунок 5.29 - Устройство контроля герметичности элементов конструкции космического аппарата

#### 5.3.4 Методика регистрации параметров частиц космического мусора и микрометеороидов с использованием поверхности малого космического аппарата №4

Предложена конструкция МКА для регистрации частиц космического мусора и микрометеороидов состоит из пленочной структуры металл-диэлектрик-металл, электромагнитов, расположенных по трем взаимно ортогональным осям, приемника ионов, солнечной батареи, согласно изобретению дополнительно введены крепежные секции, которые соединены с четырьмя модулями выдвижных штанг, эти модули соединены с блоком управления системой, соединенной с электромагнитами и приемо-передающим модулем, который соединен с командной антенной и телеметрической антенной, и блоком разворачивания солнечных батарей, соединенным с солнечными батареями, и блоком развертки пленочного датчика, соединенным с пленочной структурой металл-диэлектрик-металл. Кроме того, на одной из крайних крепежных секции расположены датчик Солнца и звездный датчик, соединенные с блоком управления системой, а также модуль стыковки [434\*] (рисунки 5.30-5.33).

Малый космический аппарат (согласно рисункам 5.30-5.33) содержит четыре модуля выдвижных штанг 1, электромагниты 2, расположенные по трем взаимно ортогональным осям, блок управления системой 3, приемо-передающий модуль 4, командную антенну 5, телеметрическую антенну 6, блок развертывания солнечных батарей 7, блок развертки пленочного датчика 8, солнечные батареи 9, датчик Солнца 10, звездный датчик 11, модуль стыковки 12, приемники ионов 13, крепежные секции 14, пленочную структуру металл-диэлектрик-металл 15.

Малый космический аппарат работает следующим образом. В нераскрытом состоянии свернуты солнечные батареи 9 и пленочная структура металл-диэлектрик-металл 15. В свернутом состоянии малый космический аппарат соединен с ракетой с помощью модуля стыковки 12. При отстыковке данного малого космического аппарата происходит подача управляющего сигнала от блока управления системой 3 на блок развертывания солнечных батарей 7. После раскрытия солнечных батарей 9, блок управления системой 3 подает команду на четыре модуля выдвижных штанг 1, которые начинают выдвигаться, увеличивая свою длину, также в это время начинает работать блок развертки пленочного датчика 8, который представляет собой катушку, на которую намотана пленочная структура металл-диэлектрик-металл 15. С помощью электромагнитов 2, датчика Солнца 10, звездного датчика 11 происходит ориентирование малого космического аппарата в космосе. По датчику Солнца 10, звездному датчику 11 в блоке управления системой 3 определяется ориентация космического аппарата в пространстве и блоком управления системой 3 формирует управляющие команды для электромагнитов 2, которые управляются импульсом тока необходимой длительностью и амплитудой. Обмен информацией с наземным пунктом управления космическими аппаратами происходит по двум каналам, командному (по нему посылается команда с наземным пунктом управления космическими аппаратами на космический аппарат) и телеметрическому каналу (по нему происходит передача телеметрической информации с космического аппарата на наземный пункт управления космическими аппаратами). Связь осуществляется с помощью приемо-передающего модуля 4, соединенного с блоком управления системой 3, командной антенной 5 (для передачи команд), телеметрической антенной 6 (для передачи телеметрии). Регистрация микрометеороидов и частиц космического мусора происходит следующим образом. Между пленочной структурой металл-диэлектрик-металл 15 и приемником ионов 13 создается разность напряжения порядка несколько сот вольт, при этом на приемнике ионов 13 находится отрицательный потенциал относительно пленочной структуры металл-диэлектрик-металл 15. Пленочная структура металл-диэлектрик-металл 15 представляет собой конденсаторную структуру, на обкладки которого подано напряжение. При ударе

высокоскоростного микрометеороида или частицы космического мусора по пленочной структуре металл-диэлектрик-металл 15 происходит кратковременное замыкание пленочной структуры металл-диэлектрик-металл, которое регистрируется блоком управления системой 3, а также происходит образование ионов, которые собирает приемник ионов 13. Информация с приемника ионов 13 поступает в блок управления системой 3.

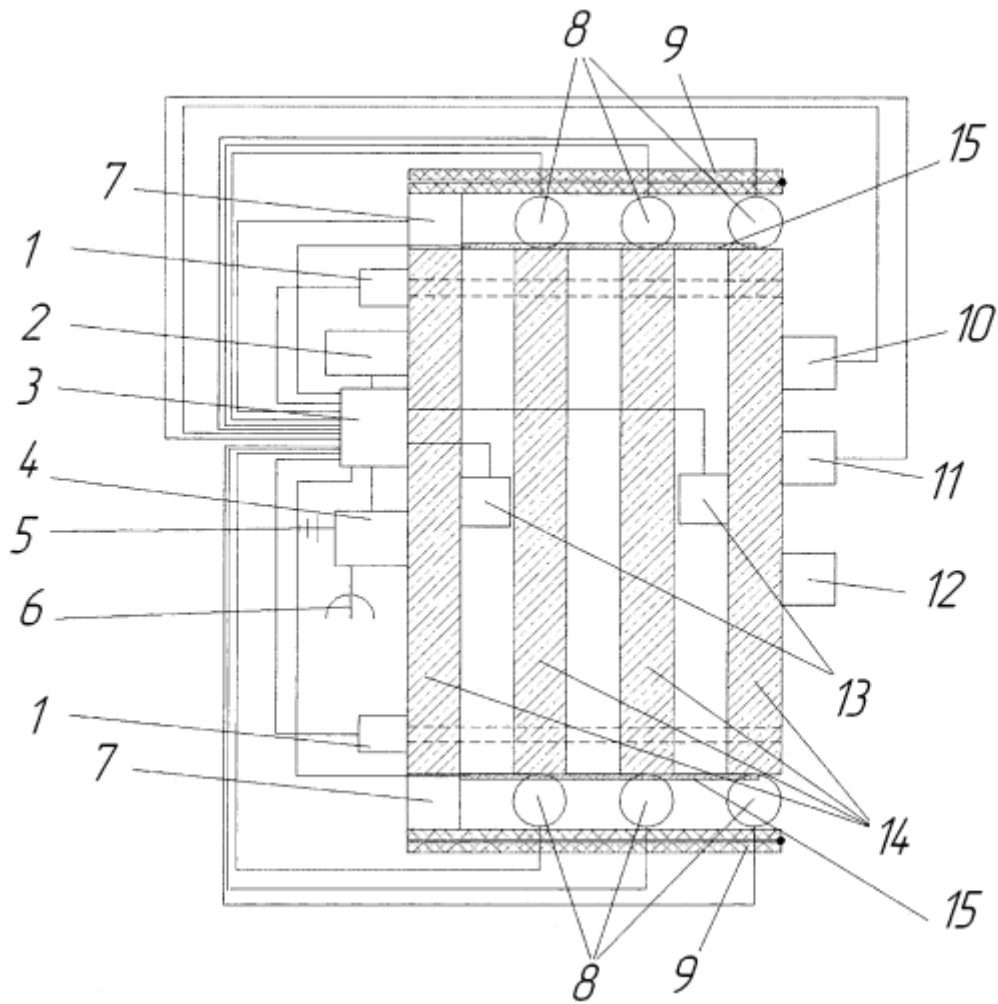


Рисунок 5.30- Схема МКА для регистрации частиц космического мусора и микрометеороидов в нераскрытом состоянии (перед отстыковкой от космического аппарата или ракетносителя) (главный вид)

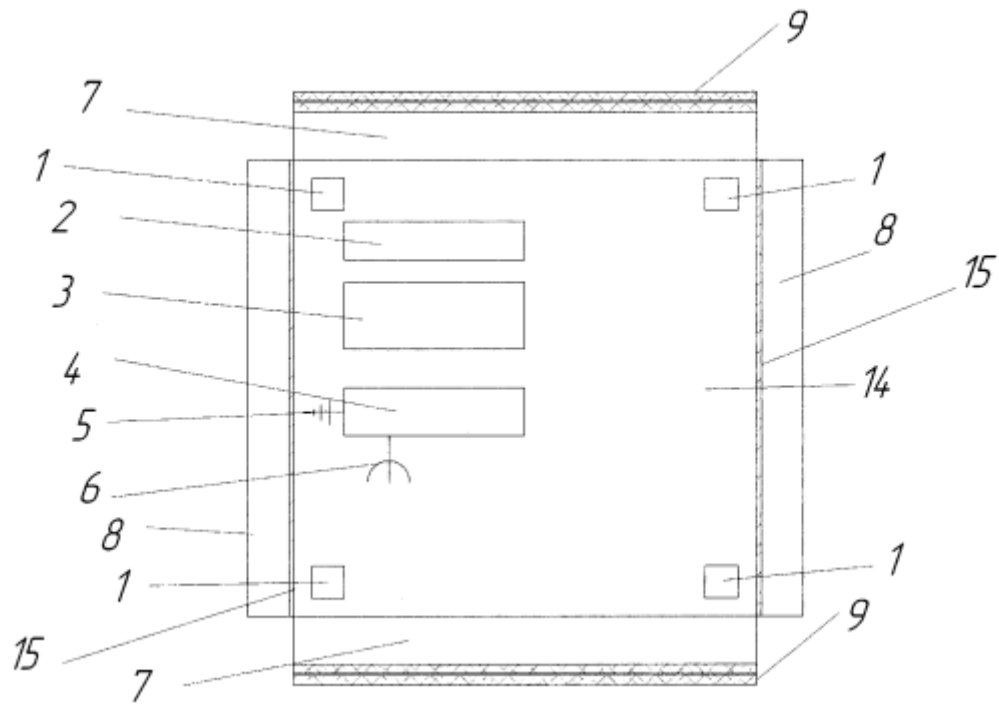


Рисунок 5.31 - Схема МКА для регистрации частиц космического мусора и микрометеороидов в нераскрытом состоянии (перед отстыковкой от космического аппарата или ракетносителя) (вид слева)

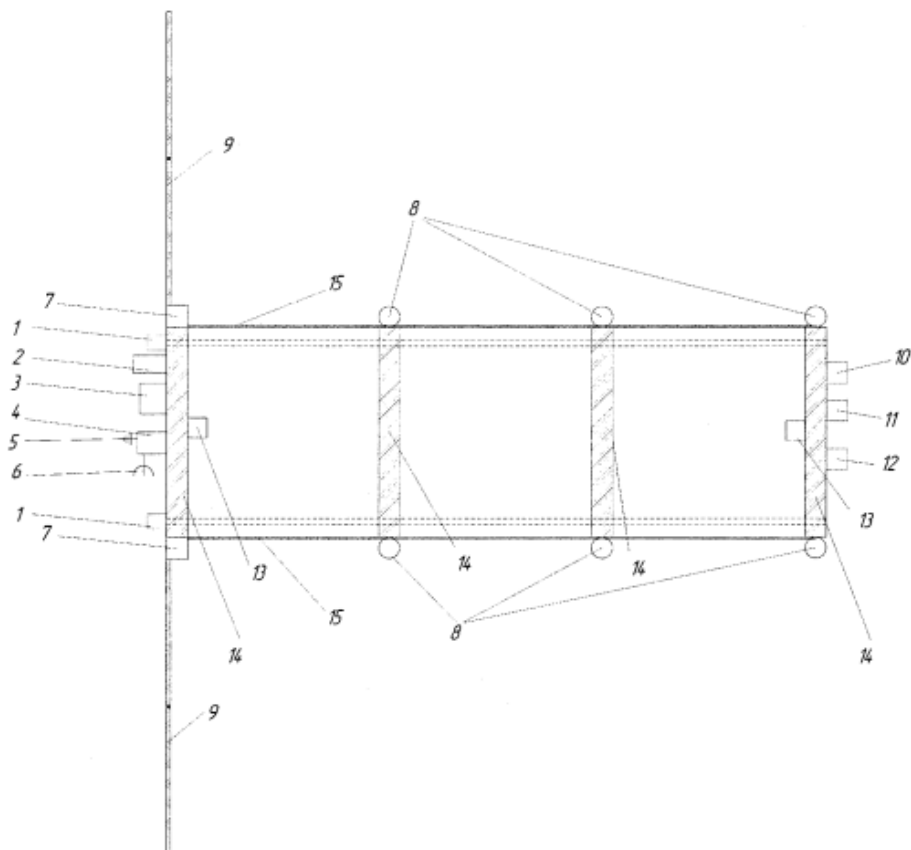
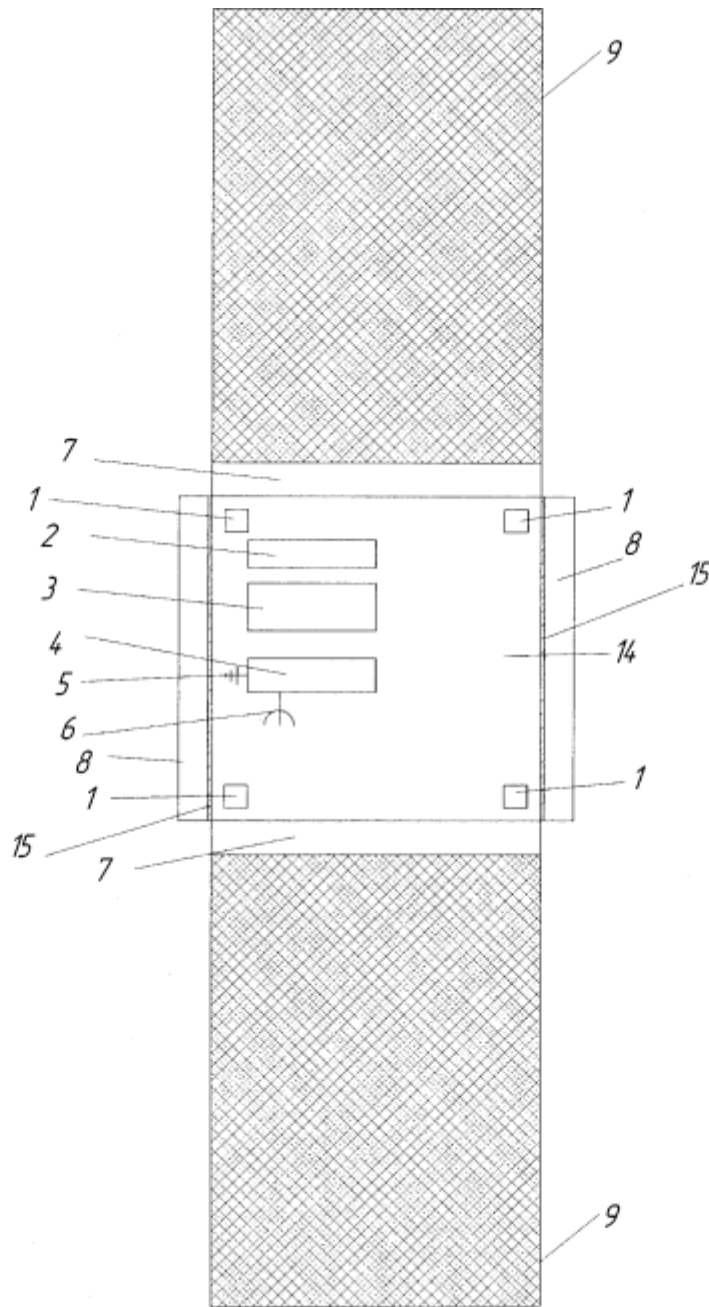


Рисунок 5.32 - Схема МКА в раскрытом состоянии (главный вид)



Фиг.4.

Рисунок 5.33 - Схема МКА в раскрытом состоянии (вид слева)

#### 5.4 Выводы к главе 5

Анализ литературных источников и существующих методов контроля поверхности космических аппаратов показал, что известные способы регистрации ударов высокоскоростных микрочастиц (оптические, акустические, резистивные, термографические) обладают существенными недостатками: оптические методы подвержены паразитной засветке и не позволяют определять заряд частиц; акустические методы с использованием порогового обнаружения имеют низкую

точность определения времени прихода сигнала; резистивные датчики не обеспечивают измерения скорости и заряда частиц. При этом отсутствуют комплексные решения, использующие саму поверхность космического аппарата в качестве чувствительного элемента и позволяющие одновременно регистрировать факт удара, определять его координаты и измерять параметры частиц.

Применение аналитических выражений для связи параметров ионного импульса (фронт, площадь) со скоростью и массой частицы позволило разработать методику бесконтактного измерения параметров микрометеороидов по сигналам с микроканальных пластин.

Разработаны и предложены несколько методик для регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора на основе использования малых космических аппаратов и устройств, использующих комбинированные методы обнаружения: пленочные структуры металл-диэлектрик-металл для регистрации пробоя, приемники ионов для сбора ударной плазмы, пьезодатчики и антенны для измерения вектора скорости. Изготовлена экспериментальная установка в виде массогабаритного макета малого космического аппарата (габариты в раскрытом состоянии  $773 \times 1326 \times 1326$  мм), подтвердивший возможность реализации предложенных технических решений и позволяющий проводить наземную отработку систем регистрации и оценку компоновки расположения приборов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации разработаны методики, экспериментальные установки и бортовые приборы для регистрации параметров микрометеороидов и космического мусора, теоретически и экспериментально обоснованы их работоспособность и эффективность.

Основные полученные результаты:

1. Разработаны методика и экспериментальные установки для регистрации параметров высокоскоростных микрочастиц на основе использования пленочных металлических проводников и частотного анализа, позволяющего определять места разрыва микрополоска. Местоположение разрыва полоска влияет на частоту резонанса (от 4 до 30 МГц) коэффициента передачи этого микрополоска. Методика и предлагаемые конструктивные решения позволяют обойтись без большого количества мультиплексоров и значительно уменьшить массу и габариты датчиков на 10-30% соразмерно сокращению количества микросхем. Математическая модель оценки координат точки соударения построена на основе использования  $T$ - и  $S$ -матриц микрополосковых линий передач. Работоспособность предложенной методики подтверждается серией лабораторных исследований с разработанными и изготовленными двумя типами первичных преобразователей на основе «змейки» и спиральной катушки индуктивности размерами 100 на 100 мм.

2. Разработан и изготовлен прибор «МЕТЕОР», участвовавший в космических экспериментах на малом космическом аппарате «АИСТ-1Т», предназначенный для сбора данных о микрометеороидах и частицах космического мусора в околоземном пространстве с контролем направления их прихода, посредством использования датчика Солнца, а также с возможностью использования адаптивной методики обработки сигналов с датчиков, позволяющая изменять коэффициент усиления канала измерения ионизационного импульса в зависимости от помех, вызванных влиянием засветки от Солнца. Прибор «МЕТЕОР» содержит 6 многопараметрических датчиков, каждый из которых имеет модули для измерения электризации, направления на Солнце и модуль для регистрации высокоскоростных микрочастиц ионизационного типа с электродами в виде нитей. С помощью экспериментальных образцов предложенной аппаратуры, установленной на малом космическом аппарате «АИСТ-1Т», были получены впервые данные комплексного эксперимента на околоземной орбите по исследованию параметров микрометеороидов и частиц космического мусора, электризации, температуры поверхности космического аппарата, освещённости Солнцем. Полученные экспериментальные данные по электризации показывают колебания электрического потенциала космического аппарата в

зависимости от его освещенности и коррелируют с расчетными теоретическими данными других исследователей. Конструкция датчика для измерения электрического потенциала представляла собой коммутируемый конденсатор, одна из обкладок которого была “заземлена”, а вторая обкладка подвергалась воздействию факторами космического пространства. Через определенные промежутки времени по запросу с бортового компьютера происходила коммутация измерительной обкладки с “земляной” обкладкой через резистор, напряжение на котором измерялось с помощью АЦП. В среднем для «АИСТ-1Т» потенциал КА в месте установки датчика составил порядка  $-14\text{В} \div -16\text{В}$ .

3. Разработан, изготовлен и исследован на ускорителе прибор ионизационного типа для измерения высокоскоростных частиц, состоящий из мишени, плоскопараллельных электродов и блока электроники, позволяющий с помощью ионизационного и наведенного импульса производить оценку значений массы и скорости высокоскоростных микрочастиц. На основе использования теоремы Рамо-Шокли предложена методика расчета форм импульса напряжения, наведенного в измерительных электродах датчиков микрометеороидов и частиц космического мусора и вызванного пролетом высокоскоростных заряженных микрочастиц вблизи этих электродов. Методика была использована для расчета влияния наклона пролета микрочастицы при ее движении через электроды в виде пластин на форму выходных импульсов, что позволило объяснить специфические провалы в форме наведенного сигнала в ионизационном датчике высокоскоростных микрочастиц. Впервые были представлены многообразия форм наведенных импульсов, полученных экспериментально на ускорителе микрочастиц, с приемника ионов (плоскопараллельных электродов) при различных местах соударениях высокоскоростных микрочастиц с элементами конструкции детектора (мишенью, электродами). Экспериментальная зависимость длительности пролетного импульса от скорости частицы описывается выражением  $T[\text{мкс}] = 12500 / V[\text{м/с}]$ , график отношения заряда собранных ионов к массе микрочастицы ( $Q/m$ ) в зависимости от скорости этой микрочастицы в диапазоне до 2,5 км/с может быть аппроксимирован зависимостью  $Q / m = C \cdot V^{4,3}$  с коэффициентом детерминации  $R^2 = 0,79$ .

4. Разработан и изготовлен прибор для регистрации высокоскоростных микрочастиц ионизационного типа с повышенной чувствительностью относительно прибора с плоскопараллельной системой электродов за счет использования оригинальных отличительных конструктивных решений: наличие оптического канала синхронизации для устранения ложного срабатывания цифрового компаратора от помех, вызванных схемами управления ускорителя микрочастиц при проведении лабораторных исследований;

одновременная запись сигнала с двумя разными коэффициентами усиления; комбинированная система электродов, позволяющая сохранить большую площадь сбора ионов и при этом снизить входную емкость первичных преобразователей научной аппаратуры на 15-20%, что привело к повышению чувствительности первичного преобразователя не менее чем на 17%. С помощью прибора на электродинамическом ускорителе с разными мишенями были измерены зависимости отношения общего заряд, собранных ионов, к массе микрочастицы  $Q^+ / m = 6 \cdot 10^{-19} \cdot V^{6,08}$  (для мишени из меди),  $Q^+ / m = 1 \cdot 10^{-20} \cdot V^{6,48}$  (для мишени из нержавеющей стали ЭИ878М),  $Q^+ / m = 6 \cdot 10^{-22} \cdot V^{6,75}$  (для мишени из АМГ6). Измерения в диапазоне от 1 до 10 км/с показали, что при более высокой плотности материала мишени наблюдается большая степень ионизации материала мишени и самой микрочастицы в зоне удара.

5. Разработана методика оценки параметров заряженных микрочастиц (массы, вектора скорости и заряда) на основе предложенной конструкции прибора, использующего измерительные проводящие сетки. Проведена оценка зависимости точности измерения заданных параметров микрочастиц от геометрических размеров элементов конструкции прибора (погрешности скорости и отношения заряда микрочастицы к ее массе при скорости до 10 км/с составляет не более 5% при расстоянии между сетками не более 7,5 см и абсолютной погрешности измерения временного интервала  $10^{-7}$ с). Полученные соотношения и графики позволяют оценить габаритные размеры прибора для измерения параметров микрометеороидов в зависимости от заданных погрешностей и диапазона исследуемых параметров. Концепция прибора предполагает его модульность и простоту модификации при различных начальных параметрах микрочастицы для достижения заданной точности измеряемых значений. Был разработан и изготовлен прототип датчика вектора скорости заряженных микрочастиц, состоящего из шести попарно параллельных сеточных электродов. Для предложенного датчика была разработана методика оценки формы наведенного импульса для двух непараллельно расположенных сеточных электродов, которая позволила оценить влияние параметров входной измерительной цепи и компонентов вектора скорости микрочастицы на регистрируемый наведенный импульс, что в перспективе позволит уменьшить массогабаритные характеристики прибора не менее, чем на 8% за счет уменьшения количества измерительных сеток.

6. Для оценки отклонения положения микрочастицы от заданной траектории в электромагнитном ускорителе разработана методика математической обработки данных, поступающих от прибора с модифицированной системой регистрации в виде трех электродов, расположенных на окружности, сосной оси ускорителя микрочастиц.

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили работоспособность разработанной методики для измерения координат микрочастицы относительно оси ускорителя микрочастиц, при этом погрешность измерения возрастает при приближении к оси симметрии датчика, но не превышает 2%. Экспериментальное исследование показало, что распределение микрочастиц по оси тракта ускорителя подчиняется нормальному закону распределения, что согласуется с результатами исследований, проведенных с помощью пленочного резистивного датчика. По сравнению со схемой измерения на основе двух плоскопараллельных конденсаторов появляется дополнительный опорный сигнал, позволяющий снять неопределенность в процессе измерения вблизи оси ускорителя микрочастиц.

7. Впервые разработана конструкция экспериментальной установки в виде макета малого космического аппарата для измерения параметров высокоскоростных частиц в космосе (космического мусора и микрометеороидов), состоящая из пленочной структуры металл-диэлектрик-металл, электромагнитов, расположенных по трем взаимно ортогональным осям, приемника ионов, солнечной батареи, на каждой оси расположен один электромагнит, соединенный с блоком управления электромагнитами, который подключен к блоку управления системой, а также введены блок регистрации, который подключен к пленочной структуре металл-диэлектрик-металл зонтичной конструкции и блоку управления системой, введен блок формирования питания, соединенный с солнечной батареей и блоком управления системой, добавлен приемо-передающий модуль, связанный с командной антенной, телеметрической антенной и блоком управления системой, введен блок развертки пленочного датчика, который соединен с блоком управления системой, к которой подключены шесть солнечных датчиков, расположенных на каждой из граней малого космического аппарата. Был изготовлен и исследован массогабаритный макет такого малого космического аппарата, отличающийся большой площадью регистрирующей поверхности. Габариты МКА с раскрытыми солнечными батареями (СБ)  $773 \times 1326 \times 1326$  мм. Габариты МКА без СБ  $773 \times 410 \times 480$ , площадь регистрируемой поверхности порядка  $1 \text{ м}^2$ .

Все поставленные задачи были выполнены.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь

ГКИ- Галактическое космическое излучение

КА-космический аппарат

КМ –космический мусор

МДМ - металл-диэлектрик-металл

МДП - металл-диэлектрик-полупроводник

МКА – малый космический аппарат

ОКП - околоземное космическое пространство

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yano, H. Japanese contribution to in-situ meteoroid and debris measurement in the near Earth space / H. Yano // *Earth Planets Space*. – 1999. – Vol. 51. – P. 1233-1246.
2. Семкин, Н. Д. Регистрация пылевых и газовых частиц в лабораторных и космических условиях / Н. Д. Семкин. – Самара: Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет), 2005. – 467 с.
3. The Impact of the Space Environment on Space Systems / H. C. Koons, J. E. Mazur, R. S. Selesnick et al. // *6th spacecraft Charging Technology Conference*. – 2000. – 1 september.
4. Дмитриук, С. В. Космический мусор: прикладные аспекты угрозы / С. В. Дмитриук // *Воздушно-космическая сфера*. – 2019. – № 2 (99). – С. 56-59.
- 5.\* Телегин, А. М. Детекторы микрометеороидов и частиц космического мусора / **А.М. Телегин** // *Авиакосмическое приборостроение*. – 2016. – № 1. – С. 32-42.
6. Microwave simulation experiments on regolith (lunar dust) deposition on stainless steel / N. N. Skvortsova, V. D. Stepakhin, D. V. Malakhov [et al.] // *Materials*. – 2021. – Т. 14. – № 21.
- 7.\* Калаев, М.П. Исследование изменения характеристик солнечных батарей при воздействии факторов космического пространства / Калаев М.П., Родина А.В., **Телегин А.М.** // *Приборы и техника эксперимента*. — 2022. — № 6. — С. 99-105.
8. Durin, C. In-Situ Detection of Meteoroids and Orbital Debris / C. Durin, J. C. Mandeville, J. M. Perrin // *Advances in Space Research*. – 2022. – Vol. 69, Iss. 10. – P. 3856-3863.
9. Fukushige, S. Development of perforation hole detection system for space debris impact/ S. Fukushige, Y. Akahoshi [et al.] // *International Journal of Impact Engineering*. – 2006. – No. 33. – P. 273.
10. Батанов, А. Ф. Космический мусор и невесомость / А. Ф. Батанов, Ю. А. Хаханов // *Идеи К.Э. Циолковского в теориях освоения космоса : Материалы 58-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского, Калуга, 19–21 сентября 2023 года*. – Калуга: ИП Стрельцов И.А., 2023. – С. 109-112.
11. Усовик, И.В. Разработка системы мониторинга некаталогизируемого космического мусора/ И.В.Усовик, А.А. Морозов // *Вестник Московского авиационного института*. -2023. - Т. 30, № 4. - С. 202-209.
- 12.\* Семкин, Н.Д. Моделирование воздействия потока высокоскоростных частиц на материалы и элементы конструкции космического аппарата / Н.Д. Семкин, М.П. Калаев, **А.М. Телегин** // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*

имени академика С.П.Королева (национального исследовательского университета). -2011. № 7(31). -С. 9-15.

13.\* Семкин, Н.Д. Многослойные пленочные структуры в условиях воздействия микрометеороидов и частиц космического мусора / Семкин Н.Д., Калаев М.П., Телегин А.М., Пияков А.В., Родин Д.В. // Прикладная физика. — 2012. —№ 2. — С. 104-115.

14. Мазжорин, Д. А. Космос и экология / Мазжорин Д. А., Чекалин С. В. // Сб. "Проблемы космического мусора". — М.: Знание, 1991. С.9-15.

15. Пыль в атмосфере и околоземном космическом пространстве / под ред. Н. Б. Дивари. – М.: Наука, 1973. – 165 с.

16. Масевич, А. Г. Столкновение в околоземном пространстве (космический мусор) / А. Г. Масевич // Космоинформ : сб. – М., 1995.

17. Дикки, Н. Р. Определение характерной массы фрагментов космического мусора, обращающихся по низким околоземным орбитам / Н. Р. Дикки, Р. Д. Калп // Аэрокосмическая техника. – 1990. – № 19. – С. 51.

18. Population Model of Small Size Space Debris. – Darmstadt: IFRR-TUBS, 1993.

19. Лебединец В. П. Аэрозоль в верхней атмосфере и космическая пыль. — Л.: ИЭМ, 1981.

20. Fluri, W. ESA space debris research activities / W. Fluri // Earth Space Review. – 1995. – Vol. 4, № 3.

21. Фадеенко, Н. Н. Высокоскоростной удар. Библиографический указатель отечественной и иностранной литературы. – Новосибирск: Изд-во Ин-та гидродинамики, СО АН СССР, 1967. – Вып. 3; 1979. – Вып. 4.

22. Николаевский, В. Н. Высокоскоростные ударные явления. – М.: Мир, 1973. – 533с.

23. Мержиевский, Л. А. Высокоскоростное метание твердых тел/ Л. А. Мержиевский, В. Н. Титов, Ю. И. Фадеенко, Г. А. Швецов // Физика горения и взрыва. – 1987. – Т. 23, № 5. – С. 77-91.

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

25. Манзон, Б. М. Ускорение макрочастиц для управляемого термоядерного синтеза / Б. М. Манзон // УФН. – 1981. – Т. 134, вып. 4. – С. 611.

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

27. Швецов, Г. А. Рельсотронные ускорители макрочастиц. Ч. 2. Общие характеристики / Г. А. Швецов, В. М. Титов, А. Г. Анисимов и др. : докл. на IV Междунар. конф. по генерации мегагаусных магнитных полей и родственным экспериментам. – США. Санта-Фе. 14-17 июля 1986.
28. Семкин, Н. Д. Инжектор заряженных пылевых частиц / Н. Д. Семкин, А. В. Пияков, К. Е. Воронов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – № 3. – С. 154-159.
29. Bednyakov, A. A. Injection, beam forming, and parameter control of solid microparticles accelerated in the EG-8 electrostatic generator / A. A. Bednyakov, R. A. Gilyarov, O. B. Dzagurov [et al.] // Pribory i Tekhnika Eksperimenta. – 1998. – Vol. 41, No. 2. – P. 149-156.
30. Slattery, J. C. A Linear Accelerator for Simulated Micrometeors / J. C. Slattery, D. G. Becker, V. Hamermesh // Rev. Sci. Instrum. -1973. -V. 44. -No. 6. -P. 755-762.
31. Семкин, Н. Д. Линейный ускоритель для моделирования микрометеоритов / Н. Д. Семкин, А. В. Пияков, К. Е. Воронов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2007. – № 2. – С. 140-147.
32. Ускоритель высокоскоростных твердых частиц: пат. 2205525 Рос. Федерация / Н. Д. Семкин, А. В. Пияков, К. Е. Воронов, Р. А. Помельников. – № 2001121376/06 ; заявл. 30.07.2001 ; опубл. 27.05.2003.
33. Семкин, Н. Д. Имитатор космической пылевой плазмы/ Н. Д. Семкин, А. В. Пияков, К. Е. Воронов // Авиакосмическое приборостроение. - 2003.- № 7. -С. 24.
34. Семкин, Н. Д. Имитация микрометеоритов с помощью электродинамического ускорителя/ Н. Д. Семкин, К. Е. Воронов, А. В. Пияков, И. В. Пияков // ПТЭ. -2009. - №4. - С. 159-165.
35. Ostashev, V. E. Causes of limitation of the macroscopic bodies acceleration rate in a magnetoplasma accelerator / V. E. Ostashev, E. F. Lebedev, V. E. Fortov // Teplofizika vysokikh temperatur. – 1993. – Vol. 31, No. 2. – P. 313-320.
36. Новиков, С. А. Установки взрывного типа для механических испытаний материалов и конструкций (обзор) / С. А. Новиков, В. А. Петров. – М.: ЦНИИ атоминформ, 1989.
37. Забабахин, Е. И. Некоторые вопросы газодинамики взрыва. — Снежинск, ВНИИ ТФ, 1997.
38. Бурцев, В. А. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках / В. А. Бурцев, Н. В. Калинин, А. В. Лучинский. – М.: Энергоатомиздат, 1990.



[http://www.lpi.usra.edu/decadal/sbag/topical\\_wp/GruenEberhardFINAL.pdf](http://www.lpi.usra.edu/decadal/sbag/topical_wp/GruenEberhardFINAL.pdf) (дата обращения: 01.12.2023).

52 Wang, W. High-Speed Micro-Particle Motion Monitoring Based on Continuous Single-Frame Multi-Exposure Technology/ Wang, W.; Xue, W.; Wu, S.; Mu, Z.; Yi, J.; Tang, A.J. //Materials. - 2022. –vol. 15. - 3871.

53. Dongsheng, J. The Study of Space Debris and Meteoroid Impact Effects on Spacecraft Solar Array / J. Dongsheng, Z. Pei, Z. Yi // Protection of Materials and Structures from the Space Environment / ed. J. Kleiman. – Springer International Publishing AG, 2017. – (Astrophysics and Space Science Proceedings ; vol. 47). – DOI 10.1007/978-3-319-19309-0\_34.

54. Овчинников, В. И. Влияние воздействия высокоскоростных потоков микрочастиц на материалы / В. И. Овчинников, А. Ф. Ильющенко, Л. В. Судник // Перспективные материалы и технологии : монография : в 2 т. / под ред. В. В. Клубовича. – Витебск, 2017.

55.\* Бонячук, А.А. Моделирование распределения микрочастиц в околоземном пространстве/ А.А. Бонячук, **А.М. Телегин** // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. — 2017. — С. 25-27.

56.\* Семкин, Н.Д. Космическое пространство и его влияние на элементы конструкций космических аппаратов: электронное методическое пособие к практическим работам / Семкин Н.Д., Телегин А.М., Калаев М.П. – Самара: СГАУ, 2013 – 46с.

57. Вениаминов, С. С. Космический мусор — угроза человечеству / С. С. Вениаминов, А. М. Червонов. – М.: ИКИ РАН, 2012. – 192 с.

58. Куклина, Е. А. Исследование последствий воздействия микрометеорита на герметичный космический аппарат / Е. А. Куклина. – Махачкала: Научно-издательский центр "Апробация", 2016. – 220 с.

59. Шустов, Б. М. О фундаментальных исследованиях по проблеме космического мусора / Б. М. Шустов // Космический мусор: фундаментальные и практические аспекты угрозы / под ред. Л. М. Зеленого, Б. М. Шустова. – 2019. – С. 7-14. – (Серия "Механика, управление и информатика").

60. ГОСТ 25645.128-85. Вещество метеорное. Модель пространственного распределения. -М.: Издательство стандартов, 1985. - 24 с.

61. ГОСТ 25645.167-2005. Космическая среда (естественная и искусственная). Модель пространственновременного распределения плотности потоков техногенного вещества в космическом пространстве. -М.: Стандартиформ, 2005. - 36 с

62. Миронов, В.В. Модели метеороидной среды в околоземном космическом пространстве и определение плотности потока метеороидов/ В.В.Миронов, М.А. Толкач // Космическая техника и технологии. – 2017. -№2(17). - Р.49-62.

63. Ключников, В. Ю. Современное состояние фундаментальных и прикладных исследований проблемы космического мусора / В. Ю. Ключников, С. А. Клементьев // Инноватика и экспертиза. – 2023. – Вып. 2 (36). – С. 122-130.

64. ГОСТ Р 25645.167–2022. Космическая среда (естественная и искусственная). Модель пространственно-временного распределения плотности потоков техногенного вещества в околоземном космическом пространстве. – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 114 с.

65. Колпаков, В. И. Анализ пространственно-временного распределения плотности потоков техногенного вещества в околоземном космическом пространстве / В. И. Колпаков, Т. В. Васильева, А. А. Пасынков [и др.] // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2023. – № 2(134).

66. Усовик, И. В. Разработка системы мониторинга некаталогизируемого космического мусора / И. В. Усовик, А. А. Морозов // Вестник Московского авиационного института. – 2023. – Т. 30, № 4. – С. 202-209.

67. Неплюев, В. Е. Развитие модели техногенного засорения околоземного космического пространства / В. Е. Неплюев, Д. В. Степанов, И. В. Усовик // Космонавтика и ракетостроение. – 2023. – № 4(133). – С. 54-66.

68. Усовик, И. В. Разработка методов и алгоритмов моделирования потоков космического мусора и метеороидов для решения прикладных задач ограничения техногенного засорения околоземного космического пространства: специальность 2.3.1 Системный анализ, управление и обработка информации, статистика : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Усовик Игорь Вячеславович. – Москва, 2024. – 213 с.

69. Миронов, В. В. Скорость и распределение скорости метеороидов и частиц космического мусора в околоземном космическом пространстве / В. В. Миронов, М. А. Толкач // Космическая техника и технологии. – 2022. – № 1(36). – Р. 125-143.

70. Rodmann, J. Micrometeoroid Impact Risk Assessment for Interplanetary Missions / J. Rodmann, A. Miller, M. Traud, K. D. Bunte, M. Millinger // Proc. 8th European Conference on Space Debris (virtual), Darmstadt, Germany, 20–23 April 2021 / ed. T. Flohrer, S. Lemmens, F. Schmitz. – Darmstadt: ESA Space Debris Office, 2021.

71. Герасимов, С.И. Индукционный датчик для запуска регистрирующей аппаратуры/Герасимов С.И., Зубанков А.В. //ПТЭ - 2019. -№ 3. -С. 38-40.

72. Леус, Н. А. К вопросу развития систем мониторинга космического пространства с целью обеспечения безопасности и устойчивого развития космической деятельности/ Н. А. Леус, Д.Ю.Макарова // Экономика космоса. -2023. - №3(5). - С.3-18.

73.\* Воронов, К.Е. Физические эффекты при высокоскоростном соударении микрометеороидов и частиц космического мусора с поверхностью космического аппарата /Воронов К.Е., Телегин А.М., Пияков А.В., Рязанов Д.М. // Успехи прикладной физики. — 2020. — Т. 8. № 1. — С. 3-20.

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

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

76. Белоус, А. И. Космическая электроника. В 2 кн. / А. И. Белоус, В. А. Солодуха, С. В. Шведов. – М.: Техносфера, 2015.

77. Оголев, А.В. Анализ засорённости околоземного космического пространства объектами техногенного происхождения и их влияние на функционирование космических аппаратов/А.В. Оголев, С.В. Морозов// Тезисы Всероссийской конференции с международным участием «Космический мусор: фундаментальные и практические угрозы». -2019. -С. 15-19.

78. Новиков Л.С. Основы экологии космического пространства. Учебное пособие. – М.: Университетская книга, 2006. - 116 с.

79. Drolshagen, G. Impact effects from small size meteoroids and space debris/ G. Drolshagen // Advances in Space Research. 2008. -Vol. 41.-No. 7. -P. 1123-1131.

80. Grün, E. Collisional balance of the meteoritic complex/ E.Grün, H.A. Zook, H.Fechtig, R.H. Giese // Icarus. - 1985. -Vol. 62. -P. 244-272.

81. Divine, N. Charged particle distributions in Jupiter's magnetosphere / N. Divine // Journal of Geophysical Research: Planets. – 1993. – Vol. 98, No. E9. – P. 17029.

82. Staubch, P. The meteoroid environment near Earth / P. Staubch, E. Grün, R. Jehn // Advances in Space Research. – 1996. – Vol. 19, No. 2. – P. 301-308.

83. Kessler, D. J. Space Station Program Natural Environment Definition for Design, International Space Station Alpha / D. J. Kessler. – Huston: NASA SSP 30425, Revision B, 1994.

84. Dikarev, V. The new ESA meteoroid model / V.Dikarev, E.Grün, J.Baggaley, D.Galligan, M.Landgraf, R.Jehn // Advances in Space Research. 2005. -Vol. 35.-No. 7. -P. 1282.

85. Jones, J. Meteoroid engineering model—final report / J. Jones. – MSFC, Alabama: NASA/MSFC internal report SEE/CR-2004-400, 2004.

86. Назаренко, А. И. Моделирование космического мусора. – М.: ИКИ РАН, 2013. – 216 с. – (Серия «Механика, управление и информатика»).
87. ISO 14200:2012. Space systems and operations - Space environment (natural and artificial) — Guide to process-based implementation of meteoroid and debris environmental models (orbital altitudes below GEO + 2 000 km). – 2012.
88. Bauera, W. Development of in-situ Space Debris Detector / W.Bauera, O.Romberg, C.Wiedemann, G.Drolshagen, P. Vörsmann // *Advances in Space Research*. - 2014. -Vol. 54. -No. 9. -P. 1858-1869.
89. Sykes, M. The interplanetary dust complex and comets / M. Sykes, E. Grün, W. Reach, P. Jenniskens // *Comets II*. – Tucson: The University of Arizona Press, 2004.
90. Katayama, M. An Experimental Study to Investigate Hypervelocity Impacts on Pressure Vessels/ М.Катайма, Т.А.кеба, S. Toda, S. Kibe // *Proc. of the 2nd Europ. Conf. on Space Debris (ESA SP-393)*, ESOC, Darmstadt, Germany. – Neuilly-sur-Seine: ESA Publ. div, 1997. -P. 411.
91. Анисимов, С.И. Сверхскоростной удар и противометеорная защита в проекте Вега / С.И. Анисимов, В.М. Ковтуненко, Р.С. Кремнев, Ю.А. Осиньян, Р.З. Сагдеев, В.Е. Фортов, А.Е. Шейндлин // *Успехи механики*. — 1986. — Т. 9. — № 3. — С. 3—50.
92. Shu, T. L. Hazard of Hypervelocity Impacts on Spacecraft / T. L. Shu, E. Murad // *Journal of spacecraft and rockets*. – 2002. – Vol. 39, № 1. – P. 106-114.
93. Horanyi, M. Charged dust dynamics in the solar system / M. Horanyi // *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* – 1996. – P. 383-418.
94. Auer, S. Characteristics of a dust trajectory sensor/ S. Auer, E. Grün, S. Kempf [et al.]// *Review of scientific instruments*. – 2008. – Vol. 79. – Art. № 084501. – DOI 10.1063/1.2960566.
95. Xie, J. Laboratory testing and data analysis of the Electrostatic Lunar Dust Analyzer (ELDA) instrument/ J. Xie, Z. Sternovsky, S Auerd, K. Drake, E.Grun, M. Horanyi, H.Le, R. Srama// *Planetary and Space Science*. -2013. - Vol.89. - P. 63–70.
96. Auer, S. Imaging by dust rays: a dust ray camera / S. Auer // *Optica Acta*. – 1982. – Vol. 29, № 10. – P. 1421-1426.
97. Auer, S. The charge and velocity detector of the cosmic dust analyzer on Cassini/ S. Auer, E.Grun, R. Srama, S. Kemp, R. Auera// *Planetary and Space Science*. – 2002. - Vol.50. - P.773 – 779.
98. Герштейн, Г. М. Моделирование полей методом электростатической индукции / Г. М. Герштейн. – М.: Наука, 1970. – 341 с.
99. Shockley, W. Currents to Conductors Induced by a Moving Point Charge/ Shockley W.// *J. Appl. Phys.* - 1938.- Vol. 9. - P. 635 – 636.

100. Фельд Я.Н. Наведение токов движущимися зарядами/ Фельд Я.Н. // Докл. АН СССР. – 1953. – Т. 93. – №3 – С. 447–450.
- 101.\* **Телегин, А.М.** Исследование работы индукционного датчика для ускорителя заряженных микрочастиц /**Телегин А.М.**, Пияков А.В. // Приборы и техника эксперимента. — 2017. — № 6. — С. 101-106.
- 102.\* **Телегин А.М.** Детектор высокоскоростных микрочастиц на основе ионизационного принципа измерения /**Телегин А.М.** // Успехи прикладной физики. — 2016. — Т. 4, № 6. — С. 618-625.
103. Li, Y. Instrument concept of a single channel dust trajectory detector / Y. Li, S. Kempf, J. Simolka [et al.] // Advances in Space Research. – 2017. – Vol. 59. – P. 1636-1641.
104. Минеев, В.И. Э.Д.С., возникающая при ударном сжатии вещества// В.И.Минеев, А.Г.Иванов/ Успехи физических наук. - 1976. -Том 119, вып.5. - С. 75—109.
105. Caffyn, J.E. Electrical effects produced by plastic deformation in sodium chloride crystals / J.E. Caffyn, T.L. Goodfellow // Philosophical Magazine.- 1962. -Vol. 7.,No. 80. -P.1257-1262.
106. Fischbach, D.B. Some transient electrical effects of plastic deformation in NaCl crystals/ D.B.Fischbach, A.S. Nowick // Journal of Physics and Chemistry of Solids. -1958. -Vol. 5. No. 4. -P. 302-315.
107. Урусовская, А.А. Электрические эффекты, связанные с пластической деформацией ионных кристаллов/ А.А. Урусовская // УФН. -1968.- Т. 96, № 1. -С. 38-60.
108. Держиев, В.И. Роль материала анода в заполнении плазмой межэлектродного промежутка при инициировании пробоя в вакууме / Держиев В.И., Либих Ф., Рамендик Г.И., Васюта Ю.В. // ЖТФ. -1981. - Т.51, вып.4. -С.719-725.
109. Neukum, G. Untersuchungen des projektilmaterials in mikrokratern. Diplomarbeit. – Heidelberg: Universität Heidelberg, 1969.
110. Леонтьев, Л. В. Некоторые особенности формы кратеров, образованных высокоскоростными частицами в полубесконечной преграде / Л. В. Леонтьев, А. В. Тарасов, И. А. Терешкин // Космические исследования. – 1971. – Т. 5, № 9. – 796 с.
111. Сагомоян, А.Я. Проникание (проникание твёрдых тел в сжимаемые сплошные среды).–М.: Изд-во. МГУ, 1974.
112. Housen, K. R. Crater Ejecta Scaling Laws' Fundamental Forms Based on Dimensional Analysis / K. R. Housen, R. M. Schmidt // Journal of geophysical research. – 1983. – Vol. 88, No. B3. – P. 2485-2499.

113. Berthoud, L. Empirical impact equations and marginal perforation / L. Berthoud, J.-C. Mandeville // Proc. First Europ. Conf. Space Debris, Darmstadt, Germany. 5–7 April 1993. – ESASD-01. – pp. 459-464.
114. Nogamia, K. Development of the Mercury dust monitor (MDM) onboard the BepiColombo mission/ Nogamia K. et al. // Planetary and Space Science. – 2010. – № 58. – Pp. 108-115.
115. Kobayashi, M. Mercury Dust Monitor for the BepiColombo MMO / M. Kobayashi, H. Shibata, K. Nogami [et al.] // International Workshop on Instrumentation for Planetary Missions, Greenbelt, Maryland, D.C., USA, 2012 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.lpi.usra.edu/lpi/contribution\\_docs/LPI-001683.pdf](https://www.lpi.usra.edu/lpi/contribution_docs/LPI-001683.pdf) (дата обращения: 11.11.2019).
116. Mochizuki, H. Development of a signal processing circuit of the micrometeoroid impact sensor within a multilayered insulation (CLOTH) on the exterior of the 6U spacecraft EQUULEUS / H. Mochizuki, T. Hirai, R. Jitsukawa [et al.] // 12th Low-Cost Planetary Missions Conference, Pasadena, CA, USA, 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lcpm12.org/wp-content/uploads/2017/08/1735-1755-Mochizuki.pdf> (дата обращения: 05.11.2019).
117. Friichtenicht, J. F. Ionisation associated with hypervelocity impact / J. F. Friichtenicht, J. C. Slattery. – California: Space Technology Laboratories, 1963. – (NASA technical note NASA TN D-2091).
118. Ju, Y. Theoretical model for plasma expansion generated by hypervelocity impact/ Y.Ju, Zhang Q., D.Zhang, R.Long, L.Chen, F Huang., Z.Gong // Physics of plasmas.- 2014. -Vol. 21. -No. 092112.
119. Senger, R. Data Handling and Evaluation for Autonomous Experiments in Interplanetary missions. Doktor Ingenieurs genehmigten Dissertation. – München: Technische Universität München, 2007.
120. McBride, N., Meteoroid impacts on spacecraft:: sporadics, streams, and the 1999 Leonids/ N.McBride, J.A.M. McDonnell // Planetary and Space Science. -1999. -Vol. 47, No. 8–9. -P. 1005.
121. Hoffmann, H.J. Entwicklung eines Detektors zur Massen und Geschwindigkeitsanalyse von kosmischen Staubteilchen. Thesis. – Heidelberg: Universität Heidelberg, 1971.
122. Dietzel, H. Micrometeoroid simulation studies on metal targets/ H.Dietzel, G.Neukum, P.Rauser // J. Geophys. Res. -1972. -Vol. 77, No.8. -P. 1375.
123. Svedhem, H. Behaviour of ejecta particles and generated plasma at hypervelocity impacts / H. Svedhem, A. Pedersen // Hypervelocity Impacts in Space. – Canterbury: University of Kent, 1992.

124. Dalmann, B.K. The ion-composition of the plasma produced by impacts of fast dust particles/ B.K.Dalmann, E.Grün, J.Kissel, H.Dietzel // Planet. Space Sci. -1977. -Vol. 25, No. 2.- P. 135.

125.\* Семкин, Н.Д. Разлет ударной плазмы в ускоряющем электростатическом поле плоского конденсатора времяпролетного масс-спектрометра / Семкин Н.Д., Помельников Р.А., Телегин А.М. // Журнал технической физики. — 2014. — Т. 84, вып.5.-С.35-40.

126. Harano, T. Preliminary study on sustained arc due to plasma excited by hypervelocity impact of space debris on the solar array coupon/ T.Harano, Y.Machida, S.Fukushige, T.Koura, S.Hosoda, M.Cho, Y.Akahoshi // International Journal of Impact Engineering. - 2006. - Vol. 33, No. 1–12. - P. 326-334.

127. Nadiradze, A.B. Meteoroid and technogenic particle impact on spacecraft solar panels/ A.B.Nadiradze, M.P.Kalaev, N.D. Semkin // Cosmic Research. - 2016. -Vol. 54, No. 5. - P. 366-374.

128. Crawford, D. A. The production and evolution of impact-generated magnetic fields/ D. A.Crawford, P. H. Schultz// International Journal of Impact Engineering. -1993. -Vol. 14, No. 1–4. - P. 205–216.

129. Ratcliff, P.R. Experimental Measurements Of Hypervelocity Impact Plasma Yield And Energetics / Paul R. Ratcliff, Mark J. Burchell, Mike J. Cole, Tom W. Murphy, Firooz Allahdadi // International Journal of Impact Engineering. – 1997. – № 20. – С. 663-674.

130. DeLuca, M. The ionization efficiency of aluminum and iron at meteoric velocities / M.DeLuca, T.Munsat, E.Thomas, Z. Sternovsky // Planetary and Space Science. -2018. -Vol. 156.- P.111-116.

131. Thomas, E. Measurements of the ionization coefficient of simulated iron micrometeoroids / E. Thomas, M. Horányi, D. Janches [et al.] // Geophysical Research Letters. – 2016. – Vol. 43, No. 8. – P. 3645.

132. Collette, A. Micrometeoroid impact charge yield for common spacecraft materials / A. Collette, E. Grün, D. Malaspina, Z. Sternovsky // Journal of Geophysical Research: Space Physics. – 2014. – Vol. 119, No. 8. – P. 6019.

133. Willis, M. J. Influence of impact ionisation detection methods on determination of dust particle flux in space / M. J. Willis, M. J. Burchell, M. J. Cole, J. A. M. McDonnell // Planet. Space Sci. – 2004. – Vol. 52, No. 8. – P. 711-725.

134. Theory and experiments characterizing hypervelocity impact plasmas on biased spacecraft materials/Lee N., Close S., Goel A., Lauben D., Linscott I., Johnson T., Strauss D., Bugiel S., Mocker A., Srama R. // Physics of Plasmas. -2013. -Vol. 20. No. 3. -032901.

135. Goel, A. Estimation of hypervelocity impact parameters from measurements of optical flash/ A. Goel, N.Lee, S.Close // *International Journal of Impact Engineering*. -2015. -Vol. 84. No. 2509. -P.54-63.
136. Burchell, M. J. Light Flash and Ionization from Hypervelocity Impacts on Ice / M. J.Burchell, M.J.Cole, P. R. Ratcliff // *Icarus*. - 1996. -Vol. 122., No.2. -P. 359-365.
137. Eichhorn, G. Measurements Of The Light Flash Produced By High Velocity Par-ticle Impact / G. Eichhorn // *Planetary and Space Journal*. - 1975. - № 23. - С. 1519-1525.
138. Analysis of the hypervelocity impact process from impact flash measurements/Eichhorn G. // *Planetary and Space Science*. -1976. -Vol. 24. No. 8. -P. 771-781.
- 139.\* Семкин, Н.Д. Ударные эксперименты с многопараметрическим детектором микрометеороидов /Семкин Н.Д., Телегин А.М.// *Приборы и техника эксперимента*. — 2017. — № 1. — С. 124-127.
140. Fletcher, A. Model of plasma dynamics and electromagnetic pulses associated with hypervelocity particle impacts on satellites/ A.Fletcher, S.Close / *Proceedings of the 30th URSI General Assembly and Scientific Symposium (Istanbul, 2011)*.-P. 3077-3079.
141. Baird, J.K. Velocity dependence of impact fluorescence/ J.K.Baird, G.R.Hough, T.R. King // *International Journal of Impact Engineering*. 1997. Vol. 19. No. 3. P. 273-276.
142. Verreault, J. Emission Spectroscopy of Hypervelocity Impacts on Aluminum, Organic and High-Explosive Targets/V J.erreault, J.P.R.Daya, W.H.C.Halswijka, J.Loiseaub, J.Huneault, A.J.Higgins, A.D. Devir // *Procedia Engineering*. -2015.- Vol 103.-P. 618.
143. Lawrence, R. J. Particle launch to 19km/s for micro-meteoroid simulation using enhanced three-stage light gas gun hypervelocity launcher techniques / R. J. Lawrence, W. D. Reinhart, L. C. Chhabildas, T. F. Thornhill // *International Journal of Impact Engineering*. – 2006. – Vol. 33, No. 1. – P. 799-811.
144. Serna, P.J. Data Report of Hypervelocity Micro–Particle Impact Light Flash Data and MOS Impact Detector Output. – New Mexico: Phillips Laboratory, 1995.
145. Tsembelis, K. Hypervelocity impact induced light flash experiments on single and dual layer Kapton targets to develop a time of flight space dust and debris detector/ K.Tsembelis, M.J.Burchell, M.J.Cole, N. Margaritis // *International Journal of Impact Engineering*. -2008. -Vol. 35, No. 11.- P. 1368.
146. Maki, K. Dependence of microwave emissions from hypervelocity impacts on the target material / K. Maki, E. Soma, T. Takano [et al.] // *Journal of Applied Physics*. – 2005. – Vol. 97, No. 10. – 104911.
147. Kelley, M. C. *Advances in Space Research* / M. C. Kelley, S. Pancoast, S. Close, Zh. Wang. – 2012. – Vol. 49, No. 6. – P. 1029.

148. Lesceux, J.M. Electric dipole antennae used as micrometeoroid detectors/ J.M. Lesceux, J.Lemaire, N. Meyer–Vernet // *Planetary and Space Science*. -1989. -Vol. 37, No. 10.- P. 1291.
149. Rudolph, M. Review of Radio Frequency Emission from Hypervelocity Impact Plasmas / M. Rudolph // *Procedia Engineering*. – 2013. – Vol. 58. – P. 409-417.
150. Close, S. Electromagnetic pulses generated by meteoroid impacts on spacecraft/ S. Close, P. Colestock, L. Cox, M. Kelley, N. Lee // *Journal of geophysical research: space physics*. -2010. -Vol. 115, No. 12. -A12328.
151. Kobuscha, M. Microcalorimeter array for the measurement of kinetic energies of small particles in space / M. Kobuscha and other. // *Thermochimica Acta*. – 2009. - №492. - P.89–94.
152. Зельдович, Я. Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. – М.: Наука, 1966.
153. Фортов, В. Е. Физика неидеальной плазмы : учеб. пособие / В. Е. Фортов, А. Г. Храпак, И. Т. Якубов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.
- 154.\* Семкин, Н. Д. Детекторы физико-химических характеристик микрометеороидов на основе пленочных МДМ-структур / Н. Д. Семкин, А. М. Телегин // *Перспективные материалы*. – 2011. – № 3. – С. 22-28.
155. Ударно-сжатые пленочные структуры металл-диэлектрик-металл при высокоскоростном соударении микрометеороидных и техногенных частиц / Н. Д. Семкин, К. Е. Воронов, Л. С. Новиков, Н. Л. Богоявленский // *Приборы и техника эксперимента*. – 2005. – № 2. – С. 123-129.
156. Семкин, Н. Д. Проводимость ударно сжатых МДМ структур на основе полиметилметакрилата / Н. Д. Семкин, К. Е. Воронов // *Журнал технической физики*. – 1998. – Т. 68, № 8. – С. 63-66.
157. Hamilton, J. Development of the space debris sensor / J. Hamilton, J. C. Liou, Ph. Anz-meador [et al.] // *Proceedings of 7th European Conference on Space Debris (Darmstadt, 2017)*. – Vol. 7, No. 1 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://conference.sdo.esa.int/proceedings/sdc7/paper/965> (дата обращения: 30.09.2019).
158. Phipps, C.R. Removing orbital debris with lasers/ Phipps C.R. et al. // *Advances in Space Research*. -2012. -Vol. 49. -P. 1283-1300.
159. Kobayashi, M. Dust detector using piezoelectric lead zirconate titanate with current-to-voltage converting amplifier for functional advancement/ M. Kobayashi, T. Miyachi, Maki Hattori, Seiji Sugita, Seiji Takechi and Nagaya Okada. // *Earth Planets Space*. -2013.- Vol. 65.- P. 167-173.

160. Richard, W. R. Structural health monitoring and impact detection using neural networks for damage characterization / W. R. Richard. – Hampton, USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006. – 11 p.

161.\* **Телегин А.М.** Современные детекторы микрометеороидов // IX Междунар. научн.-техн. конф. «Физика и технические приложения волновых процессов»: материалы международной конференции, 2010. Челябинск. - 2010. - С. 169.

162.\* Семкин, Н.Д. Результаты экспериментов, полученных с помощью научной аппаратуры "МАГКОМ" и "МЕТЕОР" малого космического аппарата "Аист" / Семкин Н.Д., Воронов К.Е., **Телегин А.М.**, Пияков А.В., Пияков И.В. // Авиакосмическое приборостроение. — 2014. — № 7. — С. 30-43.

163. Auer, A. Detection technique for micrometeoroids using impact ionization/ Auer A., Sitte /Earth and Planetary Science Letters. - 1968. - Vol. 4, Issue 2. - P. 178-183.

164. Sternovsky, Z. Improved dust detectors and analyzers for planetary missions/ Z. Sternovsky, M. Horányi, and other.// International Workshop on Instrumentation for Planetary Missions. -2012. - 15 p.

165. Grun, E. Active Cosmic Dust Collector / E. Grun [et al.] // Planetary and Space Science. – 2012. – Vol. 60. – Pp. 261-273.

166.\* Semkin, N.D. Register elemental composition micrometeoroids and debris/N.D. Semkin, **A.M. Telegin**, K.E.Voronov //10<sup>th</sup> International Space Conference on “Protection of Materials and Structures from the Space Enviroment” (ICPMSE – 10J). – Japan, 2011.-С.36.

167.\* **Телегин, А.М.** Использование матрицы МДМ – структур для анализа элементного состава частиц космического мусора и микрометеороидов/**А.М.Телегин**// 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.

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

169.\* Семкин, Н.Д. Моделирование частиц космического мусора с помощью электромагнитного и электроплазменного ускорителя / Н.Д. Семкин, К.Е. Воронов, **А.М. Телегин**, К.И.Сухачев, М.В. Изюмов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы.- 2011. -Т. 14, № 1. - С. 79-85.

170.\* **Телегин, А. М.** Исследование проводимости диэлектриков и полупроводников под высоким давлением (обзор) / А. М. Телегин, М. П. Калаев, Н. Д. Семкин // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций : матер. Всеросс. научн.-техн. конф. – Самара: Изд-во СГАУ, 2011. – С. 156-165.

171. Новикова, Л. С. Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов / Л. С. Новикова, М. И. Панасюка. – М.: ЭНЦИТЕХ, 2000.

172.\* Воронов, К.Е. Обзор аппаратных средств для регистрации ударов частиц о поверхность космического аппарата (обзор) / Воронов К.Е., Григорьев Д.П., **Телегин А.М.** // Успехи прикладной физики. — 2021. — Т. 9. № 3. — С. 245-265.

173.\* Воронов, К.Е. Исследование работы детектора пролета высокоскоростных заряженных микрочастиц для времяпролетного масс-спектрометра/ Воронов К.Е., Пияков И.В., Калаев М.П., **Телегин А.М.** // Приборы и техника эксперимента. — 2023. — № 6. — С. 135-141.

174.\* **Телегин, А.М.** Система электродов ионизационных датчиков микрометеороидов/ **Телегин А.М.** // Инженерная физика. — 2021. — № 6. — С. 3-8.

175. Ivanov, N. N. A New Way of Automated Dust Control of the External Atmosphere of a Spacecraft During Thermal-Vacuum Testing / N. N. Ivanov, D. B. Dobritsa, V. Y. Yaschenko // Sol Syst Res. – 2020. – Vol. 54. – P. 662-667.

176. Durin, C. Active detection of micrometeoroids and space debris SODAD-2 experiment on SAC-D satellite / C. Durin, J. C. Mandeville, J. M. Perrin // Advances in Space Research. – 2022. – Vol. 69, № 10. – Pp. 3856-3863.

177.\* Устройство контроля параметров движения космического аппарата (КА) с использованием постоянных магнитов : пат. 198479 Рос. Федерация / К. Е. Воронов, А. В. Пияков, **А. М. Телегин**, Т. Р. Сахапов. – № 2020102461 ; заявл. 21.01.2020 ; опубл. 13.07.2020.

178.\* Ускоритель высокоскоростных твёрдых микрочастиц : пат. 189818 Рос. Федерация / К. Е. Воронов, А. В. Пияков, **А. М. Телегин**, Д. М. Рязанов. – № 2019102475 ; заявл. 29.01.2019 ; опубл. 05.06.2019.

179.\* Устройство для исследования потоков микрометеороидов и частиц космического мусора: пат. 2610342 Рос. Федерация / Н. Д. Семкин, **А. М. Телегин**. – № 2015147673 ; заявл. 05.11.2015 ; опубл. 09.02.2017.

180.\* Малый космический аппарат для регистрации высокоскоростных микрочастиц: пат. 170832 Рос. Федерация / **А. М. Телегин**. – № 2016143013; заявл. 31.10.2016 ; опубл. 11.05.2017.

181.\* Прибор для изучения параметров микрометеоритов и частиц космического мусора : пат. 172272 Рос. Федерация / **А. М. Телегин**, К. Е. Воронов, И. В. Пияков. – № 2016146251; заявл. 24.11.2016; опубл. 03.07.2017.

182.\* Программа вычисления динамики движения заряженной частицы в тракте ускорителя для моделирования микрометеоритов с использованием технологии NVIDIA CUDA : свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2017613036 Рос. Федерация / А. В. Пияков, Д. В. Родин, **А. М. Телегин**. – № 2016661752 ; заявл. 02.11.2016 ; опубл. 09.03.2017.

183.\* Программа вычисления динамики движения заряженной частицы в тракте ускорителя для моделирования микрометеоритов : свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2017613539 Рос. Федерация / А. В. Пияков, Д. В. Родин, **А. М. Телегин**. – № 2016661223 ; заявл. 19.10.2016 ; опубл. 21.03.2017.

184.\* Устройство для защиты космического аппарата от микрометеороидов : пат. 2598927 Рос. Федерация / **А. М. Телегин**. – № 2015122575/11 ; заявл. 10.06.2015 ; опубл. 10.10.2016.

185.\* Ускоритель высокоскоростных твердых частиц с коррекцией вектора скорости частиц : пат. 2593594 Рос. Федерация / А. В. Пияков, **А. М. Телегин**, Н. Д. Семкин, А. С. Дорофеев. – № 2014149820/07 ; заявл. 09.12.2014 ; опубл. 10.08.2016.

186.\* Устройство обнаружения утечки воздуха из модуля космической станции : пат. 2549630 Рос. Федерация / Н. Д. Семкин, И. В. Пияков, **А. М. Телегин**. – № 2013153635/11 ; заявл. 03.12.2013 ; опубл. 27.04.2015.

187.\* Циклический масс-спектрометр газовых частиц : пат. 2504044 Рос. Федерация / Н. Д. Семкин, А. В. Пияков, И. В. Пияков [и др.]. – № 2012115873/07 ; заявл. 19.04.2012 ; опубл. 10.01.2014.

188.\* Устройство регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора : пат. 2522504 Рос. Федерация / Н. Д. Семкин, **А. М. Телегин**. – № 2012148678/07 ; заявл. 15.11.2012 ; опубл. 20.07.2014.

189.\* Устройство регистрации микрометеороидов и электрических разрядов : пат. 147374 Рос. Федерация / Н. Д. Семкин, **А. М. Телегин**, В. В. Брагин. – № 2014110574/07 ; заявл. 19.03.2014 ; опубл. 10.11.2014.

190.\* Устройство контроля герметичности элементов конструкции космического аппарата (КА) : пат. 2479829 Рос. Федерация / Н. Д. Семкин, **А. М. Телегин**, И. В. Пияков. – № 2011143823/28 ; заявл. 28.10.2011 ; опубл. 20.04.2013.

191.\* Устройство для защиты космического аппарата от метеорных частиц : пат. 2481256 Рос. Федерация / Н. Д. Семкин, А. В. Бабенко, **А. М. Телегин**. – № 2011142950/11 ; заявл. 24.10.2011 ; опубл. 10.05.2013.

192.\* Космический аппарат для очистки околоземного пространства от мусора : пат. 2492125 Рос. Федерация / Н. Д. Семкин, **А. М. Телегин**, А. В. Бабенко. – № 2012107929/11 ; заявл. 01.03.2012 ; опубл. 10.09.2013.

193.\* Устройство регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора : пат. 2476908 Рос. Федерация / Н. Д. Семкин, **А. М. Телегин**, Д. В. Родин, М. П. Калаев. – № 2011123926/28 ; заявл. 10.06.2011 ; опубл. 27.02.2013.

194.\* Устройство измерения оптических характеристик ударносжатых прозрачных материалов элементов конструкции космического аппарата : пат. 2485548 Рос. Федерация / Н. Д. Семкин, **А. М. Телегин**, А. В. Пияков [и др.]. – № 2011127029/28 ; заявл. 30.06.2011 ; опубл. 20.06.2013.

195.\* Устройство регистрации частиц космического мусора и микрометеороидов : пат. 2454628 Рос. Федерация / Н. Д. Семкин, В. В. Любимов, В. И. Абрашкин, М. П. Калаев, **А. М. Телегин**, Е. Ю. Барышев. – № 2011127027/28 ; заявл. 30.06.2011 ; опубл. 27.06.2012.

196.\* Воронов, К. Е. Применение нейронной сети прямого распространения для локализации места удара микрочастиц о поверхность космического аппарата / К. Е. Воронов, Д. П. Григорьев, **А. М. Телегин** // Труды МАИ. – 2021. – № 118.

197.\* Новомейский, Д. Н. Физические эффекты в датчиках высокоскоростных микрочастиц / Д. Н. Новомейский, **А. М. Телегин**, Н. Д. Семкин // Датчики и системы. – 2018. – № 1(221). – С. 31-35.

198.\* Новомейский, Д. Н. Использование пьезодатчиков для определения места удара высокоскоростных частиц о поверхность космического аппарата / Д. Н. Новомейский, **А. М. Телегин**, Н. Д. Семкин // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2015. – Т. 18, № 2. – С. 61-65.

199.\* Семкин, Н. Д. Многослойные структуры в условиях воздействия высокоскоростных твердых частиц / Н. Д. Семкин, **А. М. Телегин** // Авиакосмическое приборостроение. – 2015. – № 9. – С. 41-47.

200.\* Разработка научно-технических решений для мониторинга космического мусора и микрометеороидов на основе пленочных датчиков, выполненных в виде космического аппарата: отчет о НИР (промежуточный)/Н.Д.Семкин [и др.]. – Самара, 2016. – 79 с.-Инв.№16г-Р006-214/4.

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

202.\* **Телегин, А. М.** Конструирование научной аппаратуры для измерения параметров микрометеороидов в околоземном пространстве : учеб. пособие / А. М. Телегин, М. П. Калаев. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2020. – 104 с.

203. Novikov, J. S. Attempt of measurement of space debris microparticle flux in geosynchronous orbit / J. S. Novikov, K. E. Voronov, N. D. Semkin // Proc. Second European Conference on Space Debris, ESOC, Darmstadt, Germany 17—19 March, 1997. – P. 135-137.

204. Апати, И. Результаты исследования метеороговещества на ИСЗ "Интеркосмос-14" и сопутствующих наземных наблюдений метеоров/ Апати И., Васюкова З. В., Кашеев Б. Л. и др. // Космические исследования. -1981. - Т. 19. Вып. 5. - С. 700.

205. Drolshagen, G. In situ measurements of cosmic dust and micro-debris / G.Drolshagen, H.Svedhem, E. G.Grun // Proceedings of the second European Conference on Space Debris, ESOC, Darmstadt, Germany, 17—19 March, 1997 (ESA SP-393, May, 1997).

206.\* Семкин, Н.Д. Бортовая оптическая система сбора информации об объектах космического мусора/ Н.Д. Семкин, Е.Ю.Барышев, **А.М. Телегин** // Авиакосмическое приборостроение. - 2009. - № 7. - С. 11-17.

207.\* Семкин, Н.Д. Деградация оптических материалов в условиях воздействия потоков микрометеороидов и космического мусора/ Н.Д.Семкин, А.В.Пияков, М.П.Калаев, **А.М.Телегин**, М.В. Изюмов // 3-я междунар. научн.-техн. конф. «Металлофизика, механика материалов, наноструктур и процессов деформирования. Металлодеформ–2009». -Самара, 2009. С. 303.

208.\* **Телегин, А. М.** Космическая пыль и ее взаимодействие с космическими аппаратами : учеб. пособие / А. М. Телегин, Н. Д. Семкин. – Самара, 2014. – 173 с.

209.\* Семкин, Н.Д. Метод обработки информации об элементном составе микрометеороидов / Семкин Н.Д., **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.

210.\* **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.

211.\* Семкин, Н.Д. 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-технической конференции «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.

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

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

214. Faure, P. Space Dust Impacts Detector Development for the Evaluation of Ejecta/Pauline Faure, Shingo Masuyama, Hiroshi Nakamotoa, Yasuhiro Akahoshi, Yukihiro Kitazawa, Takao Koura//Procedia Engineering. – 2013. – Vol. 58.- P. 594-600.

215. In orbit debris-detection based on solar panels / W. Bauer, O. Romberg, A. Pissarskoi [et al.] // CEAS Space J. – 2013. – DOI 10.1007/s12567-013-0039-4.

216.\* Устройство для регистрации характеристик солнечных батарей в условиях действия факторов космического пространства : пат. 2839708 Рос. Федерация / К. Е. Воронов, М. П. Калаев, **А. М. Телегин**, А. В. Родина. – заявл. 05.07.2024 ; опубл. 12.05.2025.

217. Burchell J. 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. – 2013. – vol. 58. –P. 68 – 76.

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

219. Davison, E.H. Direct evaluation of meteoroid hazard/ Davison E.H., Winslow P.C.// Aerospace Engng. – 1962. - vol.21. - №2. - p.24-33.

220.\* Семкин, Н.Д. малый космический аппарат для регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора / Семкин Н.Д., **Телегин А.М.**, Видманов А.С.// Вестник СГАУ. — 2016. — № Т. 15, №1. — С. 115-121.

221.\* Semkin, N.D. Small spacecraft to register micrometeoroids and space debris / Semkin N.D., **Telegin A.M.** // 3rd International Conference on Manufacturing Engineering and Technology for Manufacturing Growth (METMG 2015). -Canada, Vancouver, 2015. -P.46-49.

222. Hofmann, D. C. Design, fabrication, and hypervelocity impact testing of screen-printed flexible micrometeoroid and orbital debris impact sensors for long-duration spacecraft health monitoring / D. C. Hofmann, P. Bordeenithikasem, Y. Zhu [et al.] // Aerospace Science and Technology. – 2023. – Vol. 139. – 108372.

223. Satoshi, I. / I. Satoshi, F. Masahiro, K. Hiroataka [et al.] // 33rd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites.
224. The Space Debris Sensor Experiment / P. Anz-Meador, M. Ward, A. Manis [et al.] // First Int'l. Orbital Debris Conf. – 2019.
225. LUMIO: A CubeSat for observing and characterizing micro-meteoroid impacts on the Lunar far side / A. Cervone, F. Toppo, S. Speretta [et al.] // Acta Astronautica. – 2022. – Vol. 195. – P. 309-317.
226. Мартынов, В.В. Датчик для исследования параметров космических частиц//В.В. Мартынов, Т.Ю. Девяткина, И.С. Прохватава//Известия ТулГУ. Технические науки. -2023.- Вып. 7. - С.678-680.
227. Баранов, Н.А.Устройство для измерения параметров космических частиц и оценки их влияния на материалы спутникостроения// Н.А.Баранов, Д.Р.Таипова // Труды МАИ. - Выпуск № 105.
- 228.\* **Телегин, А. М.** Основные этапы разработки приборов для регистрации высокоскоростных микрочастиц / **А. М. Телегин**, Е. В. Телегина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 12. – С. 499-507.
- 229.Новиков, Л.С. Масс-спектрометрия ионов, эмитируемых при соударении микрометеоритных частиц с материалами/ Л.С.Новиков, Н.Д. Семкин, В.С. Куликаускас // ФХОМ. - 1989. - №6 – С. 49-56.
230. Eichhorn, G. Measurement of the light flash produced by high velocity particle impact / G. Eichhorn // Planet. Space Sci. – 1959. – P. 771.
- 231.\* Семкин, Н. Д. Прибор для исследования распределения ионов, образовавшихся при высокоскоростном соударении твердых тел / Н. Д. Семкин, А. С. Дорофеев, **А. М. Телегин** // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2015. – Т. 18, № 1.- С.85-89.
232. Вайсбурд, Д. И. Лабораторный практикум по атомной физике /Д. И. Вайсбурд, А. В. Макиенко. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 120 с.
- 233.\* Устройство для исследования физических явлений при высокоскоростном ударе : пат. 2592060 Рос. Федерация / Н. Д. Семкин, **А. М. Телегин**, А. С. Видманов. – № 2014149689/07 ; заявл. 09.12.2014 ; опубл. 20.07.2016.
234. A conceptual study to characterize properties of space debris from hypervelocity impacts through Thin Film Heat Flux Gauges / L. Barilaro, C. Falsetti, L. Olivieri [et al.] // 2021 IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace, MetroAeroSpace 2021 - Proceedings. – Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. – P. 430-435.

235. Gola, Y. Piezoresistive nanocomposites for sensing MMOD impact damage in inflatable space structures/Y.Gola, D.Kim, S.Namilae//Compos. Commun. -2020. -Vol. 21.100375.

236. Rose, R. Application of intelligent spacecraft structures for impact detection/ R.Rose, M.Koets, S.Chocron, R.Grimm //2022 IEEE Aerospace Conference (AERO). -Big Sky, MT, USA, 2022.

237. Gbaguidi, A. Multifunctional inkjet printed sensors for MMOD impact detection / A. Gbaguidi, F. Madiyar, D. Kim, S. Namilae // Smart Mater. Struct. – 2020. – Vol. 29. – 085052.

238.\* Семкин, Н.Д. Ударно-сжатые структуры металл-диэлектрик-металл в условиях воздействия высокоскоростных пылевых частиц/Семкин Н.Д., **Телегин А.М.**//Журнал технической физики. -2011. -Т. 81. № 7. -С. 88-93.

239.\* Семкин, Н.Д. Проводимость и ионообразование в ударносжатых пленочных структурах в условиях воздействия высокоскоростных пылевых частиц /Семкин Н.Д., **Телегин А.М.**, Помельников Р.А. // Физика волновых процессов и радиотехнические системы.- 2009. –Т.12, №4. - С.92-95.

240. Колешко, В. М. Моделирование баллистического квантового наносенсора для контроля высокоскоростных космических микрочастиц / В. М. Колешко, А. В. Гулай, В. А. Гулай, В. Б. Ульянов // Машиностроение : республиканский межведомственный сборник научных трудов : по материалам Международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии в машиностроении», 06-10 апреля 2009 года. – Минск: БНТУ, 2010. – Вып. 25. – С. 360-365.

241. Fexer, S. A novel evaluation method for in situ space debris detection based on conductive traces / S. Fexer // Frontiers in Space Technologies. – 2022. – Vol. 3.

242.\* **Телегин, А. М.** Исследование возможности использования СВЧ фильтра в качестве датчика осаждения пленок / **А. М. Телегин**, М. П. Калаев, К. Е. Воронов, Л. В. Николаев // Инженерная физика. – 2025. – № 12. – С. 33-41.

243.\* Воронов, К. Е. Многопараметрический датчик для измерения параметров загрязнения поверхности космического аппарата / К. Е. Воронов, М. П. Калаев, **А. М. Телегин**, Д. М. Рязанов // Приборы и техника эксперимента. – 2025. – № 5. – С. 111-117. – DOI 10.7868/S3034564225050137.

244.\* Телегин А.М., Телегина Е.В. Способы регистрации сигналов с ионизационного датчика микрометеороидов // XXI Международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления», посвященная 80-летию радиотехнического образования за Уралом. — 2025. — Ч. 1. — С. 205-207.

245.\* Устройство для регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора на основе металлических полосок : пат. 2819263 Рос. Федерация / **А. М. Телегин**. – заявл. 25.12.2023 ; опубл. 16.05.2024.

246.\* **Телегин, А.М.** Моделирование коэффициента передачи датчика микрометеороидов и частиц космического мусора/ **Телегин А.М.** // Инженерная физика. — 2024. — № 4. — С. 37-44.

247. Paul, C. R. Analysis of multiconductor transmission lines / C. R. Paul. – 2nd ed. – Wiley-IEEE Press, 2008. – 780 p.

248. Теория цепей СВЧ: Учеб. пособие // В. В. Тюрнев. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2003, 194 с.

249. Фельдштейн, А. Л. Синтез четырехполюсников и восьмиполюсников на СВЧ / А. Л. Фельдштейн, Л. Р. Явич. – М.: Связь, 1971.

250. Морозов, О.Г. Радиофотонный векторный анализатор высокого разрешения с низкочастотным расщеплением зондирующего сигнала/ О.Г.Морозов, Г.А.Морозов // Инфокоммуникационные технологии. - 2022. -Т. 20, № 1. -С. 50-57.

251. Tosi, D. Review and Analysis of Peak Tracking Techniques for Fiber Bragg Grating Sensors / D. Tosi // Sensors. – 2017. – 17(10). – 2368.

252.\* **Телегин, А.М.** Экспериментальное моделирование коэффициента передачи прототипа датчика микрометеороидов и частиц космического мусора/**Телегин А.М.**// Инженерная физика. -2025. - №2. - С. 48-56.

253. Кечиев Л.Н. Электрофизические основы конструирования электронной аппаратуры. Инженерное пособие– М.: Грифон, 2020. – 480 с.

254.\* Телегин, А.М. Датчик микрометеороидов и частиц космического мусора на основе пленочной катушки индуктивности/**А. М. Телегин**, М. П. Калаев//Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. -2025. -18 (3). - С.49-59.

255. Ипатов, А.В. Мониторинг космического мусора и перспективы освоения околоземного космического пространства/ А.В.Ипатов, Л.А.Ведешин, С.А. Герасютин // Земля и Вселенная. - 2024. - № 2 (356). - С. 91-108.

256. Adushkin, V.V. The small orbital debris population and its impact on space activities and ecological safety/ V.V.Adushkin, S.I.Kozlov, O.Y.Aksenov, S.S.Veniaminov, V.V. Tyurenkova // Acta Astronautica. - 2020. -Vol. 176. -P. 591-597.

257.\* Калаев, М.П. Исследование характеристик оптических стекол при воздействии факторов космического пространства/ М.П.Калаев, **А.М.Телегин**, К.Е.Воронов, Ц.Лисян, Ц.Цзилун //Компьютерная оптика. -2019. Т. 43. № 5. С. 803-809.

258. Bahl, I. Lumped Elements for RF and Microwave Circuits. – Artech House, 2003. – 488 p.
259. Борейко, Д. А. Исследование параметров катушек индуктивности, выполненных по LTCC технологии / Д. А. Борейко, Т. С. Дьяченко, А. И. Тюменцев // Техника радиосвязи. – 2012. – Вып. 17. – С. 73-83.
260. Wheeler, H. A. Simple Inductance Formulas for Radio Coils / H. A. Wheeler // Proceedings of the I.R.E. – October 1928.
261. Калантаров, П. Л. Расчет индуктивностей : справочная книга / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 488 с.
262. Benhadda, Y. Design for Integrated Planar Spiral Inductor for MEMS/ Y. Benhadda, M. Derkaoui, K. Mendaz [et al.] // Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science. – 2023. – 67(4). – P. 425-437.
263. Hussain, I. Simplified Mutual Inductance Calculation of Planar Spiral Coil for Wireless Power Applications/ I. Hussain, D.-K. Woo //Sensors. -2022. - vol.22. - 1537.
264. Futai, N. A flexible micromachined planar spiral inductor for use as an artificial tactile mechanoreceptor/ N. Futai, K. Matsumoto, I. Shimoyama // Sensors and Actuators A. – 2004. – Vol. 111. – P. 293-303.
265. Awang, Z. Microwave Systems Design / Z. Awang. – Springer Science & Business Media, 2013. – 313 с.
266. Benedek P. AND Silvester P. Equivalent Capacitances for Microstrip Gaps and Steps//IEEE Transactions on microwave theory and techniques. - 1972. - VOL. MTT-20. №. 11.- P.729-733.
267. Garg, R. Microstrip discontinuities / R. Garg, I. J. Bahl // International Journal of Electronics. – 1978. – Vol. 45 (1). – P. 81-87.
268. Qingyang, Q. Signal integrity analysis on discontinuous microstrip line / Q. Qingyang, Y. Dai, Z. Chen // Journal of Physics: Conference Series. 7th International Conference on Applied Electrostatics (ICAES-2012). – 2013. – Vol. 418. – 012087.
269. Mathieson, E. Induced charge distributions in proportional detectors [Электронный ресурс] / E. Mathieson. – Режим доступа: [https://wiki.gsi.de/pub/Personalpages/1InnaPysmenetska/Mathiesons\\_Book.pdf](https://wiki.gsi.de/pub/Personalpages/1InnaPysmenetska/Mathiesons_Book.pdf).
270. Blum, W. Particle Detection with Drift Chambers / W. Blum, W. Riegler, L. Rolandi. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. – 448 p.

- 271.\* Воронов, К.Е. Научная аппаратура МЕТЕОР-М для исследования высокоскоростных микрочастиц / Воронов К.Е., Телегин А.М., Лисян Ц., Цзилун Ц.// Приборы и техника эксперимента. — 2019. — № 5. — С. 148-149.
272. Демирчян, К. С. Теоретические основы электротехники. В 3 томах / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – Том 3. – СПб.: Питер, 2003.
- 273.\* Семкин, Н.Д. Расчёт силы тока в измерительной цепи детектора высокоскоростных микрочастиц / Семкин Н.Д., Телегин А.М. // Измерительная техника. — 2016. — № 12. — С. 45-48.
274. Shocley, W. Currents to Conductors Induced by a Moving Point Charge / W. Shocley// J. Appl. Phys. – 1938. – V. 9. – P. 635-636.
275. Иновенков, А.Н. Обобщение теоремы Рамо-Шокли на случай высокоимпедансного внешнего включения /А.Н.Иновенков, О.В.Константинов, В.И.Пирогов// ЖТФ.- 1993. - Т.63, Вып.9. - с.1-5.
276. Поклонский, Н.А. Соотношения Рамо-Шокли для последовательной RCL-цепи/ Н.А. Поклонский, С.А. Вырко, А.А. Кочерженко// ЖТФ. – 2004. - Т.74., Вып.11. - с.75-78.
277. Изюмов, М. В. Преобразователь высокоскоростных частиц плоской конструкции / М. В. Изюмов, Н. Д. Семкин // Вестник СГАУ. – 2009. – № 4 (20). – С. 148-160.
278. Rodin, D. V. Analytical Method for Computing the Electrostatic Field Distribution in the Reflector of the Time-of-Flight Mass Spectrometer / D. V.Rodin, N. D.Semkin , I. V.Piyakov, R. A. Pomelnikov // Tech. Phys. 2012. -V. 57, N. 10. -P. 1400–1405.
- 279.\* Piyakov, I. Simulation of a dust impact time-of-flight dust particle sensor /Piyakov I., Rodina M., Rodin D., **Telegin A.** // CEUR Workshop Proceedings. — 2020. — Vol. 2667. — P. 67-70.
- 280.\* Piyakov, I.V. Numerical simulation of the ion focusing process in a dust impact time of flight mass spectrometer /I. V. Piyakov, D. V. Rodin, M. A. Rodina and **A.M. Telegin** // CEUR Workshop Proceedings. — 2018. — Vol. 2212. — P. 152-157.
- 281.\* Semkin, N. D. Registering the elemental composition of micrometeoroids and debris/ Semkin N. D. , **Telegin A.M.**, Voronov K.E.// Astrophysics and Space Science Proceedings. — 2013. — Vol. 32. — P. 263-270
- 282.\* Пылеударный масс-спектрометр : пат. 2824860 Рос. Федерация / К. Е. Воронов, И. В. Пияков, **А. М. Телегин**, Д. В. Родин. – заявл. 22.02.2024 ; опубл. 14.08.2024.
- 283.\* **Telegin, A.M.** “Meteor” Sensors Mounted on a Small Spacecraft AIST/ **Telegin A.M.**, Semkin N.D., Novikov L.S. // Astrophysics and Space Science Proceedings. — 2017. — Vol. 47. — P. 517-522.

284. N2YO.com [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.n2yo.com/satellite/?s=39133> (дата обращения: 01.06.2014).

285. Кирилин, А.Н. Основные проектные характеристики и результаты эксплуатации группировки малых космических аппаратов научно-образовательного назначения серии «Аист»/ А. Н. Кирилин, Р. Н. Ахметов, С. И. Ткаченко и др. // Космическая техника и технологии. — 2019. — № 1 (24). — С. 68-83.

286.\* Воронов, К.Е. Исследование работы пылеударного масс-спектрометра с нелинейным зеркалом/ К.Е.Воронов, И.В.Пияков, М.П.Калаев, **А.М.Телегин**, Д.В.Родин // Инженерная физика. — 2024. — № 10. — С. 19-27.

287.\* Воронов, К.Е. Исследование работы устройства с микроканальной пластиной в качестве приемника ионов для регистрации пылевых частиц/ К. Е. Воронов, И. В. Пияков, Д. М. Рязанов, **А. М. Телегин** //Прикладная физика. -2023. -№ 6. -С. 84-92.

288.\* Семкин, Н.Д. Экспериментальное исследование детектора микрометеороидов и частиц космического мусора полусферической формы с помощью импульсного лазера / Н.Д. Семкин, **А.М. Телегин** // Приборы и техника эксперимента. — 2016. — № 6. — С. 62-65.

289.\* **Телегин, А.М.** Повышение эффективности ионообразования при высокоскоростном взаимодействии пылевых частиц с пленочной структурой металл-диэлектрик-металл / **А. М. Телегин**, Н. Д. Семкин, И. В. Пияков // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2012. – Т. 15, № 1. – С. 98-102.

290.\* Сёмкин, Н.Д. Электризация поверхности низкоорбитального малого космического аппарата "АИСТ" / Н.Д. Сёмкин, В.В. Брагин, А.В. Пияков, **А.М.Телегин**, Д.М. Рязанов, М.Г. Матвиец // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). — 2015. — Т.14, №1. — С. 46-57.

291. Новикова, Л. С. Взаимодействие космических аппаратов с окружающей плазмой: учеб. пособие / Л. С. Новикова. – М.: Университетская книга, 2006. – 120 с.

292.\* **Телегин, А.М.** Исследование микрометеороидов и частиц космического мусора ионизационным детектором на малом космическом аппарате АИСТ-1Т / **А.М.Телегин**, К.Е. Воронов, В.А. Авдеев // Прикладная физика. — 2016. — № 6. — С. 116-119.

293. Kirilin, A. N. Design, testing and operation of «AIST» small satellites / A. N. Kirilin, R. N. Akhmetov, V. I. Abrashkin [et al.] // RAST 2015 - Proceedings of 7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies 7, Emerging Private Space. – 2015. – С. 819-823.

- 294.\* **Телегин, А. М.** Детектор микрометеороидов и частиц космического мусора для малого космического аппарата "АИСТ-2" / А. М. Телегин, Н. Д. Сёмкин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). – 2013. – № 4 (42). – С. 261-263.
295. Кирилин, А. Н. Опытнo-технологический малый космический аппарат «АИСТ-2Д» / А. Н. Кирилин, Р. Н. Ахметов, Е. В. Шахматов и др. – Самара: СамНЦ РАН, 2017. – 324 с.
296. Drapats, S. Theory of shock-wave ionization high-velocity Impact of Micrometeorites / S.Drapats, K.W. Michel // Naturforsch Z. – 1974. – 29 - P.870-879.
297. Friichtenicht, J. F. Ionization associated with hypervelocity impact / J. F. Friichtenicht, J. C. Slattery. – Washington: NASA Technical note D-2091, 1953. – 28 p.
298. Сухачев, К.И. Ускорители твердых тел / К.И.Сухачев, Н.Д.Семкин, А.В. Пияков // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. -2014. -Т. 17, № 2. - С. 49-58.
299. Методы расчета электростатических полей / Н. Н. Миролюбов, М. В. Костенко, М. Л. Левинштейн, Н. Н. Тиходеев. – М.: Высшая школа, 1963. – 416 с.
300. Зайцев, В. В. Электростатическое моделирование полосковых линий : учеб. пособие / В. В. Зайцев, В. И. Занин, В. М. Трещев. – Самара: Изд-во «Универс-групп», 2005. – 52 с.
- 301.\* Воронов, К.Е. Концепция прибора на основе сеточной конструкции для измерения параметров микрометеороидов / Воронов К.Е., **Телегин А.М.**, Рязанов Д.М. // Прикладная физика. — 2021. — № 4. — С. 73-80.
302. Auer, S. Two high resolution velocity vector analyzers for cosmic dust particles / S. Auer // Rev. Sci. Instrum. – 1975. – Vol. 46, № 2. – P. 127-135.
303. Northway, P. Characteristics of a new dust coordinate sensor / P. Northway, S. Auer, K. Drake [et al.] // Measurement Science and Technology. – 2012. – Т. 23, № 10. – 105902.
304. Shrine, N. R. G. Laboratory Investigation of Oblique Hypervelocity Impacts with Relevance to In situ Meteoroid and Space Debris Detectors : Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. – November 1999. – 231 p
- 305.\* Воронов, К. Е. Формы наведенного импульса в датчике микрометеороидов и частиц космического мусора / К. Е. Воронов, **А. М. Телегин**, К. И. Сухачев, М. П. Калаев // Успехи прикладной физики. — 2020. — Т. 8. № 6. — С. 411-418.

306. Тонких, В. А. Индукционный газоанализатор с радиальным дрейфом ионов в цилиндрической камере / В. А. Тонких, Ю. В. Иванков, А. В. Крисилов // Вестник ВГУ. Серия: Физика. Математика. – 2013. – № 1. – С. 114-124.

307.\* Воронов, К.Е. Научная аппаратура для исследования высокоскоростных микрочастиц (обзор) / К.Е. Воронов, **А.М. Телегин**, Ц. Лисян, Ц. Цзилун // Успехи прикладной физики. — 2019. — Т. 7, № 6. — С. 594-600.

308.\* Пияков, И.В. Цифровой модуль регистрации сигнала для пылеударного масс-спектрометра / И.В. Пияков, М.П. Калаев, К.И. Сухачев, К.Е. Воронов, **А.М. Телегин** // Приборы и техника эксперимента. — 2020. — № 6. — С. 83-88.

309. Mathieson, E. Cathode charge distributions in multiwire chambers. I. Measurement and theory / E. Mathieson, J. S. Gordon // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 1984. – № 227. – P. 267-276.

310.\* **Телегин, А. М.** Форма наведенного импульса с датчика высокоскоростных микрочастиц / А. М. Телегин // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций : материалы Всероссийской научно-технической конференции (Самара 2018). – 2018. – С. 54-55.

311.\* Piyakov, A.V. Simulation of the control system of the electrodynamic accelerator of dust particles /A. V. Piyakov, D. V. Rodin, M. A. Rodina, **A. M. Telegin** and S. N. Kondratev // CEUR Workshop Proceedings. — 2018. — Vol. 2212. — P. 158-164.

312.\* Пылеударный масс-спектрометр: пат. 2845626 Рос. Федерация / К. Е. Воронов, И. В. Пияков, Д. В. Родин, М.А.Родина, **А.М.Телегин**. – заявл. 14.03.2025 ; опубл. 25.08.2025.

313.\* **Телегин, А.М.** Модель сеточной конструкции для измерения скорости микрометеороидов/ **А. М. Телегин**, К. Е. Воронов, Д. А. Шестаков // Инженерная физика. — 2024. — № 1. — С. 49-57.

314.\* **Телегин, А.М.** Модель выходного сигнала с измерительной сетки датчика микрометеороидов / **А.М. Телегин** // Инженерная физика. — 2021. — № 9. — С. 27-33.

315. Смалюк В.В. Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях / Под ред. чл.-корр. РАН Н.С.Диканского. Новосибирск: Параллель, 2009. - 294 с.

316. Карабеков, И.П. Расчет и конструирование измерительных электродов ускорителей/ И.П. Карабеков, М.А.Мартиросян //Атомная энергия. – 1962. - Т.13, вып.4. - С.337-341.

317.\* **Телегин, А. М.** Модель выходного сигнала с датчика заряженных микрочастиц / А. М. Телегин // Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций :

Материалы Всероссийской научно-технической конференции, Самара, 20–23 мая 2025 года. – Самара: ООО "АРТЕЛЬ", 2025. – С. 24-25.

318. Киселев, Д. Ф. Электричество и магнетизм. Методика решения задач : учеб. пособие / Д. Ф. Киселев, А. С. Жукарев, С. А. Иванов [и др.]. – М.: Физический факультет МГУ, 2010. – 332 с.

319. Scharstein, R. W. Capacitance of a tube / R. W. Scharstein // *Journal of Electrostatics*. - 2007. – Т. 65. – №. 1. – С. 21-29.

320. Verolino, L. Capacitance of a hollow cylinder/L. Verolino// *Electrical Engineering*. - 1995.-V.78. -P. 201-207.

321. Butler, C. M. Capacitance of a finite-length conducting cylindrical tube / C. M. Butler// *Journal of Applied Physics*. – 1980. – Т. 51. – №. 11. – P. 5607-5609.

322. T. R. Ferguson and R. H. Duncan// *Journal of Applied Physics*. 1961. V.32. P. 1385.

323.\* **Телегин, А.М.** Исследование модели расчёта наведенного импульса тока в измерительных сетках датчика микрометеороидов и частиц космического мусора/**А.М.Телегин**, М. П. Калаев, К. Е. Воронов /*Прикладная физика*. - 2025.-№1.-С.5-10.

324. Jones, T. B. Bubble dielectrophoresis / T. B. Jones, G. W. Bliss // *Journal of Applied Physics*. – 1977. – Vol. 48, No. 4. – P. 1412-1417.

325.\* Калаев М. П. Экспериментальное исследование сеточного датчика для измерения вектора скорости микрометеороидов и частиц космического мусора/М. П. Калаев, **А. М. Телегин**, К. Е. Воронов // *Приборы и техника эксперимента*. – 2025. – № 1. – С. 154-160.

326.\* Калаев, М.П. Исследование работы оптического датчика для регистрации параметров высокоскоростных пылевых частиц/ М.П. Калаев, А.В.Родина, **А.М. Телегин**, Е.В. Исмагилова // *Приборы и техника эксперимента*. — 2023. — № 6. — С. 142-149.

327. Weiner, M. Particle size determination: An undergraduate lab in Mie scattering / M. Weiner, T. D. Rust, T. D. Donnelly // *Am. J. Phys.* – 2001. – Vol. 69. – P. 129.

328. Thomas, E. Experimental setup for the laboratory investigation of micrometeoroid ablation using a dust accelerator / E. Thomas, J. Simolka, M. DeLuca [et al.] // *Rev. Sci. Instrum.* – 2017. – Vol. 88. – 034501. – DOI 10.1063/1.4977832.

329.\* Пияков, И. В. Способ подключения усилителей к измерительным струнным электродам устройства для определения параметров движения высокоскоростных микрочастиц / И. В. Пияков, Д. В. Родин, **А. М. Телегин** [и др.] // *Прикладная физика и математика*. – 2025. – № 3. – С. 24-32.

- 330.\* Гладышев, А. И. Математическая модель оптической системы для измерения параметров высокоскоростных микрочастиц / А. И. Гладышев, **А. М. Телегин**, Е. А. Щелоков // Цифровая обработка сигналов. – 2023. – № 1. – С. 39-42.
331. Goode, W. Trajectory measurements for individual dust particles on the Colorado dust accelerator/ W. Goode, T. Munsat, D. James, Z. Ulibarri // Nuclear Inst. and Methods in Physics Research. – 2018. – A 908. – P. 269-276.
- 332.\* Пияков, А.В. Измерение распределения частиц по сечению тракта ускорителя для моделирования микрометеоритов с помощью индукционного датчика / А.В. Пияков, **А.М. Телегин** // Приборы и техника эксперимента. — 2022. — № 4. — С. 106-114.
333. Wu, X. New Inductive Debris Sensor Based on Dual-Excitation Coils and Dual-Sensing Coils for Online Debris Monitoring/ Wu X., Zhang Y., Li N., Qian, Z., Liu, D., Qian, Z., Zhang, C.A //Sensors. -2021. -Vol. 21.- 7556.
- 334.\* **Телегин, А.М.** Исследование конструкций датчиков для регистрации параметров высокоскоростных микрочастиц в тракте ускорителя (обзор) / **А.М. Телегин** // Успехи прикладной физики. — 2023. — Т. 11, № 6. — С. 540-552.
- 335.. Пилюгин, Н. Н. Измерение электрических зарядов около тел при гиперзвуковом движении/ Н. Н. Пилюгин// ТВТ.- 1994.- Т. 32, выпуск 1. –С. 114–126.
336. Крабеков, И.П. Расчет и проектирования сигнальных электродов ускорителей/И.П. Крабеков, М.А. Мартисян/Атомная энергия.-1962. –Т.13, вып.3. –С.337-341.
337. Попов, А. М. Техногенный космический мусор : монография. – М.: ООО "Русайнс", 2023. – С. 220.
338. Ушеренко, Ю. С. Исследование надежности материалов внешних оболочек корпусов космических летательных аппаратов на орбите земли в направлении взаимодействия с пылевидными фракциями / Ю. С. Ушеренко, С. Е. Алексенцева, С. М. Ушеренко // Технология металлов. – 2022. – № 5. – С. 52-56.
- 339.\* Пияков, А. В. Компьютерное и лабораторное моделирование микрометеоритов и техногенных пылевых частиц / А. В. Пияков, Д. В. Родин, **А.М. Телегин**. – Самара : Самарский университет, 2021. – 144 с.
340. James, F. Charging and Acceleration of Microparticles//James F. / Rev. Sci. Instrum. 1963. – V.34. – P. 1175–1183.
341. Ostrowski, D. The physical properties of meteorites/ D. Ostrowski, K. Bryson // Planetary and Space Science. -2019.-Vol. 165.-P. 148–178.
342. Campbell-Brown, M. D. Meteoroid structure and fragmentation / M. D. Campbell-Brown // Planetary and Space Science. – 2019. – Vol. 169. – P. 1-7.

343.\* Семкин, Н.Д. Зарядка твердых микрочастиц в камере инжектора электростатического ускорителя / Н.Д.Семкин, А.В.Пияков, А.С.Видманов, **А.М. Телегин**// Приборы и техника эксперимента. — 2017. — № 1. — С. 148-153.

344.\* Семкин, Н.Д. Многослойный экран на основе МДМ-структуры для защиты космических аппаратов от метеорных частиц / Семкин Н.Д., Бабенко А.В., **Телегин А.М.** // Авиакосмическое приборостроение. — 2013. — № 5. — С. 23-28.

345.\* Piyakov, A.V. Numerical simulation of motion of dust particles in an accelerator path /A.V. Piyakov, D.V. Rodin, M.A. Rodina, **A.M. Telegin** // CEUR Workshop Proceedings. — 2017. — Vol. 1902. — P. 55-61.

346.\* Ускоритель высокоскоростных твердых частиц : пат. 2487505 Рос. Федерация / А. В. Пияков, Н. Д. Семкин, **А. М. Телегин**, К.Е. Воронов. – № 2011116727/07 ; заявл. 27.04.2011 ; опубл. 10.07.2013.

347.\* Ускоритель высокоскоростных твердых частиц с автоподстройкой функции распределения частиц по радиусу мишени : пат. 2451434 Рос. Федерация / Н. Д. Семкин, **А. М. Телегин**, М. П. Калаев, А. В. Пияков. – № 2010153720/07 ; заявл. 27.12.2010 ; опубл. 20.05.2012.

348.\* Резонансный электромагнитный ускоритель : пат. 2466340 Рос. Федерация К.И. Сухачев, Н.Д. Семкин, М.П. Калаев, **А.М. Телегин**, Д.В. Родин., А.В.Пияков. – № 2011116048/11 ; заявл. 22.04.2011 ; опубл. 10.11.2012.

349.\* Калаев, М. П. Моделирование и оптимизация характеристик высоковольтного источника питания электростатического ускорителя пылевых частиц / М. П. Калаев, **А. М. Телегин** // Приборы и техника эксперимента. – 2025. – № 4. – С. 32-39.

350. Sánchez-Pena, J. M. Cost-effective optoelectronic system to measure the projectile velocity in high-velocity impact testing of aircraft and spacecraft structural elements / J. M. Sánchez-Pena, M. Santos, M. Y. Fernández, R. Zaera // Optical Engineering. – 2007. – Vol. 46, Issue 5. – Art. № 051014.

351.\* Гладышев, А. И. Регистрация и оценка параметров микрометеороидов с использованием эффекта прерывания микрометеороидами световой завесы из многократного переотраженных оптических лучей / А. И. Гладышев, Е. А. Щелоков, **А. М. Телегин** // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2022. – Т. 30, № 3(75). – С. 6-14.

352. Cain, R. P. Universal particle detector experiment / R. P. Cain, J. C. Lesho, O. M. Dy// Acta Astronautica. – 1995. – Vol. 35, Suppl. – pp. 145-154.

- 353.\* Семкин, Н. Д. Оптическая система сбора информации о пылевой компоненте космического аппарата и объектах космического мусора / Н. Д. Семкин, Е. Ю. Барышев, **А.М. Телегин** // Прикладная физика. – 2010. – № 1. – С. 94-99.
354. Glasse, B. Refractive indices of metal working fluid emulsion components/ B.Glasse, A.Zerwas, R. Guardani and U.Fritsching //Meas. Sci. Technol. -2014. -Vol. 25. - Art.№035205.
355. Борен, К. Поглощение и рассеяние света малыми частицами : пер. с англ. / К. Борен, Д. Хафмен. – М.: Мир, 1986. – 664 с.
356. Ван де Хюлст, Г. Рассеяние света малыми частицами / Г. Ван де Хюлст. – М.: Издательство иностранной литературы, 1961.
357. Сапронов, М. В. Моделирование индикатрис рассеяния лазерного излучения малыми сферическими поглощающими частицами / М. В. Сапронов, Н. М. Скорнякова // Труды Международной конференции по компьютерной графике и зрению "Графикон". – 2019. – С. 99-103.
358. Дейрменджан, Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами / пер. с англ. под ред. К. Н. Кондратьева. – М.: Мир, 1971. – 165 с.
359. Peltoniemi, J. Light scattering model for small space debris particles / J. Peltoniemi, N. Zubko, A. Virkki [et al.] // Advances in Space Research. – 2022. – Vol. 70. – P. 2961-2975.
- 360.\* Синтезируемое в базисе ПЛИС микроконтроллерное ФМУ ядро : свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2023617091 Рос. Федерация / К. И. Сухачёв, Д. П. Григорьев, **А. М. Телегин**. – № 2023615592 ; заявл. 24.03.2023 ; опубл. 05.04.2023.
- 361.\* Программа вычисления и построения индикатрисы рассеяния лазерного излучения на высокоскоростных микрочастицах : свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2023667353 Рос. Федерация / Д. П. Григорьев, **А. М. Телегин**, К. Е. Воронов. – № 2023666501 ; заявл. 02.08.2023 ; опубл. 15.08.2023.
362. Sternovsky, Z.Charging of dust particles on surfaces /Zoltan Sternovsky, Miha'ly Horanyi and Scott Robertson//J. Vac. Sci. Technol. A. -2001. -Vol.19(5). -P.2533.
363. Поклонский, Н.А.Соотношение Рамо –Шокли для RCL – цепи/ Н.А. Поклонский, В.В. Митянок, С.А. Вырко//Письма в ЖТФ.-2002.- Т.28, вып. 15.- С.33-36.
364. Otto, K. A. Application and calibration of a simple position detector for a dust accelerator / К. А. Otto, R. Srama, S. Auer [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2013. – Vol. 729. – P. 841-848.

365. Пилюгин Н.Н. О методике измерения электростатических зарядов около модели в аэробаллистическом эксперименте/Н.Н. Пилюгин, С.Г. Тихомиров// ЖТФ.-1993. -Т.63, №2.– С.142-151.
366. . Jasper, W. J. On-axis electric field of a hollow cylinder / W. J. Jasper.
367. Verolino, L.Capacitance of a hollow cylinder/L.Verolino/Electrical Engineering. 1995. – Vol.78.-P. 201 -207.
368. Srama, R. Low-charge detector for the monitoring of hyper-velocity micron-sized dust particles / R. Srama, S. Auer // Meas. Sci. Technol. – 2008. – Vol. 19. – 055203 (8pp).
369. Trottenberg, T. Contact Charging of Microparticles for Space Propulsion and Terrestrial Applications / T. Trottenberg, V. Schneider, H. Kersten // XXIVth Int. Symp. on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum - Braunschweig – 2010.
370. Li, Y. Upgrades of a Small Electrostatic Dust Accelerator at the University of Stuttgart/ Y. Li, M.Bauer, S.Kelz, H.Strack, J.Simolka, C.Mazur, M.Sommer, A.Mocker, R.Srama// Appl. Sci. -2023. –vol. 13.- 4441.
371. A Fully Differential Charge-Sensitive Amplifier for Dust-Particle Detectors /Kelz S., Veigel T.; Grözing M.; Berroth M. // 2018 14th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics (PRIME). – Prague, 2018. - P.13
372. Duncan, N. The Electrostatic Lunar Dust Analyzer (ELDA) for the detection and trajectory measurement of slow-moving dust particles from the lunar surface/N. Duncan, Z. Sternovsky, E. Grun, S. Auer, M. Horanyi, K. Drake, J. Xie, G. Lawrence, D. Hansen, H. Le// Planetary and Space Science.-2011-.Vol. 59.-P. 1446–1454.
- 373.\* Сухачев, К.И. Алгоритм работы цифрового модуля устройства для детектирования пролетных импульсов / Сухачев К.И., Телегин А.М., Григорьев Д.П., Шестаков Д.А., Дорофеев А.С. // Приборы и техника эксперимента. — 2023. — № 2. — С. 46-51.
374. Thomas, E. FPGA cross-correlation filters for real-time dust detection and selection/ E.Thomas, S.Auer, K.Drake, M.Horányi, T.Munsat, , & A.Shu // Planetary and Space Science 2013.- Vol. 89.- P.71–76.
375. Brakel, J. P. G. Robust peak detection algorithm using z-scores / J. P. G. Brakel // Stack Overflow. – 2014 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://stackoverflow.com/questions/22583391/peak-signal-detection-in-realtime-timeseries-data/22640362#22640362> (дата обращения: 20.05.2022).
376. Каламбет, Ю. А. Доверительные интервалы метода взвешенных квадратов и стратегия градуировки / Ю. А. Каламбет, С. А. Мальцев, Ю. П. Козьмин // Заводская Лаборатория. Диагностика Материалов. – 2015. – Vol. 81. – С. 69-76.

377. Auer, S. A self-triggered dust trajectory sensor / S. Auer, G. Lawrence, E. Grun [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. – 2010. – Vol. 622. – P. 74-82.

378. Сухачев, К.И. Разработка микроконтроллерного FMU ядра на базе ПЛИС для научной космической аппаратуры / К.И.Сухачев, Д.П.Григорьев, Е.В. Исмагилова // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ". — 2023. — Т. 16. № 5. — С. 12-23.

379.\* Воронов, К.Е. Моделирование движения заряженных микрочастиц в тракте ускорителя / К. Е. Воронов, А. В. Пияков, **А. М. Телегин** // Инженерная физика. — 2023. — № 2. — С. 31-37.

380. Hew, Y. M. Hypervelocity Impact Flash and Plasma on Electrically Biased Spacecraft Surfaces / Y. M. Hew, A. Goel, S. Close, N. Lee // International Journal of Impact Engineering. – 2018. – DOI 10.1016/j.ijimpeng.2018.05.008.

381. Акишин, А. И. Воздействие окружающей среды на материалы космических аппаратов / А. И. Акишин, Л. С. Новиков. – М.: Знание, 1983. – 64 с.

382. Никольский, В. В. Электродинамика и распространение радиоволн : учеб. пособие. – М.: Наука, 1973.

383. Тамм, И. Е. Основы теории электричества : учеб. пособие для вузов. – 11-е изд., испр. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 616 с.

384. Паршаков, А. Н. Принципы и практика решения задач по общей физике. Ч. 2: Электромагнетизм : учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – 313 с.

385. Semkin, N. D. A charged dust particle injector / N. D. Semkin, A. V. Piyakov, K. E. Voronov [et al.] // Instruments and Experimental Techniques. – 2006. – Vol. 49, Iss. 3. – P. 440-445.

386. Семкин, Н.Д. Электродинамический ускоритель для моделирования техногенных пылевых частиц и микрометеоритов / Н. Д. Семкин, А. В. Пияков // Актуальные проблемы ракетно-космической техники и ее роль в устойчивом социально-экономическом развитии общества : сборник материалов конференций, посвященная 50-летию образования ЦСКБ и 90-летию со дня рождения Д.И. Козлова, ФГУП "ГНПРКЦ "ЦСКБ - Прогресс", Самара, 28 сентября - 3 октября 2009 года. – С. 151-154.

387. Днищенко, В. А. Малошумящий широкополосный усилитель / В. А. Днищенко // Схемотехника. – 2003. – № 6. – С. 26.

388.\* **Телегин, А.М.** Моделирование наведённого заряда на измерительных электродах, используемых для регистрации параметров микрочастиц в тракте ускорителя / **А.М. Телегин**, Ф.С. Федотов // Инженерная физика. — 2023. — № 12. — С. 47-54.

389.\* Федотов, Ф. С. Моделирование магнитной ловушки для магнетронной распылительной системы (MPC) с помощью метода конечных элементов с использованием

модуля языка PYTHON / Ф. С. Федотов, **А. М. Телегин** // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. – 2023. – Т. 16, № 2. – С. 85-95.

390. Новиков Л.С. Космическое материаловедение. Учебное пособие. – М.: Макс Пресс, 2014. -448с.

391.\* Ускоритель высокоскоростных твердых частиц с контролем вектора скорости частиц: пат. 141790 Рос. Федерация / Н. Д. Семкин, **А. М. Телегин**, А. В. Пияков. – № 2013156607/07; заявл. 19.12.2013 ; опубл. 10.06.2014.

392.\* Пияков, А.В. Устройство для измерения координат пролета высокоскоростными микрочастицами тракта ускорителя / А.В.Пияков, **А.М.Телегин** // Всероссийская научно-техническая конференция "Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций". — 2019. — С. 126-127.

393.\* Воронов, К.Е. Научная аппаратура для исследования микрометеороидов и частиц космического мусора/К.Е.Воронов, **А.М.Телегин**, Дзян Ли Сян. // VI Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (VI Козловские чтения). — 2019. — Т. 1. — С. 107-109.

394. Sensor systems to detect impacts on spacecraft: Отчёто НИР (заключ.)/ Inter-Agency Space Debris Coordination Committee. - М., 2013. - 55 с. - Инв. №IADC-08-03.

395.\* Патент на изобретение 161144 Российская федерация, МПК В64G 1/22 , В64G 1/68. Космический аппарат для регистрации частиц космического мусора и микрометеороидов / Н.Д. Семкин, **А.М.Телегин**, Калаев М.П.; заявитель и патентообладатель СГАУ. -№ 2015112473/11; заявл. 06.04.2015; опубл. 10.04.2016, – 5с.

396. Rotov, S. V. Ion formation and the conductivity of an active film mim structure during through penetration of cosmic particles / S. V. Rotov, N. D. Semkin, K. E. Voronov // Technical Physics. – 2001. – Vol. 46, Issue 1. – P. 107-111.

397. Держиев, В. И. Излучение ионов в неравновесной плотной плазме / В. И. Держиев, А. Г. Жидков, С. И. Яковленко. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 160 с.

398. Close, S. Detection of electromagnetic pulses produced by hypervelocity micro particle impact plasmas / S. Close, I. Linscott, N. Lee [et al.] // Physics of Plasmas (1994-present). – 2013. – Vol. 20. – 092102.

399. Василяк, Л. М. Влияние околообъектовой среды на орбитальные космические аппараты / Л. М. Василяк, Е. В. Шубралова, В. Н. Чикирев // Прикладная физика. – 2024. – № 6. – С. 5-10.

400.\* Кривобоков, Е. Э. Погрешности регистратора параметров световых явлений, вызванных высокоскоростным ударом / Е. Э. Кривобоков, **А. М. Телегин** // Датчики и системы. – 2015. – № 8(195). – С. 8-11.

401. Полетаев, Б.И. Метод регистрации бомбардировки поверхности космического аппарата высокоскоростными частицами / Б. И. Полетаев, В. Д. Атамасов, В. Н. Баландин [и др.] // Журнал технической физики. – 2008. – Т. 78, Вып. 12. – С. 100-102.
402. Takano, T. Material dependence of microwave emission due to a hypervelocity impact / T.Takano, K. Maki, E. Soma, H. Ohnishi, K. Ishii, S. Chiba, A. Fujiwara, A. Yamori // Proceedings of the Fourth European Conference on Space Debris. – Дармштадт, Германия, 18-20 апреля, 2005.
403. Takano, T. Microwave emission due to hypervelocity impacts and its correlation with mechanical destruction/ Т.Takano, Y.Murotani, K.Maki, T.Toda, A.Fujiwara, S.Hasegawa, A.Yamori, H.Yano // Journal of Applied Physics.- 2002. -№ 92. -С. 5550-5554.
404. Schimmerohn, M. Using antennae for in-situ measurement of micrometeoroid and space debris impact / Martin Schimmerohn, Max Gulde, Alain Hilgers // Proceedings of the 7th European Conference on Space Debris. – Дармштадт, Германия, 18-21 апреля, 2017.
405. Кузелев, М.В. Спонтанное и вынужденное излучение электрона, электронного сгустка и электронного пучка в плазме/ М.В.Кузелев, А.А. Рухадзе//УФН. -2008. -Т.178, .№10. -С.1025-1055.
406. Коробов, А. И. Ультразвуковые волны в твёрдых телах / А. И. Коробов, А. А. Карабутов, О. А. Сапожников. – М.: Физический факультет МГУ, 2011.
- 407.\* Воронов, К. Е. Исследование алгоритмов для системы контроля поверхности космического аппарата на основе пьезодатчиков / К. Е. Воронов, Д. П. Григорьев, **А. М. Телегин** // Авиакосмическое приборостроение. – 2021. – № 1. – С. 40-50.
408. Capineria, L. A Real-time Electronic System for Automated Impact Detection on Aircraft Structures Using Piezoelectric Transducers/L. Capineria, A. Bullettia, M. Calzolaia, D. Francesconib // Procedia Engineering.-2014.-Vol.87.- P. 1243-1251.
409. Lei, Q. Research on Leakage Location of Spacecraft in orbit Based on Frequency Weighting Matrix Beam forming Algorithm by Lamb Waves / Q. Lei, Y. Zeng, L. Sun [et al.] // Applied sciences. – 2020. – 15 P.
410. Ciampa, F. A new algorithm for acoustic emission localization and flexural group velocity determination in anisotropic structures / F. Ciampa, M. Meo // Composites. – 2010. – Part A 41. – P. 1777-1786.
411. Сёмкин, Н.Д. Методы и средства определения утечки воздуха из модулей космической станции / Н.Д. Сёмкин, К.Е. Воронов, А.Н. Занин, И.В. Пияков// Прикладная физика. - 2006. - №2. - С.108-121.
412. Tobias A. Acoustic-emission source location in two dimensions by an array of three sensors // Non-destructive testing. - 1976.- P. 9 - 12.

413. Ebrahimkhanlou, A. Probabilistic framework for single-sensor acoustic emission source localization in thin metallic plates / A. Ebrahimkhanlou, S. Salamonel // *Smart Materials and Structures*. - 2017. -26 p.

414.\* Борисенков, И.Л. Сенсорная система на основе внутриволоконных брэгговских решеток и интеррогатора со спектрально-временным разделением каналов / И.Л. Борисенков, К.Е. Воронов, Г.И.Леонович, М.П. Калаев, **А.М. Телегин** // *Нано- и микросистемная техника*. – 2021. – Т. 23, № 5. – С. 247-254.

415.\* Гречишников В.М. Прибор для диагностики состояния поверхности космического аппарата/В.М. Гречишников, О.В. Теряева, М.П. Калаев, **А.М. Телегин** // *Южно-Сибирский научный вестник*. – 2025. – № 2. – с. 134-140.

416. Javier, G. / G. Javier, Z. Joseba, A. Gerardo [et al.] // *OSA / Sensors*. – 2010. – P. 1.

417. Steven L. Rickmana, W. Lance Richards, Eric L. Christiansen, Anthony Piazzac, Francisco Penac, Allen R. Parker // *Procedia Engineering*. 2017. № 188. P. 233 – 240.

418. Bauer, W. Debris In-Situ Impact Detection By Utilization Of Cube-Sat Solar Panels / W. Bauer, O. Romberg, H. Krag [et al.] // *Conference: Small Satellites Systems and Services Symposium*. – Valletta, Malta.

419. Hedley, M. Sensor Network for Structural Health Monitoring / M. Hedley, N. Hoshke, M. Johnson, C. Lewis, A. Murdoch, D. Price, M. Prokopenko, A. Scott, P. Wang, A. Farmer // *Proceedings of the 2004 Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing Conference*, Мельбурн, Австралия, 14-17 декабря 2004.

420. Howell, P.A. Infrared on-orbit inspection of shuttle orbiter reinforced carbon-carbon using solar heating / P. A. Howell, W. P. Winfree, K. Elliott Cramer // *Optics and Photonics 2005*, Сан-Диего, Калифорния, США

421. Патент № 2691657 С1 Российская Федерация, МПК G01T 1/185. Устройство контроля герметичности элементов конструкции космического аппарата (КА) : № 2018126728 : заявл. 19.07.2018 : опубл. 17.06.2019 / К. Е. Воронов, В. А. Авдеев, А. В. Тютюрев; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва".

422. Yeager, M. Impact detection and characterization in composite laminates with embedded fiber Bragg gratings / M.Yeager, A. Whittaker, M.Todd, H.Kim, C.Key, W. Gregory // *Procedia Engineering*. 2017. -№ 188. -С. 156-162.

423. Ebrahimkhanlou, A. Single-Sensor Acoustic Emission Source Localization in Plate-Like Structures Using Deep Learning/ A. Ebrahimkhanlou, S.Salamonel// *Aerospace*. -2018. -P. 5 - 50.

424. Матвиенко, Ю.Г. Определение скорости распространения волнового пакета в композитных материалах/ Ю.Г.Матвиенко, В.И.Иванов, И.Е.Васильев, Д.В.Чернов, И.В. Мищенко // Приборы и техника эксперимента. -2020.- №1. -С. 115-120.

425.\* Устройство регистрации параметров микрометеороидов и космического мусора : пат. 2456639 Рос. Федерация / Н. Д. Семкин, **А. М. Телегин**, К. И. Вергунец [и др.]. – № 2010150983/28 ; заявл. 13.12.2010 ; опубл. 20.07.2012.

426. Изюмов, М. В. Устройства регистрации частиц космического мусора и микрометеороидов : специальность 01.04.01 "Приборы и методы экспериментальной физики" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Изюмов Михаил Владимирович. – Самара, 2011. – 232 с.

427. Абрашкин, В. И. Определение вращательного движения малого космического аппарата Аист-2Д по данным магнитных измерений / В. И. Абрашкин, К. Е. Воронов, А. С. Дорофеев [и др.] // Космические исследования. – 2019. – Т. 57, № 1. – С. 61-73.

428. Седельников, А. В. Программно-аппаратное средство контроля параметров вращательного движения малого космического аппарата / А. В. Седельников, А. С. Филиппов, Ю. Я. Пузин [и др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2018. – № 10. – С. 1-9.

429. Белоусов, А. И. Анализ вращательного движения малых космических аппаратов серии "Аист" / А. И. Белоусов, Н. Д. Семкин, А. В. Седельников [и др.] // Авиакосмическое приборостроение. – 2017. – № 8. – С. 3-10.

430. Семкин, Н. Д. Измерение параметров магнитного поля и анализ возмущений на борту малых космических аппаратов "Аист" / Н. Д. Семкин, В. В. Сазонов, К. Е. Воронов [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2015. – Т. 18, № 4. – С. 67-73.

431.\* Малый космический аппарат для регистрации частиц космического мусора и микрометеороидов/Семкин Н.Д., **Телегин А.М.**//Патент на изобретение RU 2598978 С1, 10.10.2016. Заявка № 2015127393/28 от 07.07.2015.

432.\* Космический аппарат для регистрации частиц космического мусора и микрометеороидов/Семкин Н.Д., **Телегин А.М.**, Калаев М.П.//Патент на полезную модель RU 161144 U1, 10.04.2016. Заявка № 2015112473/11 от 06.04.2015.

433.\* Устройство контроля герметичности элементов конструкции космического аппарата (КА)/Семкин Н.Д., **Телегин А.М.**//Патент на изобретение RU 2540066 С1, 27.01.2015. Заявка № 2013132221/28 от 11.07.2013.

434.\* Малый космический аппарат для регистрации частиц космического мусора и микрометеороидов/**Телегин А.М.**//Патент на полезную модель RU 176981 U1, 05.02.2018. Заявка № 2016141236 от 19.10.2016.

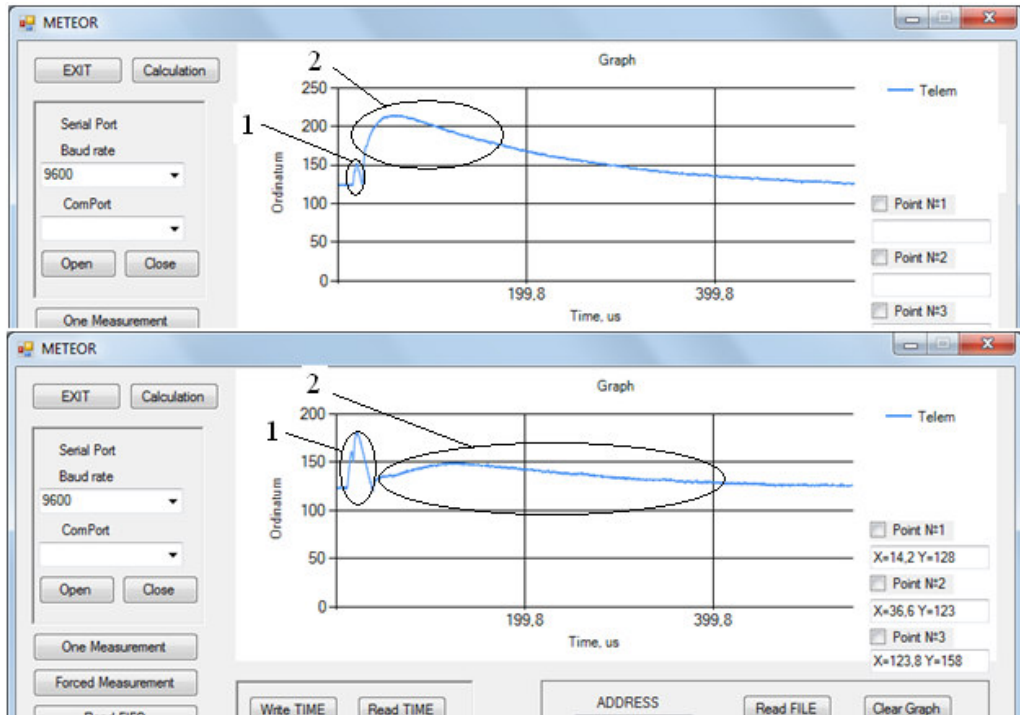
435.\* **Telegin, A.M.** The behavior of film structures metal-dielectric-metal in conditions of high-speed dust /**Telegin A.M.**, Semkin N. D.,Novikov L.S. // European Space Agency, (Special Publication) ESA SP. — 2013. — Vol. 705 SP.

436.\* **Телегин, А. М.** Аппаратная реализация модулей записи и обработки данных с ионизационного датчика микрометеороидов и частиц космического мусора/ А.М. Телегин, М.П. Калаев, Е.В. Телегина, Л.В. Николаев // Инженерная физика. – 2026. – № 3. – С. 30-40.

437.\* Калаев, М.П. Разработка и оптимизация параметров первичного преобразователя для регистрации микрометеоритов и частиц космического мусора / М.П. Калаев, **А.М. Телегин** // Радиотехника и электроника / Journal of Communication Technologies and Electronics. -2026. -Т. 71, № 2. -С. 249–260.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Методика обработки данных с датчика



1 – наведенный импульс, 2 – ионизационный импульс

Рисунок А1 – Скриншоты программы

Согласно полученным данным (рисунок А1) сигнал от высокоскоростной микрочастицы состоит из наведенного (1) и ионизационного (2) импульсов. Форма наведенного импульса “одногоорбая” или “двугорбая”.

Скорость микрочастицы оценивалась по длительности наведенного импульса. Общее количество образовавшихся ионов пропорционально площади под кривой ионизационного импульса (рисунок Б1):

$$Q = \sum_{i=1}^{N_{\max}} U[i] \cdot \Delta T$$

где  $i$  – номер отсчета,  $U[i]$  - значение  $i$  - отсчета,  $\Delta T$  - шаг дискретизации (примем его равным 1),  $N_{\max}$  - максимальное количество отсчетов.

Массу микрочастиц можно оценить согласно данным, полученных с ускорителя частиц:

$$m = \rho \cdot \frac{4\pi}{3} \cdot \left( \frac{3\varepsilon\varepsilon_0 E_n}{\rho \cdot Q/m} \right)^3,$$

где  $\rho$  - априори известная или заданная плотность микрочастицы,  $\varepsilon$  - диэлектрическая проницаемость материала частицы,  $E_n = 2 \cdot 10^9 \text{ В/м}$  - поверхностная напряженность электрического поля,  $Q/m$  – отношение заряда микрочастицы к его массе.

Была проведена серия экспериментов с мишенями из различного материала (медь, нержавеющая сталь и АМГ-6).

Часто, для установления связи между параметрами ускоренной микрочастицы и суммарным зарядом ионов, используется простая формула:

$$Q^+ = C_1 \cdot m^\alpha \cdot V^\beta,$$

где  $\alpha = 0,9 \pm 0,1$ ,  $\beta$ ,  $C_1$ - постоянные, зависящие от свойств материала мишени, ударника и конструкции ионизационного детектора:  $m$ ,  $V$ – масса и скорость частицы при ударе соответственно.

Результаты исследования и полученные расчетные соотношения приведены на рисунке А2.

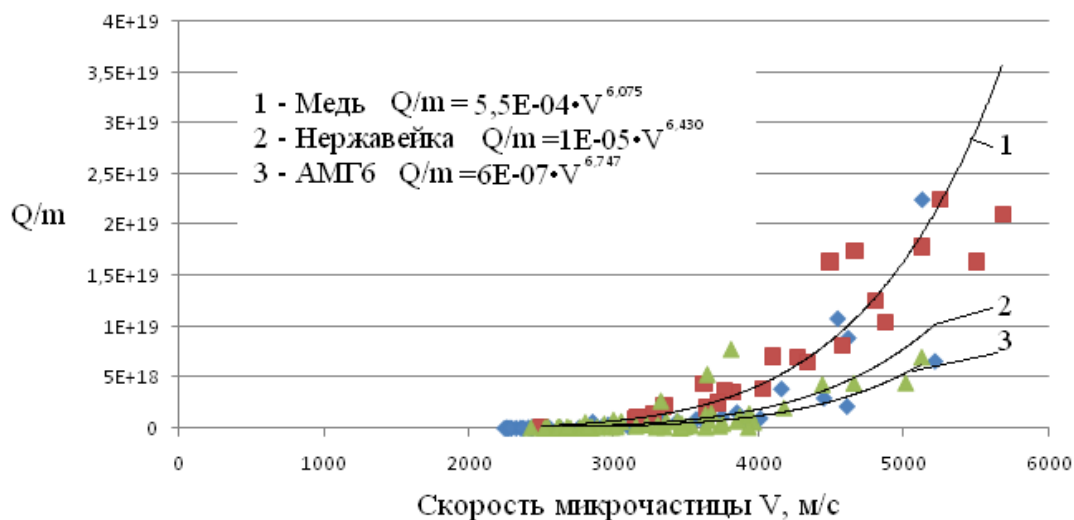


Рисунок А2 - Графики зависимости  $Q/m$  от  $V$

### Методика оценки параметров микрочастиц

1) Определяется скорость микрочастицы, согласно оценки длительности наведенного импульса:

$$V = D/\tau,$$

где  $D = 38 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $\tau$  - длительность наведенного импульса, которая определяется по рисунку А1.

2) Выбираем предполагаемый материал и по графику (рисунок А2), определяется отношение  $Q/m$ .

3) Оценивается  $Q$  Согласно выражению:  $Q = \sum_{i=1}^{N_{\max}} U[i] \cdot \Delta T$

4) Оцениваете масса согласно выражению:  $m = \frac{Q}{Q/m}$ .

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Акты внедрения



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

/Гаврилов А.В.

05 2026 г.

## АКТ

о внедрении результатов диссертационного исследования в учебный процесс

Результаты диссертационного исследования по теме «РАЗРАБОТКА МЕТОДИК, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСТАНОВОК И БОРТОВЫХ ПРИБОРОВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МИКРОМЕТЕОРОИДОВ И ЧАСТИЦ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА», выполненного на кафедре радиоэлектронных систем, внедрены в учебный процесс на кафедре радиоэлектронных систем института информатики и кибернетики на основании решения кафедры (протокол № 9 от «9» 04 2026 г.).

Указанные результаты включены в курс «Электромагнитная совместимость бортовых электронных средств», направления подготовки 11.04.03 Конструирование и технология электронных средств.

Заведующий кафедрой

[Signature] /Зеленский В.А.  
«21» 05 2026 г.

Соискатель ученой степени

[Signature] /Телегин А.М.  
«21» 05 2026 г.

Начальник методического отдела  
учебно-методического управления  
к.т.н., доцент

[Signature] /Вдовин Р.А.  
«21» 05 2026 г.

Начальник отдела сопровождения  
научных исследований  
к.т.н., доцент

[Signature] /Родионов Л.В.  
«21» 05 2026 г.

  
**ГОНЕЦ**  
 СПУТНИКОВАЯ СИСТЕМА  
 Акционерное общество  
 «Спутниковая система «Гонец»  
 (АО «СС «Гонец»)

Бауманская ул., д. 53/2,  
 г. Москва, 105005  
 Тел./факс: 8 (495) 745-50-60  
 e-mail: info@gonets.ru

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель  
 генерального директора  
 АО «Спутниковая система «Гонец»

  
 О.И. Химочко  
 «06» 06 2026 г.  


**АКТ**  
 о внедрении в АО «СС «Гонец»  
 результатов диссертационного исследования  
 по теме «Разработка методик, экспериментальных установок и бортовых приборов  
 для регистрации параметров микрометеороидов и частиц космического мусора»

Настоящий Акт составлен в том, что отдельные научные и научно-прикладные результаты диссертации Телегина А.М. внедрены в АО «СС «Гонец» при выполнении работ по созданию перспективных спутниковых систем связи (ССС).

В частности, результаты исследований позволили уточнить и обосновать тактико-технические требования к КА СССР и высоты орбит функционирования КА СССР.

Начальник управления реализации  
 федеральных проектов и перспективных  
 программ



Р.Ю. Романов

Начальник отдела радиочастотного  
 обеспечения и лицензирования



Е.Э. Кривобоков

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Достижения



МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ  
САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ

**ПОЧЕТНАЯ  
ГРАМОТА  
ТЕЛЕГИНУ  
АЛЕКСЕЮ МИХАЙЛОВИЧУ**

к.ф.-м.н., доценту кафедры конструирования и технологии электронных систем и устройств Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева»

*за добросовестный труд и выдающиеся научно-технические достижения в аэрокосмической области и в связи с профессиональным праздником - Днем космонавтики*

Врио министра промышленности и торговли Самарской области



А.Ю.Шамин

Самара 2021 год

Международная научно-техническая выставка  
«НАУКА И ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВУ XXI ВЕКА»



25 мая 2017 г.

Пенза 2017

II степени

Награждаются Бонячук А.А., Телегин А.М.  
(Самарский университет)

Участники выставки

«НАУКА И ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВУ XXI ВЕКА»

проводимой в рамках Международного симпозиума

«НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО 2017»

за лучший экспонат

Пленочный датчик высокоскоростных частиц

Председатель оргкомитета  
Заслуженный деятель науки РФ  
академик АПК РФ, АИО, АИО  
д.т.н., профессор



*Н.К. Юрков*  
Н.К. ЮРКОВ



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

## ПОЧЁТНАЯ ГРАМОТА

Телегин  
Алексей Михайлович

награждается

за большой вклад в укрепление научного и  
образовательного потенциала университета,  
эффективное участие в решении задач  
аэрокосмического направления, создания  
группировки университетских спутников  
и в связи с 55-ой годовщиной первого полёта  
человека в космос

Ректор СГАУ

Шахматов Е.В.



12.04.2016г.



Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего профессионального образования  
"САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
имени академика С.П. Королева  
(национальный исследовательский университет)"

# Почетная грамота

*награждается*

**Шелегин  
Алексей Михайлович**

*старший научный сотрудник*

*В связи с празднованием Дня космонавтики, а  
также с успешным проведением космических  
экспериментов на КА «Бион», «Ресурс ДК 1»,  
«Ресурс П», МКА «Аист»*



Ректор СГАУ

*Е.В. Шахматов*  
Е.В. Шахматов



ЦСКБ ПРОГРЕСС



Федеральное государственное унитарное предприятие  
 «ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ  
 РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКИЙ ЦЕНТР «ЦСКБ-ПРОГРЕСС»

# ПОЧЕТНАЯ ГРАМОТА

НАГРАЖДАЕТСЯ

**ТЕЛЕГИН**

**Алексей Михайлович**

*ассистент кафедры КиПРЭС  
 СГАУ им. академика С. П. Королева*

за актуальность, новизну и оригинальность разработки,  
 представленные в докладе, сделанном на III Всероссийской  
 научно-технической конференции  
 «Актуальные проблемы ракетно-космической техники»  
 (III Козловские чтения, 16 – 20 сентября 2013 г.).

Генеральный директор

**А. Н. КИРИЛИН**

Генеральный конструктор

**Р. Н. АХМЕТОВ**

г. Самара