

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Самара – 2026

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева» (Самарский университет) на кафедре радиоэлектронных систем.

Научный консультант:

Казанский Николай Львович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры технической кибернетики Самарского университета.

Официальные оппоненты:

Боровик Сергей Юрьевич, доктор технических наук, Институт проблем управления сложными системами Российской академии наук – обособленное подразделение федерального государственного бюджетного учреждения науки Самарского федерального исследовательского центра Российской академии наук, директор;

Сахабутдинов Айрат Жавдатович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева–КАИ», профессор кафедры радиотоники и микроволновых технологий;

Трушляков Валерий Иванович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», профессор кафедры «Авиа и ракетостроения».

Ведущая организация:

акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», г. Королёв.

Защита состоится 16 октября 2026 года в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.2.379.01, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева»: https://ssau.ru/files/resources/dis_protection/Telegin_A_M_Razrabotka_metodik_eksperimentalnyh.pdf.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2026 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета 24.2.379.01

В.Н. Матвеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В настоящее время космические аппараты (КА) и размещаемое 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: распространении 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 производятся десятки ракетоносителей и спутников, 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 мультимплексоров.

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 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, соосной 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 позволит 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 2π 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 позволяют совершенствовать 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 аппарата «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). Многообразия 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 $T_{[мкс]} = 12500 / V[м/с]$, 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 АМГ6).

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 м², 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 пленочная структурой металл-диэлектрик-металл зонтичной конструкции и блоком управления системой, блок формирования питания, соединенный с солнечной батареей и блоком управления системой, добавлен приемно-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 подтверждается воспроизводимостью экспериментальных и расчетных данных, полученных на сертифицированных приборах, а также соответствием полученных результатов работам других авторов в данной области исследования, обсуждением результатов диссертации на международных и отечественных конференциях.

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 плёночных 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 EICon) (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; ктуальные 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. Область исследования по содержанию, объекту и предмету соответствует 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, - направлений исследования паспорта научной специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики (технические науки).

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 заключается в проведении анализа литературных и электронных источников, получении аналитических результатов, проведении численного и экспериментального моделирования, участии 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 сокращений и условных обозначений, списка литературы, трех приложений. Текст изложен на 325 страницах машинописного текста, содержит 217 рисунков, 9 таблиц, список литературы из 437 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность темы, новизна, теоретическая и практическая значимость и достоверность результатов работы. Проведён обзор научной литературы по теме диссертационного исследования, сформулированы цель и задачи диссертации, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены методы регистрации пылевых микрочастиц (микрометеороидов и частиц космического мусора). В диссертации приведено обоснование актуальности исследования, включающее анализ угроз от микрометеороидов и космического мусора для конструкционных материалов и оборудования спутников. Соискателем детально систематизированы сведения о физических эффектах, лежащих в основе работы датчиков высокоскоростных микрочастиц.

Соискателем разработана структурная схема прибора для регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора, в котором в качестве чувствительного элемента для детектирования факта удара высокоскоростной микрочастицы предлагается использовать металлическую полосу (дорожку), расположенную на диэлектрическом основании, при этом диэлектрическая подложка с другой стороны металлизирована (рис.1). Принцип работы прибора следующий: 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 металлической полосы 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-поверочной 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.

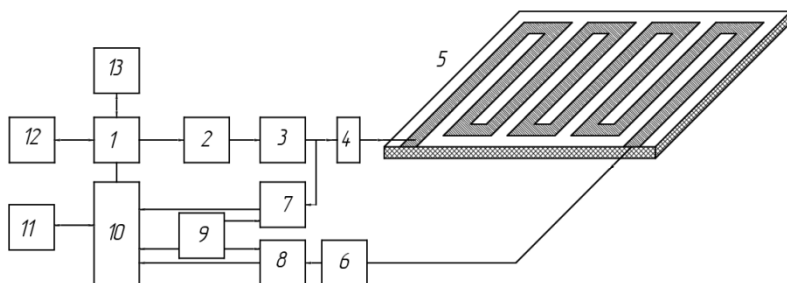


Рисунок 1 – Структурная схема датчика: 1 – микроконтроллер, 2 – управляемый генератор, 3 – согласующий усилитель, 4 – индуктивность, 5 – изогнутый металлический полосок, 6 – усилитель, 7 – АЦП №1, 8 – АЦП №2, 9 – тактовый генератор, 10 – ПЛИС, 11 – ОЗУ, 12 – интерфейс обмена с бортовым компьютером, 13 – интерфейс обмена с контрольно-поверочной аппаратурой

Операция повторяется до тех пор, пока не пройдут измерения в диапазоне от низкой частоты ω_0 до высокой частоты ω_N с шагом $\Delta\omega_i$. Для проведения экспериментов соискателем был изготовлен опытный образец датчика (рис. 2-3), 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. Удар высокоскоростной микрочастицы приводит к образованию разрыва металлического полоска. В радиотехнической модели данный разрыв можно представить в виде компланарной емкости, включенной последовательно, 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

$$T_1 = \begin{vmatrix} \frac{2+Z_1}{2} & -\frac{Z_1}{2} \\ \frac{Z_1}{2} & \frac{2-Z_1}{2} \end{vmatrix}, T_2 = \begin{vmatrix} e^{i\theta_1} & 0 \\ 0 & e^{-i\theta_1} \end{vmatrix}, T_3 = \begin{vmatrix} \frac{2+Z_2}{2} & -\frac{Z_2}{2} \\ \frac{Z_2}{2} & \frac{2-Z_2}{2} \end{vmatrix}, T_4 = \begin{vmatrix} e^{i\theta_4} & 0 \\ 0 & e^{-i\theta_4} \end{vmatrix},$$

$Z_1 = \frac{i \cdot \omega \cdot L}{Z_0}$, $Z_2 = \frac{1}{Z_0} \cdot \frac{1}{i \cdot \omega \cdot C_{cr}}$, 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, $\theta_1 = \frac{2\pi}{\Lambda} \cdot l_1$, $\theta_2 = \frac{2\pi}{\Lambda} \cdot l_2$, $\Lambda = \frac{c}{f \cdot \sqrt{\epsilon}}$, ϵ – диэлектрическая

проницаемость среды. T_{01}, T_{10} – матрицы передач, учитывающие, что сопротивление измерителя коэффициента передачи не согласовано с сопротивлением датчика.

$$C_{cr} = \begin{cases} \frac{\varepsilon_r'}{120 \cdot c \cdot \ln\left(2 \cdot \frac{1+\sqrt{k}}{1-\sqrt{k}}\right)}, \text{ при } \frac{1}{\sqrt{2}} \leq k \leq 1 & k = \frac{s}{s+w}, k' = \sqrt{1-k^2}, \\ \frac{\varepsilon_r' \cdot \ln\left(2 \cdot \frac{1+\sqrt{k'}}{1-\sqrt{k'}}\right)}{377\pi \cdot c}, \text{ при } 0 \leq k \leq \frac{1}{\sqrt{2}} & \varepsilon_r' = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} \cdot [\tanh(0,775 \cdot \ln(h/w) + 1,75) + bp] \\ & bp = \frac{k \cdot w}{h} (0,04 - 0,7k + 0,01 \cdot (1 - 0,1\varepsilon_r)(0,25 + k)) \end{cases},$$

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

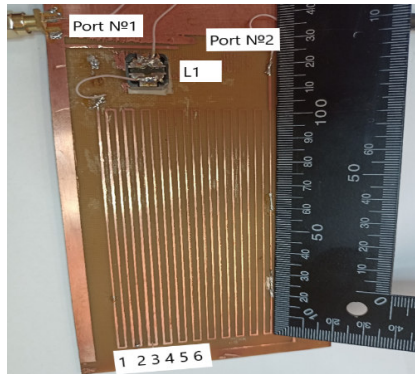


Рисунок 2 – Фотография экспериментального прототипа датчика: Port№1 и Port№2 – порты подключения спектроанализатора; $L1=150$ мкГн – дискретная индуктивность; 1,2,3,4,5,6 – номера позиций, которые разрушались механически путем разрезания

Коэффициент передачи со входа на выход можно рассчитать согласно выражению

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

Исследование коэффициента передачи прототипа датчика в зависимости от частоты проводилось с использованием спектроанализатора RIGOL DSA875, который был подключен к разъемам PORT №1 и PORT №2 (рис. 2). При этом мощность тестового сигнала со спектроанализатора была -20дБм (0,01 мкВт) (рис.3). Разрушение проводника производилось с помощью скальпеля. Для смещения резонансной частоты в низкочастотный диапазон и формирования требуемого сигнала в схему соискателем было предложено добавить последовательно включенную катушка индуктивности, что позволило реализовать систему обработки информации на базе доступных низкочастотных радиоэлементов.

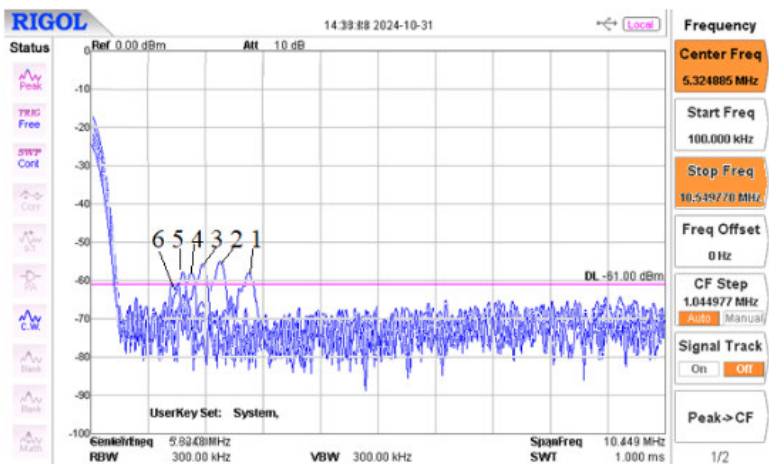


Рисунок 3 – Резонансы коэффициента передачи прототипа датчика последовательно включенной индуктивностью: 1 – была разорвана точка №1; 2 – №2; 3 – №3; 4 – №4; 5 – №5; 6 – №6 (согласно рис. 2)

В диссертации было также предложено в качестве первичного преобразователя прибора для регистрации высокоскоростных микрочастиц использовать пленочную катушку индуктивности. При ударе высокоскоростной микрочастицы в металлический полосок происходит образование кратера, приводящего к его разрыву (рис. 4-6). Для проведения испытаний соискателем был изготовлен опытный образец круглой катушки индуктивности диаметром 100 мм. Ширина металлического полоска составила ~200 мкм, ширина между полосками ~250 мкм. Нумерация витков ведется начиная с внешнего диаметра катушки. В диссертации приведены результаты экспериментального измерения АЧХ и ФЧХ тонкоплёночного датчика с использованием векторного анализатора LiteVNA64, подключенного к персональному компьютеру. На рис. 6 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. 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. 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 20кГц, что также позволяет определить сектор попадания частицы, однако с меньшей точностью.

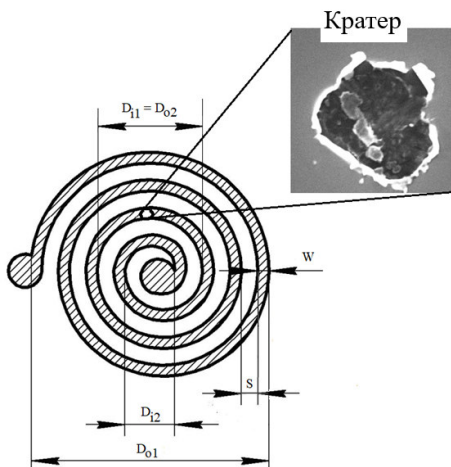


Рисунок 4 – Катушка индуктивности с кратером

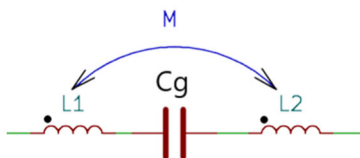
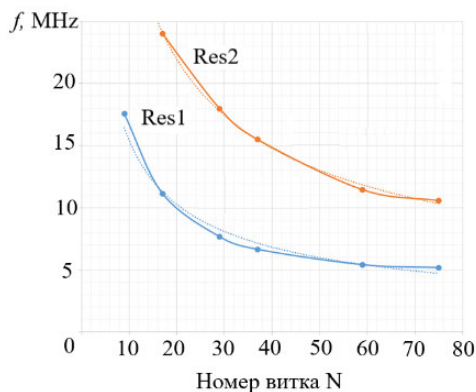


Рисунок 5 – Эквивалентная схема разорванной катушки



$$\text{Res1} - f = 59,886 \cdot N^{-0,589} (R^2 = 0,9784) ;$$

$$\text{Res2} - f = 121,34 \cdot N^{-0,571} (R^2 = 0,9959)$$

Рисунок 6 – Зависимость резонансной частоты датчика от положения точки разрыва

Емкость разрыва можно оценить согласно выражению

$$C_g = \frac{1}{2} C_{\text{even}}, C_{\text{even}} = W \cdot \left(\frac{S}{W} \right)^{m_e} \cdot e^{K_e} \cdot \left(\frac{\varepsilon}{9,6} \right)^{0,9} n\Phi$$

$$m_e = \frac{1,565}{\left(\frac{W}{h} \right)^{0,16}} - 1, \text{ при } 0,3 \leq \frac{S}{W} \leq 1, K_e = 1,97 - \frac{0,03}{\frac{W}{h}}, \text{ при } 0,3 \leq \frac{S}{W} \leq 1.$$

где S – ширина разрыва металлического полоска, равная диаметру кратера от высокоскоростного соударения, ε – диэлектрическая проницаемость, h – высота диэлектрической подложки, W – ширина металлического полоска.

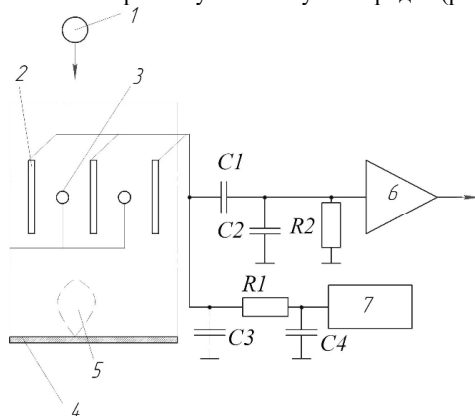
Во второй главе рассмотрены общие принципы построения приборов ионизационного типа для регистрации пылевых микрочастиц. Рассмотрим принцип работы датчика ионизационного типа (рис.7). Когда заряженная микрочастица 1 пролетает через систему электродов 2 и 3 на измерительных электродах 2 наводится импульс напряжения, параметры которого можно рассчитать с использованием теоремы Рамо-Шокли. При высокоскоростном ударе микрочастицы в мишень 4 образуется «плазменное облако», которое под действием приложенного напряжения собирается на измерительных

электродах. Скорость ионов после удара распределяется по частицам согласно распределению Максвелла-Больцмана:

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

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

С точки зрения приемника ионов желательно, чтобы площадь приема ионов была как можно больше, а с точки зрения усиления сигнала, чтобы входная емкость была минимальной. Эти два условия в некотором виде противоречат друг другу, так как увеличение площади электродов приводит к увеличению емкости электродов. Было предложено использовать комбинированную систему электродов (рис.7)



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 7 – Схема измерения

Соискателем была разработана и изготовлена научная аппаратура «МЕТЕОР» для малого космического аппарата (МКА) «АИСТ-1Т», состоящая из 6 многопараметрических датчиков (МТ) и установленная на его различных гранях (рис.8). МТ предназначены 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. Датчик высокоскоростных пылевых частиц использует эффект ионизации вещества частицы и мишени с площадью ~ 185 см². В среднем за месяц работы регистрировалось 2 частицы на один датчик. В датчиках используется адаптивная методика обработки сигналов, позволяющая изменять

коэффициент усиления канала измерения ионизационного импульса в зависимости от помех, вызванных влиянием засветки от Солнца.

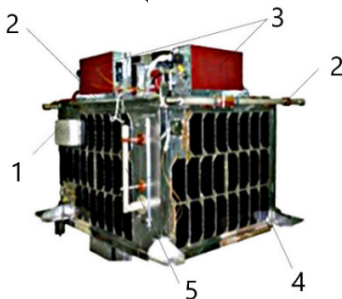


Рисунок 8 – Фотография МКА «АИСТ»: 1 – антенна навигационной аппаратуры; 2 – антенное приемное устройство командно-управляющей навигационной системы; 3 – научная аппаратура «МЕТЕОР»; 4 – солнечная батарея; 5 – антенное передающее устройство командно-управляющей навигационной системы

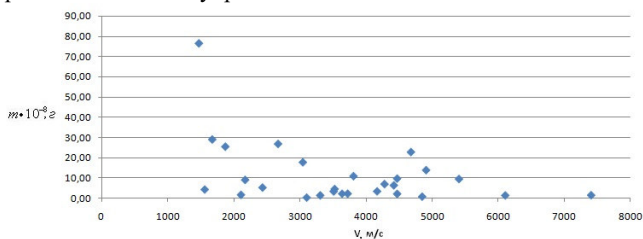


Рисунок 9 – Соотношение между массой и скоростью зарегистрированных частиц

Соискателем был разработан и изготовлен прибор ионизационного типа с пластинчатыми электродами (рис.10), с которым были проведены ряд экспериментальных исследований на электродинамическом ускорителе микрочастиц Самарского университета. В эксперименте наблюдалось несколько вариантов развития событий, показанных на рис.11-14. При проведении эксперимента скорость высокоскоростной микрочастицы была оценена по наведенному заряду путем измерения длительности наведенного импульса (зависимости длительности пролетного импульса от скорости частицы $T = 12500/V$).



Рисунок 10 - Фотографии прибора

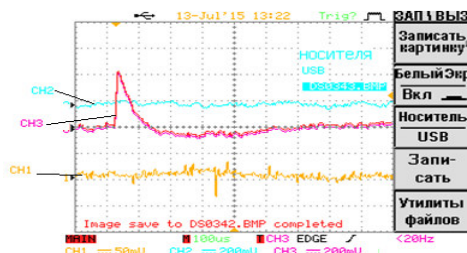


Рисунок 11 – Осциллограмма, когда микрочастица ударяется в кольца Фарадея

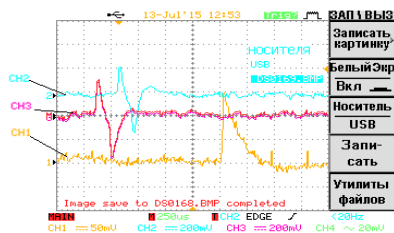


Рисунок 12 – Микрочастица ударяется в собирающие электроды

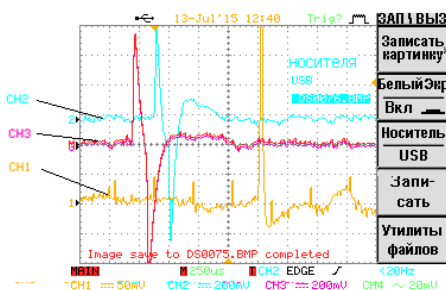


Рисунок 13– Микрочастица пролетает через собирающие электроды при этом наводя на них заряд, при этом не наблюдается ионизационный импульс

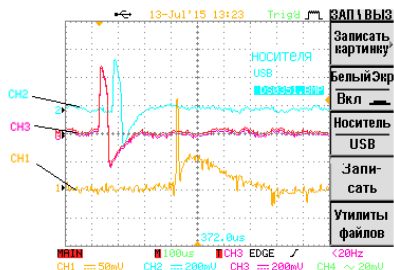


Рисунок 14 – Микрочастица пролетает через собирающие электроды при этом наводя на них заряд, при этом наблюдается ионизационный импульс

В диссертации на основе теоремы Рамо-Шокли была предложена оценка форм наведенных импульсов напряжения для прибора с пластинчатыми электродами (рис.15-18), которое позволило объяснить форму импульсов в зависимости от траектории полета микрочастицы. Согласно рис.16, 18 определение траектории микрочастицы зависит от отношения A/B .

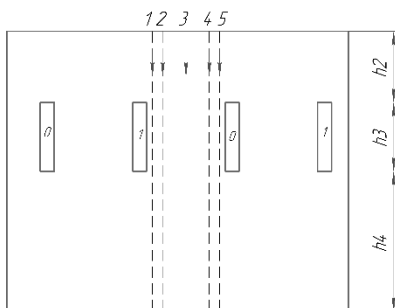


Рисунок 15 – Траектории полета микрочастицы в датчике. 0 – нулевой электрод, 1 – электрод, на котором измеряется наведенный сигнал

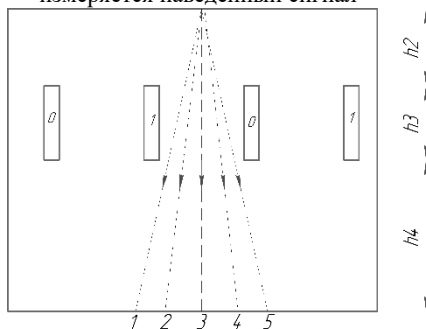


Рисунок 17 – Траектории полета микрочастицы в датчике при вариации угла влета (1 – (-10 градусов); 2 – (-5 градусов); 3 – (0 градусов); 4 – (+5 градусов); 5 – (+10 градусов)). 0 – нулевой электрод, 1 – электрод, на котором измеряется наведенный сигнал

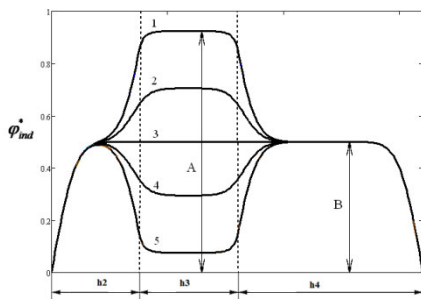


Рисунок 16 – Рассчитанные осциллограммы наведенного на электродах потенциала в координатах расстояния (нумерация траекторий соответствует рис. 15)

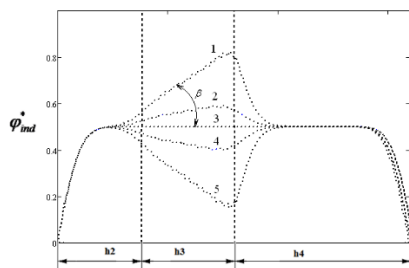
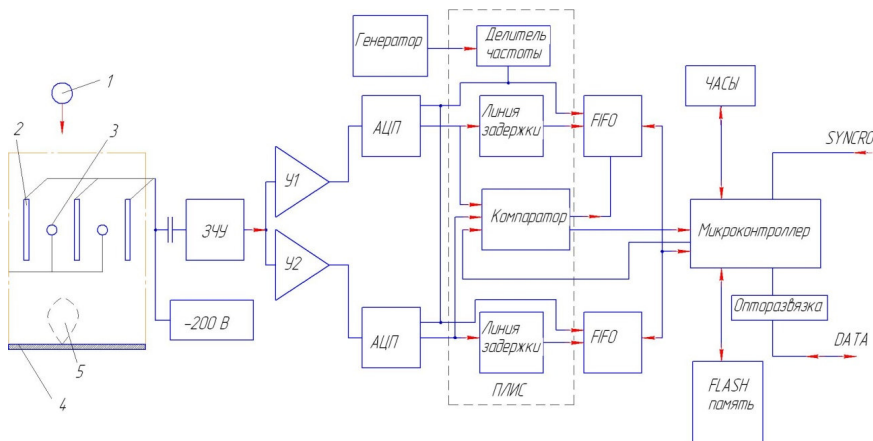
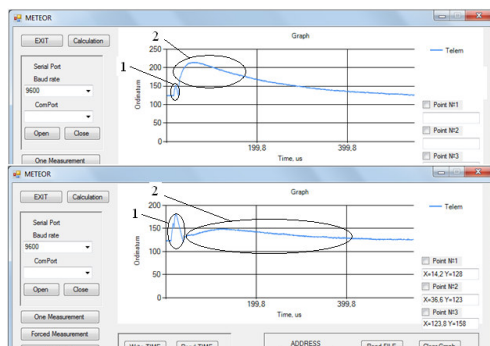


Рисунок 18 – Рассчитанные осциллограммы наведенного на электродах потенциала в координатах расстояния (нумерация траекторий соответствует рис. 17)

Соискателем был также разработан прибор (научная аппаратура) для регистрации и исследования параметров высокоскоростных микрочастиц с использованием ионизационного принципа измерения с комбинированной системой электродов (рис. 19-21). Для представления экспериментальных данных в наглядном виде написана программа, скриншоты которой представлены на рис. 20. Программа отображает записанные ионизационные и наведенные импульсы в графическом виде.



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

Скорость микрочастицы оценивалась по длительности наведенного импульса. Общее количество образовавшихся ионов пропорционально площади под кривой

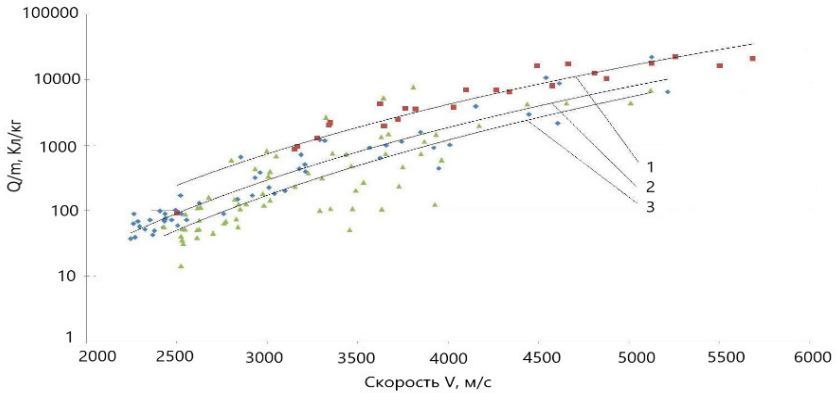
$$Q = \sum_{i=1}^{N_{\max}} U[i] \cdot \Delta T$$

ионизационного импульса (рис. 22): $\sum_{i=1}^N U[i]$, где i – номер отсчета, $U[i]$ – значение i - отсчета, ΔT – шаг дискретизации, $N_{\max}$ – максимальное количество отсчетов.

Массу микрочастиц можно оценить согласно данным, полученным с укорителя микрочастиц:

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

где ρ – априори известная или заданная плотность микрочастицы, ε – 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.



1 – Мишень: Медь, отношение общего заряда 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: АМГб, $Q^+ / m = 6 \cdot 10^{-22} \cdot V^{6,75}$

Рисунок 22 – Графики зависимости Q/m от V

Третья глава посвящена приборам для регистрации высокоскоростных микрочастиц пролетного типа. В главе предложена концепция прибора, основанная на явлении электростатической индукции (рис. 23), который конструктивно состоит из отдельных модулей-сеток (1-10), к которым при необходимости подключаются предусилители. 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 координатам пролета микрочастицы. Путем обработки сигналов с этих электродов выносится решение о месте пролета микрочастицы: 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. Для проверки

Высокоскоростная заряженная микрочастица, пролетая через данные сетки по траектории 7, наводит на каждую сетку импульс тока, форма которого близка к колокообразной, и параметры которого пропорциональны скорости и заряду этой микрочастицы. Пик сигналов с сеток соответствует моменту пролета частицы через сетку, что позволяет фиксировать момент пролета. Сетки 1 и 6 расположены в плоскостях, параллельных 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 . В рассматриваемой конструкции углы A и B равны 15 градусам. На рис. 24, 25 показано размещение разработанного прототипа датчика в вакуумной камере ускорителя микрочастиц.

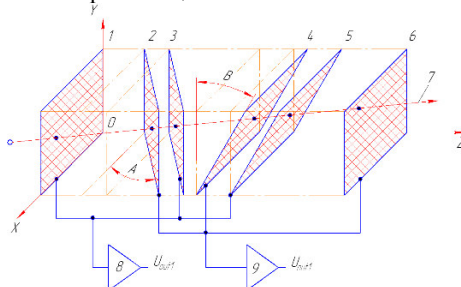


Рисунок 24 – Структурная схема датчика измерения вектора скорости
микрочастиц

На рис. 26 представлены результаты записанных пролетных импульсов с колец Фарадея (K1, K2) и сеток C1- C6.

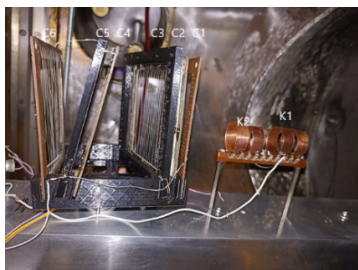


Рисунок 25 – Фотографии прототипа датчика вектора скорости микрочастиц, установленного в вакуумной камере ускорителя (вид с боку)

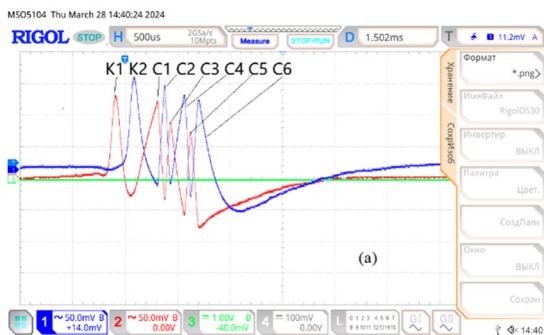


Рисунок 26 – Примеры осциллограмм наведенных импульсов: а) ось датчика расположена под углом 0 градусов относительно оси тракта ускорителя; б) ось датчика расположена под углом 25 градусов относительно оси тракта ускорителя; в) осциллограмма, демонстрирующая удар микрочастиц в сетку C1

Соискателем для описания наведенного импульса тока на наклоненной сетке (рис.27) была предложена аналитическая модель на основе использования теоремы Рамо-Шокли.

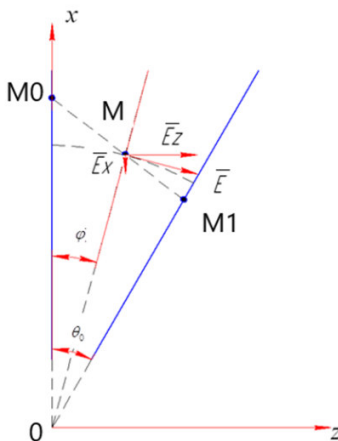


Рисунок 27 – Взаимное расположение наклонных измерительных сеточных электродов

Напряжённость поля непараллельных плоских электродов можно вычислить в полярной системе координат согласно выражению:

$$E = \frac{U}{r \cdot \theta_0},$$

где U – напряжение на измерительном электроде (в расчетах принимается за 1 В), r – расстояние от точки 0 до точки M , θ_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:

$$z = r \cdot \sin(\varphi), \quad x = r \cdot \cos(\varphi), \quad \operatorname{tg}(\alpha) = Vz/Vx, \quad x1 = x0 - Vx \cdot t, \quad z1 = Vz \cdot t.$$

Наведенный ток можно рассчитать согласно выражению:

$$\begin{aligned} i &= Q \cdot (\vec{V} \cdot \vec{E}) = Q \cdot (\vec{V}_x \cdot \vec{E}_x + \vec{V}_z \cdot \vec{E}_z) = \\ &= i(t=0) \cdot \left(\frac{x0^2}{(x0 - \operatorname{tg}(\alpha) \cdot t \cdot Vz)^2 + (t \cdot Vz)^2} \right), \end{aligned}$$

где $i(t=0) = \frac{U \cdot Q}{\theta_0} \left(\frac{Vz}{x0} \right)$ – ток в момент времени пролета микрочастицей 1 сетки.

Время пролета второй сетки определяется путем решения системы уравнения:

$$\begin{cases} x1 = x0 - Vx \cdot t1, \\ z1 = Vz \cdot t1, \\ \operatorname{tg}(\theta_0) = \frac{z1}{x1}. \end{cases}$$

Решение системы уравнений будет имеет вид:

$$t1 = \frac{x0}{Vz \cdot \left(\frac{1}{\operatorname{tg}(\theta_0)} + \operatorname{tg}(\alpha) \right)}.$$

Компоненту вектора скорости Vz можно определить согласно измерению времени пролета, микрочастицей 1 и 6 сеток (рис. 27), а компоненту вектора скорости Vx согласно выражению:

$$Vx = \frac{x0}{t1} - \frac{Vz}{\operatorname{tg}(\theta_0)}.$$

Тогда ток в момент времени пролета микрочастицей 2 сетки можно рассчитать согласно выражению:

$$i(t=t1) = i(t=0) \cdot \left(\frac{(ctg(\theta_0) + \operatorname{tg}(\alpha))^2}{ctg^2(\theta_0) + 1} \right).$$

Тогда угол влета микрочастицы в первую сетку можно определить согласно выражению:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \sqrt{i(t=t1) \cdot (ctg^2(\theta_0) + 1) / i(t=0)} - ctg(\theta_0).$$

$$\text{При } \alpha = 0: i = i(t=0) \cdot \left(\frac{1}{1 + \operatorname{tg}^2(\theta_0)} \right) = i(t=0) \cdot \cos^2(\theta_0)$$

Зная заряд Q и скорость V_z микрочастицы, можно определить координату пролета 1 сетки согласно выражению:

$$x_0 = \frac{U \cdot Q}{\theta_0} \left(\frac{V_z}{i(t=0)} \right).$$

Для того, чтобы упростить аналитическое решение данного дифференциального уравнения, воспользуемся разложением индукционного тока в ряд Тейлора, при этом ограничимся нахождением трех первых членов ряда, погрешность такой аппроксимации не превышает 0,5%:

$$i = i(t=0) \cdot \left(1 + A_1 \cdot t + A_2 \cdot t^2 \right), \text{ где } A_1 = \frac{2 \cdot V_x}{x_0}, A_2 = \left(3 \cdot \left(\frac{V_x}{x_0} \right)^2 - \left(\frac{V_z}{x_0} \right)^2 \right).$$

При решении дифференциального уравнения воспользуемся 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 переходит в выражение без учета влияния входных цепей.

Четвертая глава посвящена приборам, используемым для регистрации пылевых микрочастиц в ускорителях микрочастиц. Приведен обзор конструкций приборов для регистрации параметров высокоскоростных микрочастиц в тракте ускорителя, описан метод обработки сигналов с индукционного датчика цилиндрической формы. Для расчета использовалась эквивалентная схема выходного напряжения датчика (цилиндра Фарадея) (рис.28).

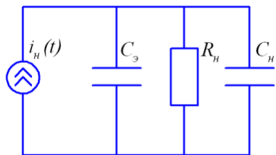


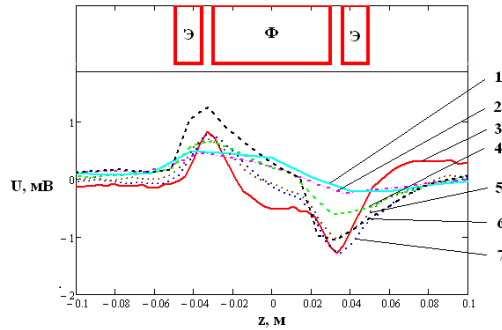
Рисунок 28 – Эквивалентная измерительная схема

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:

$$\frac{d}{dt} U_n(t) + \frac{1}{R_H C_0} U_n(t) = i_n(t) \frac{1}{C_0},$$

где $U_n(t)$ – напряжение на сопротивлении нагрузки $R_H = 2 \text{ МОм}$, которая подключена к цилиндру Фарадея, $C_0 = 32,2 \text{ пФ}$ – емкость цилиндра Фарадея.

В ходе эксперимента соискателем были измерены осциллограммы с цилиндров Фарадея при различных параметрах микрочастиц. На рис. 29 представлены результаты экспериментов, обработанные таким образом, что вместо оси времени на оси абсцисс отображается координата до средней линии цилиндра Фарадея для семи скоростей микрочастиц.



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 29– Результаты экспериментов

Для измерения распределения высокоскоростных микрочастиц в тракте ускорителя в диссертации была предложена также методика обработки данных с конструкции на основе модифицированных измерительных электродов (рис. 30). 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:

$U_2 = (K_2 / C_2) \cdot Q \cdot \left(\frac{d/2 + \rho \cdot \cos(\varphi_2)}{d} \right)$; для 3 $U_3 = (K_3 / C_3) \cdot Q \cdot \left(\frac{d/2 + \rho \cdot \cos(\varphi_3)}{d} \right)$, где Q – заряд

микрочастицы, ρ – 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 рис. 30 и выше рассмотренным выражениям получим:

$$\varphi_1 = \arctg \left(\sqrt{3} \frac{U_3 \cdot (C_3 / K_3) / (U_1 \cdot (C_1 / K_1)) - U_2 \cdot (C_2 / K_2) / (U_1 \cdot (C_1 / K_1))}{U_3 \cdot (C_3 / K_3) / (U_1 \cdot (C_1 / K_1)) + U_2 \cdot (C_2 / K_2) / (U_1 \cdot (C_1 / K_1)) - 2} \right),$$

$$\rho = \frac{(U_2 \cdot (C_2 / K_2) / (U_1 \cdot (C_1 / K_1)) - 1) \cdot d}{2 \cdot (\cos(120^\circ - \varphi_1) - (U_2 \cdot (C_2 / K_2) / (U_1 \cdot (C_1 / K_1))) \cdot \cos(\varphi_1))}.$$

Результаты модели были апробированы на прототипе устройства. Емкость измерительных электродов относительно земляного электрода составляет приблизительно 10 пФ. Эксперименты позволили подтвердить работоспособность методики обработки данных.

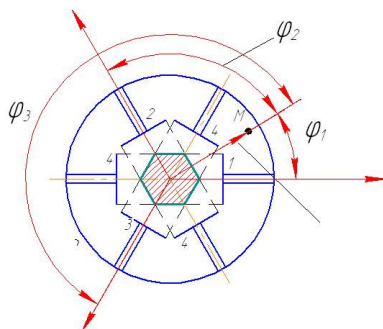
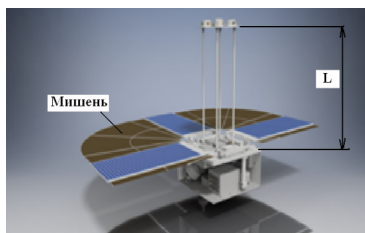


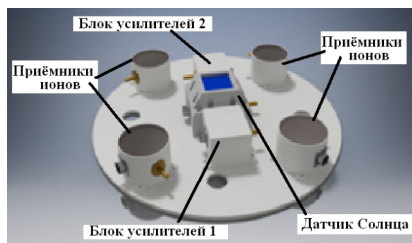
Рисунок 30 – Конструкция устройства (вид с торца),
где 1,2,3 – измерительные электроды; 4 – земляные электроды; М – некоторая
точка внутри; $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ – углы между радиусом вектором точки М и осями,
перпендикулярно которым расположены измерительные электроды

Пятая глава посвящена приборам для регистрации удара высокоскоростных микрочастиц, использующим элементы конструкций космических аппаратов. В главе представлены предложения по способам контроля места удара высокоскоростных микрочастиц с поверхностью космического аппарата и рассмотрены алгоритмы определения места удара.

В диссертации предложена конструкция экспериментальной установки в виде космического аппарата для регистрации параметров высокоскоростных микрочастиц (рис. 31), которая состоит из мишени и четырёх приёмников ионов в виде микроканальных пластин (МКП), расположенных на фиксированном расстоянии от неё (рис. 31). Обслуживающая аппаратура МКА 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. В диссертации создан и исследован макет соответствующего МКА (рис.32).



а)



б)

Рисунок 31– 3D-модель МКА

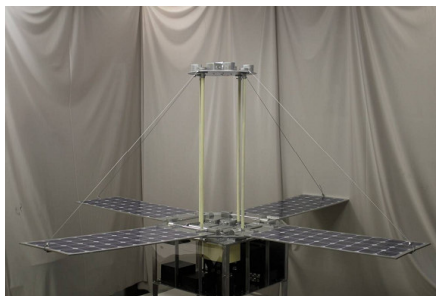


Рисунок 32 – Внешний вид макета МКА в раскрытом состоянии (без плёночной мишени)

Заключение

В диссертации разработаны методики, экспериментальные установки и бортовые приборы, позволяющие повысить чувствительность, достоверность и информативность регистрации параметров микрометеороидов и космического мусора.

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 $-14В \div -16В$.

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 $T_{[мкс]} = 12500 / V [м/с]$, график отношения заряда собранных ионов к массе микрочастицы (Q/m) в зависимости от скорости это 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) 773×1326×1326 мм. Габариты МКА без СБ 773×410×480, площадь регистрируемой поверхности порядка 1 м².

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

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи в журналах BAK/SCOPUS/WOS

1. **Телегин, А.М.** Экспериментальное моделирование коэффициента передачи прототипа датчика микрометеороидов и частиц космического мусора/**Телегин А.М.** // Инженерная физика. - 2025. - №2. - С. 48-56.
2. **Телегин, А.М.** Моделирование коэффициента передачи датчика микрометеороидов и частиц космического мусора/**Телегин А.М.** // Инженерная физика. — 2024. — № 4. — С. 37-44.
3. **Телегин, А.М.** Исследование конструкций датчиков для регистрации параметров высокоскоростных микрочастиц в тракте ускорителя (обзор) / **Телегин А.М.**// Успехи прикладной физики. — 2023. — Т. 11. № 6. — С. 540-552. (Telegin, A. M. Study of Sensor Designs for Recording the Parameters of High-Velocity Microparticles in the Accelerator Path (Review) / A. M. Telegin // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2024. – Vol. 69, No. 4-6. – P. 268-278).
4. **Телегин, А.М.** Модель выходного сигнала с измерительной сетки датчика микрометеороидов / **Телегин А.М.**// Инженерная физика. — 2021. — № 9. — С. 27-33.
5. **Телегин, А.М.** Система электродов ионизационных датчиков микрометеороидов/**Телегин А.М.** // Инженерная физика. — 2021. — № 6. — С. 3-8.
6. **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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. **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.
11. **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.(**Telegin A. M., Kalaev M. P., A detector of micrometeoroids and space debris particles based on a film inductance coil, St. Petersburg State Polytechnical University Journal.Physics and Mathematics. 18 (3) (2025) 49–59**).
12. 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.
13. **Телегин, А.М.** Исследование модели расчёта наведенного импульса тока в измерительных сетках датчика микрометеороидов и частиц космического мусора / **Телегин А.М., Калаев М.П., Воронов К.Е./Прикладная физика. - 2025.-№1.-С.5-10.**
14. Воронов, К.Е. Исследование работы пылеударного масс-спектрометра с нелинейным зеркалом/ **Воронов К.Е., Пияков И.В., Калаев М.П., Телегин А.М., Родин Д.В.** // Инженерная физика. — 2024. — № 10. — С. 19-27.
15. **Телегин, А.М.** Модель сеточной конструкции для измерения скорости микрометеороидов/ **Телегин А.М., Воронов К.Е., Шестаков Д.А.** Модель // Инженерная физика. — 2024. — № 1. — С. 49-57.

16. Воронов, К.Е. Моделирование движения заряженных микрочастиц в тракте ускорителя / Воронов К.Е., Пияков А.В., **Телегин А.М.** // Инженерная физика. — 2023. — № 2. — С. 31-37.
17. 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.
18. **Телегин, А.М.** Моделирование наведённого заряда на измерительных электродах, используемых для регистрации параметров микрочастиц в тракте ускорителя / **Телегин А.М.**, Федотов Ф.С. // Инженерная физика. — 2023. — № 12. — С. 47-54
19. Калаев, М.П. Исследование работы оптического датчика для регистрации параметров высокоскоростных пылевых частиц / Калаев М.П., Родина А.В., **Телегин А.М.**, Исмагилова Е.В. // Приборы и техника эксперимента. — 2023. — № 6. — С. 142-149.
20. 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.
21. Воронов, К.Е. Исследование работы устройства с микроканальной пластиной в качестве приемника ионов для регистрации пылевых частиц / Воронов К.Е., Пияков И.В., Рязанов Д.М., **Телегин А.М.** // Прикладная физика. 2023. № 6. С. 84-92.
22. 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.
23. Пияков, А.В. Измерение распределения частиц по сечению тракта ускорителя для моделирования микрометеоритов с помощью индукционного датчика / Пияков А.В., **Телегин А.М.** // Приборы и техника эксперимента. — 2022. — № 4. — С. 106-114.
24. 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.
25. Пияков, И.В. Цифровой модуль регистрации сигнала для пылеударного масс-спектрометра / Пияков И.В., Калаев М.П., Сухачев К.И., Воронов К.Е., **Телегин А.М.** // Приборы и техника эксперимента. — 2020. — № 6. — С. 83-88.
26. 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
27. Калаев, М.П. Исследование характеристик оптических стекол при воздействии факторов космического пространства/Калаев М.П., **Телегин А.М.**, Воронов К.Е., Лисян Ц., Цзилун Ц. // Компьютерная оптика. 2019. Т. 43. № 5. С. 803-809. (Kalaev, M. P., Telegin, A. M., Voronov, K. E., Lixiang, J., & Jilong, J. Investigation of optical glass characteristics under the influence of space factors //Computer Optics. – 2019. – Vol. 43. – №. 5. – P. 803-809).
28. Семкин, Н.Д. Зарядка твердых микрочастиц в камере инжектора электростатического ускорителя / Семкин Н.Д., Пияков А.В., Видманов А.С., **Телегин А.М.** // Приборы и техника эксперимента. — 2017. — № 1. — С. 148-153.
29. **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.
30. Семкин, Н.Д. Ударные эксперименты с многопараметрическим детектором микрометеороидов / Семкин Н.Д., **Телегин А.М.** // Приборы и техника эксперимента. — 2017. — № 1. — С. 124-127.
31. Семкин Н.Д. Малый космический аппарат для регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора / Семкин Н.Д., **Телегин А.М.**, Видманов А.С. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). — 2016. — № Т. 15, №1. — С. 115-121.
32. Семкин, Н.Д. Экспериментальное исследование детектора микрометеороидов и частиц космического мусора полусферической формы с помощью импульсного лазера / Семкин Н.Д., **Телегин А.М.** // Приборы и техника эксперимента. — 2016. — № 6. — С. 62-65.
33. **Телегин, А.М.** Исследование микрометеороидов и частиц космического мусора ионизационным детектором на малом космическом аппарате АИСТ-1Т / **Телегин А.М.**, Воронов К.Е., Авдеев В.А. // Прикладная физика. — 2016. — № 6. — С. 116-119.
34. 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.

(Semkin N. D., Telegin A.M. Calculating the Current in the Measurement Circuit of a High-Velocity Microparticle Detector // Measurement Techniques 2017. — Vol. 59. Issue 12. — P. 1304-1309).

35. Сёмкин, Н.Д. Электризация поверхности низкоорбитального малого космического аппарата "АИСТ" / Сёмкин Н.Д., Брагин В.В., Пияков А.В., **Телегин А.М.**, Рязанов Д.М., Матвиенко М.Г. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). — 2015. — № Т.14, №1. — С. 46-57.

36. 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. — № том 84, вып.5.- С.35-40.

37. 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.

38. 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.

39. **Телегин, А.М.** Детектор микрометеороидов и частиц космического мусора для малого космического аппарата "АИСТ-2" / **Телегин А.М.**, Сёмкин Н.Д. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2013. № 4 (42). С. 261-263.

40. 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.

41. Телегин, А. М. Повышение эффективности ионизации 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.

SCOPUS/WOS конференции

1. 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.

2. 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

3. 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. Kondratyev // CEUR Workshop Proceedings. — 2018. — Vol. 2212. — P. 158-164

4. 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

5. **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

6. Semkin, N. D. Small spacecraft to register micrometeoroids and space debris /Semkin N. D., **Telegin, A. M.**// 2015 3RD International conference on manufacturing engineering and technology for manufacturing growth (METMG 2015). — 2015. — P. 46-49

7. **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.

8. 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

Монография

1. Пияков А.В., Родин Д.В., **Телегин А.М.** Компьютерное и лабораторное моделирование микрометеороидов и техногенных пылевых частиц Самара: Изд-во Самарского университета, 2021. 144с.

Патенты

1. Устройство для регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора на основе металлических полосок / **Телегин А.М.** // Патент на изобретение RU 2819263 C1, 16.05.2024. Заявка от 25.12.2023.
2. 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.
3. Малый космический аппарат для регистрации высокоскоростных микрочастиц / **Телегин А.М.** // Патент на полезную модель RU 170832 U1, 11.05.2017. Заявка № 2016143013 от 31.10.2016.
4. Устройство для защиты космического аппарата от микрометеороидов / **Телегин А.М.** // Патент на изобретение RU 2598927 C1, 10.10.2016. Заявка № 2015122575/11 от 10.06.2015.
5. Пылеударный масс-спектрометр/ Воронов К.Е., Пияков И.В., Родин Д.В., Родина М.А., **Телегин А.М.**, Родин Д.В. // Патент на изобретение RU 2845626 C1, 25.08.2025. Заявка от 14.03.2025.
6. Устройство для регистрации характеристик солнечных батарей в условиях действия факторов космического пространства / Воронов К.Е., Калаев М.П., **Телегин А.М.**, Родина А.В. // Патент на изобретение RU 2839708 C1, 12.05.2025. Заявка от 05.07.2024.
7. Пылеударный масс-спектрометр / Воронов К.Е., Пияков И.В., **Телегин А.М.**, Родин Д.В. // Патент на изобретение RU 2824860 C1, 14.08.2024. Заявка от 22.02.2024
8. Синтезируемое в базе ПЛИС микроконтроллерное FPU ядро / Сухачёв К.И., Григорьев Д.П., **Телегин А.М.** // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023617091, 05.04.2023. Заявка № 2023615592 от 24.03.2023.
9. Программа вычисления и построения индикатрисы рассеяния лазерного излучения на высокоскоростных микрочастицах / Григорьев Д.П., **Телегин А.М.**, Воронов К.Е. // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2023667353, 15.08.2023. Заявка № 2023666501 от 02.08.2023.
10. Устройство контроля параметров движения космического аппарата (КА) с использованием постоянных магнитов / Воронов К.Е., Пияков А.В., **Телегин А.М.**, Сахапов Т.Р. // Патент на полезную модель RU 198479 U1, 13.07.2020. Заявка № 2020102461 от 21.01.2020.
11. Ускоритель высокоскоростных твёрдых микрочастиц / Воронов К.Е., Пияков А.В., **Телегин А.М.**, Рязанов Д.М. // Патент на полезную модель RU 189818 U1, 05.06.2019. Заявка № 2019102475 от 29.01.2019.
12. Устройство для исследования потоков микрометеороидов и частиц космического мусора/Семкин Н.Д., **Телегин А.М.** // Патент на изобретение RU 2610342 C1, 09.02.2017. Заявка № 2015147673 от 05.11.2015.
13. Прибор для изучения параметров микрометеоритов и частиц космического мусора / **Телегин А.М.**, Воронов К.Е., Пияков И.В. // Патент на полезную модель RU 172272 U1, 03.07.2017. Заявка № 2016146251 от 24.11.2016.
14. Программа вычисления динамики движения заряженной частицы в тракте ускорителя для моделирования микрометеоритов с использованием технологии NVIDIA CUDA / Пияков А.В., Родин Д.В., **Телегин А.М.** // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017613036, 09.03.2017. Заявка № 2016661752 от 02.11.2016.
15. Программа вычисления динамики движения заряженной частицы в тракте ускорителя для моделирования микрометеоритов / Пияков А.В., Родин Д.В., **Телегин А.М.** // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2017613539, 21.03.2017. Заявка № 2016661223 от 19.10.2016.
16. Малый космический аппарат для регистрации частиц космического мусора и микрометеороидов / Семкин Н.Д., **Телегин А.М.** // Патент на изобретение RU 2598978 C1, 10.10.2016. Заявка № 2015127393/28 от 07.07.2015.
17. 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.
18. Устройство для исследования физических явлений при высокоскоростном ударе / Семкин Н.Д., **Телегин А.М.**, Видманов А.С. // Патент на изобретение RU 2592060 C2, 20.07.2016. Заявка № 2014149689/07 от 09.12.2014.
19. Ускоритель высокоскоростных твердых частиц с коррекцией вектора скорости частиц / Пияков А.В., **Телегин А.М.**, Семкин Н.Д., Дорофеев А.С. // Патент на изобретение RU 2593594 C2, 10.08.2016. Заявка № 2014149820/07 от 09.12.2014.
20. Устройство контроля герметичности элементов конструкции космического аппарата (КА) / Семкин Н.Д., **Телегин А.М.** // Патент на изобретение RU 2540066 C1, 27.01.2015. Заявка № 2013132221/28 от 11.07.2013.

21. Устройство обнаружения утечки воздуха из модуля космической станции / Семкин Н.Д., Пияков И.В., **Телегин А.М.** // Патент на изобретение RU 2549630 C1, 27.04.2015. Заявка № 2013153635/11 от 03.12.2013.
22. Циклический масс-спектрометр газовых частиц / Семкин Н.Д., Пияков А.В., Пияков И.В., Родин Д.В., **Телегин А.М.** // Патент на изобретение RU 2504044 C2, 10.01.2014. Заявка № 2012115873/07 от 19.04.2012.
23. Устройство регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора / Семкин Н.Д., **Телегин А.М.** // Патент на изобретение RU 2522504 C2, 20.07.2014. Заявка № 2012148678/07 от 15.11.2012.
24. Ускоритель высокоскоростных твердых частиц с контролем вектора скорости частиц / **Телегин А.М.**, Семкин Н.Д., Пияков А.В. // Патент на полезную модель RU 141790 U1, 10.06.2014. Заявка № 2013156607/07 от 19.12.2013.
25. Устройство регистрации микрометеороидов и электрических разрядов / Семкин Н.Д., **Телегин А.М.**, Брагин В.В. // Патент на полезную модель RU 147374 U1, 10.11.2014. Заявка № 2014110574/07 от 19.03.2014.
26. Устройство контроля герметичности элементов конструкции космического аппарата (КА) / Семкин Н.Д., **Телегин А.М.**, Пияков И.В. // Патент на изобретение RU 2479829 C1, 20.04.2013. Заявка № 2011143823/28 от 28.10.2011.
27. Устройство для защиты космического аппарата от метеорных частиц / Семкин Н.Д., Бабенко А.В., **Телегин А.М.** // Патент на изобретение RU 2481256 C1, 10.05.2013. Заявка № 2011142950/11 от 24.10.2011.
28. Космический аппарат для очистки околоземного пространства от мусора / Семкин Н.Д., **Телегин А.М.**, Бабенко А.В. // Патент на изобретение RU 2492125 C1, 10.09.2013. Заявка № 2012107929/11 от 01.03.2012.
29. Устройство регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора / Семкин Н.Д., **Телегин А.М.**, Родин Д.В., Калаев М.П. // Патент на изобретение RU 2476908 C2, 27.02.2013. Заявка № 2011123926/28 от 10.06.2011.
30. Устройство измерения оптических характеристик ударносжатых прозрачных материалов элементов конструкции космического аппарата / Семкин Н.Д., **Телегин А.М.**, Пияков А.В., Калаев М.П., Воронов К.Е. // Патент на изобретение RU 2485548 C2, 20.06.2013. Заявка № 2011127029/28 от 30.06.2011.
31. Ускоритель высокоскоростных твердых частиц / Пияков А.В., Семкин Н.Д., **Телегин А.М.**, Калаев М.П., Воронов К.Е. // Патент на изобретение RU 2487505 C2, 10.07.2013. Заявка № 2011116727/07 от 27.04.2011.
32. Ускоритель высокоскоростных твердых частиц с автоподстройкой функции распределения частиц по радиусу мишени / Семкин Н.Д., **Телегин А.М.**, Калаев М.П., Пияков А.В. // Патент на изобретение RU 2451434 C1, 20.05.2012. Заявка № 2010153720/07 от 27.12.2010.
33. Устройство регистрации частиц космического мусора и микрометеороидов / Семкин Н.Д., Любимов В.В., Абрашкин В.И., Калаев М.П., **Телегин А.М.**, Барышев Е.Ю. // Патент на изобретение RU 2454628 C1, 27.06.2012. Заявка № 2011127027/28 от 30.06.2011.
34. Устройство регистрации параметров микрометеороидов и космического мусора / Семкин Н.Д., **Телегин А.М.**, Вергунец К.И., Калаев М.П., Воронов К.Е., Абрашкин В.И. // Патент на изобретение RU 2456639 C1, 20.07.2012. Заявка № 2010150983/28 от 13.12.2010.
35. Резонансный электромагнитный ускоритель / Сухачев К.И., Семкин Н.Д., Калаев М.П., **Телегин А.М.**, Родин Д.В., Пияков А.В. // Патент на изобретение RU 2466340 C1, 10.11.2012. Заявка № 2011116048/11 от 22.04.2011.

Статьи в рецензируемых журналах

1. 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.
2. Грецишников В.М. Прибор для диагностики состояния поверхности космического аппарата/В.М. Грецишников, О.В. Теряева, М.П. Калаев, **А.М. Телегин** //Южно-Сибирский научный вестник. – 2025. – № 2. – с. 134-140.
3. 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.
4. 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.

5. 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.

6. Борисенков, И.Л. Сенсорная система на основе внутриволоконных брэгговских решеток и интеррогатора со спектрально-временным разделением каналов / Борисенков И.Л., Воронов К.Е., Леонович Г.И., Калаев М.П., **Телегин А.М.** // Нано- и микросистемная техника. – 2021. – Т. 23, № 5. – С. 247-254.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. Воронов, К.Е. Формы наведенного импульса в датчике микрометеороидов и частиц космического мусора / Воронов К.Е., **Телегин А.М.**, Сухачев К.И., Калаев М.П. // Успехи прикладной физики. — 2020. — Т. 8, № 6. — С. 411-418

11. Воронов, К.Е. Научная аппаратура для исследования высокоскоростных микрочастиц (обзор) / Воронов К.Е., **Телегин А.М.**, Лисян Ц., Цзилун Ц. // Успехи прикладной физики. — 2019. — Т. 7, № 6. — С. 594-600

12. 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.

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

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

15. 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.

16. 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.

17. Семкин, Н. Д. Многослойные структуры в условиях воздействия высокоскоростных твердых частиц / Н. Д. Семкин, **А. М. Телегин** // Авиакосмическое приборостроение. – 2015. – № 9. – С. 41-47.

18. 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.