

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу **Телегина Алексея Михайловича**
«Разработка методик, экспериментальных установок и бортовых приборов для регистрации параметров микрометеороидов и частиц космического мусора», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

На оппонирование представлены:

- диссертационная работа объемом 325 страницы с приложениями и списком использованных источников, включающим 437 наименований;
 - автореферат диссертации объемом 36 страниц;
 - 103 печатных работ, включая: 41 публикацию в журналах из перечня ВАК, 1 главу в коллективной монографии, 35 патентов РФ, 18 статей в рецензируемых российских журналах.
-

1. Актуальность диссертационного исследования

Актуальность диссертационного исследования обусловлена возрастающей необходимостью контроля микрометеороидной и техногенной составляющих космического пространства, представляющих реальную угрозу для функционирования космических аппаратов. Высокоскоростные микрочастицы способны вызывать локальные повреждения элементов конструкции, нарушение работы бортовой аппаратуры и деградацию функциональных покрытий. В этих условиях особое значение приобретает разработка средств, позволяющих регистрировать факт соударения, определять параметры частиц и оценивать последствия их воздействия.

Существующие методы регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора основаны на использовании ионизационных, акустических, оптических, электромагнитных и резистивных эффектов. Вместе с тем каждый из них характеризуется ограничениями по чувствительности, площади контролируемой поверхности, числу одновременно определяемых параметров, устойчивости к внешним воздействиям и возможности применения в составе малых космических аппаратов. Поэтому разработка новых методов и приборов, обеспечивающих повышение информативности и достоверности регистрации при ограничениях по массе, габаритам и энергопотреблению, представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

Особую значимость имеет создание многопараметрических систем, позволяющих по совокупности электрических, ионизационных и временных характеристик сигналов оценивать заряд, массу, скорость, направление движения и координаты пролета или удара частицы. Перспективным направлением является также использование элементов конструкции космического аппарата либо специально интегрированных крупноплощадных пленочных структур в качестве чувствительных элементов. Такой подход потенциально позволяет увеличить эффективную площадь регистрации без пропорционального роста массы и сложности бортовой аппаратуры.

Представленная диссертационная работа направлена на разработку методов, экспериментальных установок и бортовых приборов для регистрации параметров высокоскоростных микрочастиц в лабораторных и космических условиях. Рассматриваемые в работе задачи соответствуют современным направлениям космического приборостроения, диагностики околоземного пространства и обеспечения надежности космических аппаратов. В связи с этим тема диссертации является актуальной, а полученные результаты имеют научное и практическое значение.

Предложенные в работе технологические решения относятся к критическим технологиям: технологии наноустройств и микросистемной техники (п. 15), технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера (п. 22), технологии создания ракетно-космической и транспортной техники нового поколения (п. 32) (Распоряжение Правительства РФ от 14.07.2012 г. № 1273-р).

Решенная в работе проблема является актуальной и имеет важное народно-хозяйственное значение, что подтверждается Указом Президента Российской Федерации от 06.05.2018 г. № 198 «Об Основах государственной политики Российской Федерации в области промышленной безопасности на период до 2025 года и дальнейшую перспективу».

2. Оценка структуры и содержания диссертационной работы

Диссертационная работа имеет логически выстроенную структуру, соответствующую поставленной цели и совокупности решаемых научно-технических задач. Работа включает введение, пять глав, заключение, список использованных источников и приложения. Последовательность изложения обеспечивает переход от анализа современного состояния методов регистрации высокоскоростных микрочастиц к разработке физических принципов, математических моделей, экспериментальных установок и бортовых приборов, а затем к рассмотрению перспективных конструктивных решений для космических аппаратов.

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи работы, определены объект и предмет исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации и публикациях автора. Содержание введения в целом соответствует дальнейшей структуре диссертации и позволяет сформировать целостное представление о направленности исследования.

Первая глава посвящена анализу существующих методов и средств регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора. Рассмотрены физические эффекты, возникающие при высокоскоростном соударении частиц с преградой, а также конструктивные принципы построения соответствующих датчиков и приборов. Проведенный обзор создает необходимую научную основу для выбора направлений дальнейших исследований. В главе представлены пленочные чувствительные структуры и методы определения координат их повреждения по частотным характеристикам.

Вторая глава содержит результаты разработки и исследования ионизационных приборов, включая бортовую аппаратуру, прошедшую эксплуатацию в составе малого космического аппарата, а также лабораторные образцы с различными конфигурациями электродных систем.

В третьей главе рассмотрены многосеточные и многоканальные измерительные системы, предназначенные для определения совокупности параметров заряженных микрочастиц. Существенное внимание уделено математическому описанию движения частиц, обработке сигналов и восстановлению их параметров.

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

Пятая глава развивает полученные результаты применительно к использованию крупноплощадных элементов конструкции малого космического аппарата в качестве чувствительной поверхности. Представлены компоновочные решения, структурные схемы и варианты реализации соответствующей измерительной аппаратуры.

Заключение обобщает основные результаты исследования и отражает содержание выполненных теоретических, расчетных, экспериментальных и конструкторских работ. Диссертация характеризуется значительным объемом экспериментального материала, использованием взаимодополняющих методов моделирования и натурных исследований, а также выраженной практической направленностью.

В целом структура работы является обоснованной, содержание глав взаимосвязано, а изложенный материал соответствует тематике и уровню докторской диссертации.

3. Степень обоснованности научных положений, результатов и основных выводов, представленных в диссертационной работе

Научные положения, результаты и выводы диссертационной работы в целом являются обоснованными и базируются на последовательном сочетании теоретического анализа, математического моделирования, численных расчетов и экспериментальных исследо-

ваний. Автором рассмотрены физические процессы, сопровождающие движение заряженных микрочастиц и их высокоскоростное соударение с чувствительными элементами приборов, установлены зависимости между параметрами частиц и характеристиками регистрируемых электрических, наведенных и ионизационных сигналов. Принятые исходные положения согласуются с известными закономерностями электродинамики, физики плазмы, механики высокоскоростного удара, теории электрических цепей и измерительных преобразователей.

Обоснованность полученных результатов подтверждается значительным объемом экспериментальных исследований, выполненных с использованием лабораторных установок и ускорителя высокоскоростных микрочастиц. Дополнительным подтверждением практической реализуемости результатов являются разработка и изготовление экспериментальных образцов приборов и бортовой аппаратуры, проведение исследований на ускорителе микрочастиц, а также выполнение космического эксперимента с научной аппаратурой «МЕТЕОР», установленной на малом космическом аппарате «АИСТ-1Т». Получено 35 патентов Российской Федерации. Столь существенный объем патентования свидетельствует о выраженной изобретательской составляющей работы, технической оригинальности разработанных приборов и возможности практического использования предложенных решений.

4. Научная новизна и достоверность результатов диссертационной работы

Достоверность основных выводов обеспечивается применением взаимодополняющих методов исследования, воспроизводимостью экспериментальных результатов, физической интерпретируемостью полученных зависимостей и согласованностью расчетных и экспериментальных данных. Использованные методы обработки сигналов и восстановления параметров частиц соответствуют характеру решаемых задач. Результаты работы прошли апробацию на международных и всероссийских научных конференциях, опубликованы в рецензируемых научных изданиях и использованы при выполнении ряда научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Сформулированные выводы в основной части соответствуют представленному теоретическому и экспериментальному материалу. Вместе с тем отдельные перспективные решения, связанные с использованием крупноплощадных элементов малого космического аппарата в качестве чувствительной поверхности, имеют преимущественно расчетно-конструкторское и макетное подтверждение и требуют дальнейшей комплексной экспериментальной и метрологической верификации. Данное обстоятельство не снижает общей научной и практической значимости выполненной работы, но определяет направления дальнейшего развития исследований.

5. Теоретическая и практическая ценность результатов

Теоретическая ценность диссертационной работы определяется развитием научно-методических основ регистрации параметров высокоскоростных заряженных микрочастиц. Автором получены и уточнены зависимости, связывающие массу, заряд, скорость и траекторию движения микрочастиц с параметрами наведенных и ионизационных импульсов, а также с частотными характеристиками повреждаемых пленочных проводящих структур. Предложены математические модели формирования сигналов в плоскопараллельных, сеточных и трехэлектродных измерительных системах, основанные на теореме Шокли–Рамо, аппарате электрических цепей и матричном описании линий передачи. Полученные соотношения позволяют обосновывать геометрические параметры первичных преобразователей, оценивать точность измерений и интерпретировать формы экспериментально зарегистрированных сигналов.

Практическая ценность результатов состоит в разработке и изготовлении комплекса экспериментальных установок, лабораторных образцов и бортовых приборов для регистрации микрометеороидов и частиц космического мусора. Созданные технические решения включают пленочные частотные датчики, ионизационные приборы с различными конфигу-

рациями электродов, многосеточные измерители вектора скорости, средства контроля положения частиц в тракте ускорителя и научную аппаратуру «МЕТЕОР», прошедшую эксплуатацию в составе малого космического аппарата «АИСТ-1Т». Предложенные решения обеспечивают снижение входной емкости измерительных каналов, расширение динамического диапазона, повышение чувствительности и помехоустойчивости аппаратуры, а также увеличение числа одновременно оцениваемых параметров микрочастицы.

Результаты работы могут быть использованы при проектировании научной аппаратуры для космических экспериментов, совершенствовании ускорителей микрочастиц и средств их диагностики, а также при разработке систем контроля воздействия микрометеороидов и космического мусора на элементы космических аппаратов. Практическая направленность исследования подтверждается применением полученных результатов при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, созданием экспериментальных образцов и значительным числом запатентованных технических решений.

6. Замечания и рекомендации по диссертационной работе

Несмотря на общую положительную оценку работы, имеется ряд комментариев и замечаний, на некоторые из которых хотелось бы услышать ответ автора работы:

1. Стр. 106, абз. 5. Утверждение, что «при обработке информации влияние электрического поля на параметры частицы можно не рассматривать» противоречит выводу на стр. 101, где указано, что влиянием электрического поля пренебречь нельзя, а также расчетам на стр. 103–104, основанным на ускорении ионов этим полем. Необходимо разграничить два режима работы и сформулировать количественный критерий, при котором поле учитывается либо исключается.

2. Стр. 145, абз. 1. Методика калибровки фактически вынесена во внешние источники [34, 311]. Поскольку дальнейшие зависимости являются основным экспериментальным результатом раздела, методика должна была быть изложена в диссертации в объеме, достаточном для воспроизведения.

3. Стр. 166, абз. 3. Обозначения x_1 и z_1 ранее введены как координаты фиксированной точки M_1 , в которой частица пересекает вторую сетку. В приведенных выражениях они используются как текущие координаты, зависящие от времени.

4. Стр. 192–201, вводный блок главы 4. Объемный самостоятельный фрагмент, занимающий около девяти страниц и содержащий обзор литературы, математические соотношения, анализ известных конструкций, собственное техническое решение и выводы, не имеет номера и названия раздела. Это нарушает структурную логику главы. Блок целесообразно оформить как самостоятельный раздел, а существующие разделы 4.1–4.4 перенумеровать. Наличие внутри нумерованного вводного блока собственных результатов особенно затрудняет разграничение литературного обзора и авторского вклада.

5. Стр. 222, абз. 1. Автор утверждает, что «одним из способов анализа сигналов является использование нейронных сетей для решения задачи классификации». Предложение носит декларативный характер и не связано с выполненным исследованием. Нейронная сеть не устраняет физическую неидентифицируемость задачи. Если разные траектории формируют одинаковые сигналы, алгоритм классификации не сможет восстановить отсутствующую информацию.

6. Стр. 241, абзац об оптоволоконных резонаторных датчиках. Утверждение о том, что «...данный тип датчиков нельзя мультиплексировать на одном волокне, а потому их применение ограничено для задач, где требуется множество датчиков» носит чрезмерно категоричный характер. Возможность мультиплексирования зависит от конкретной интерферометрической или резонаторной архитектуры и метода опроса. Для ряда волоконных интерферометрических датчиков применяются временное, спектральное, пространственное и когерентное разделение каналов.

7. Стр. 241, абз. 5. Утверждение о том, что «при деформации оптоволоконного расстояния между решётками Брэгга изменяется, вследствие чего возникает изменение длины

волны...» сформулировано неточно. При деформации или нагреве отдельной ВБР изменяются период решетки и эффективный показатель преломления. Правильная формулировка при деформации волокна изменяются период ВБР и эффективный показатель преломления направляемой моды, что приводит к смещению брэгговской длины волны.

8. Стр. 241–242, абзацы о регистрации сигнала ВБР. Выражение «фиксируя частоту колебаний отражённого участка спектра, можно получить качественное преобразование вибрация — свет — электрический сигнал» терминологически неточно. В зависимости от системы опроса регистрируется динамическое смещение брэгговской длины волны, изменение оптической мощности либо фазы сигнала. Также неясно, что означает «качественное преобразование», обнаружение факта воздействия или количественное измерение параметров удара.

9. Стр. 242, абзац после формулы Брэгга. Деформация является внешним механическим воздействием или параметром состояния, а не собственным параметром ВБР, изменяющимся наряду с показателем преломления и периодом. Кроме того, в рассматриваемой задаче необходимо учитывать температурную перекрестную чувствительность ВБР. Для поверхности КА это особенно существенно, поскольку орбитальные термоциклы могут создавать смещения брэгговской длины волны, значительно превышающие кратковременный отклик на удар.

10. Стр. 246, последний абзац. Преимущества оптоволоконной системы приведены декларативно. Не учтены сложность высокоскоростного интеррогатора, температурная чувствительность, влияние ионизирующего излучения, требования к приклеиванию волокна, надежность соединителей, прокладка волокон на поверхности КА и необходимость разделения откликов нескольких датчиков. Кроме того, выражение «сопротивляемость к внешним воздействиям» неопределенно.

11. Стр. 256–265, заголовки подразделов. Названия не раскрывают различия между вариантами. Читателю приходится устанавливать особенности каждой конструкции только из дальнейшего описания. Подразделы следует называть по основному конструктивному признаку, например: с зонтичным раскрытием пленочного чувствительного элемента; с секционной раскрываемой конструкцией; с вынесенными приемниками ионов; с телескопическими штангами и звездным датчиком.

12. В тексте обнаружены стилистические погрешности и вольные отклонения оформления от ГОСТ. Формулы в главах 1–3 не пронумерованы. Встречаются не согласованные предложения, некорректные ссылки на рисунки и формулы. Например: стр. 18, абз. 1, опечатка, правильно «необходимо проведение моделирования»; стр. 18, абз. 2, ошибка, «...проблема регистрации (...) становятся более актуальными», правильно было бы: «...проблемы регистрации...»; стр. 71, рисунок 1.30, нарушено буквенное обозначение фрагментов: после «в» использована латинская или ошибочная буква «с», а фотографии нельзя установить, что линии действительно подверглись воздействию космической среды; стр. 157, абз. 2, приведена ошибочная ссылка на рисунок 3.15, а рассматриваемая конструкция изображена на рисунке 3.4; стр. 172–173, рисунок 3.12, номер рисунка 3.12 использован дважды; стр. 179, абз. 3, ссылка на рисунки 5а и 5б ошибочна, вероятно, имеются в виду рисунки 3.15а и 3.15б; стр. 210, формула (4.2), в тексте используется ошибочное название «теорема Шамо–Рокли» вместо «теорема Шокли–Рамо».

Указанные замечания не подвергают сомнению научную новизну, практической ценности, основные выводы по результатам диссертационного исследования, а работа безусловно заслуживает положительной оценки.

7. Заключение по диссертационной работе

Диссертационная работа Телегина Алексея Михайловича «Разработка методик, экспериментальных установок и бортовых приборов для регистрации параметров микрометеороидов и частиц космического мусора» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой на основе выполненных автором теоретических и экспери-

ментальных исследований решена значимая научно-техническая проблема разработки методов и средств многопараметрической регистрации высокоскоростных микрочастиц в лабораторных и космических условиях.

Работа характеризуется актуальностью, научной новизной, существенной теоретической и практической значимостью. Полученные результаты основаны на математическом моделировании, численных расчетах, лабораторных исследованиях, испытаниях на ускорителе микрочастиц и результатах космического эксперимента. Практическая реализуемость предложенных решений подтверждается созданием экспериментальных образцов и бортовой аппаратуры, использованием результатов при выполнении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также широкой публикационной и патентной апробацией.

Отмеченные в отзыве замечания преимущественно относятся к полноте описания отдельных моделей и экспериментальных методик, метрологическому обоснованию ряда результатов, а также к необходимости дополнительной функциональной верификации перспективных конструкций крупноплощадных датчиков. Указанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы, не ставят под сомнение достоверность ее основных результатов и могут рассматриваться как направления дальнейшего развития исследований.

По актуальности, объему выполненных исследований, степени обоснованности научных положений, научной новизне и практической значимости результатов диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики и требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям пунктами 9–14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842. Автор диссертации, Телегин Алексей Михайлович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по научной специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Официальный оппонент, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиофотоники и микроволновых технологий в ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» Айрат Жавдатович Сахабутдинов.

 31. августа 2026 г.

Я, Сахабутдинов Айрат Жавдатович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Подпись доктора технических наук, профессора Айрата Жавдатовича Сахабутдинова удостоверяю

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева – КАИ»
Специальность, по которой защищена докторская диссертация: 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы (2.2.6)
Адрес: 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10
Телефон: +7 (987) 290-18-64
Электронная почта: azhsakhabutdinov@kai.ru

