

**ОТЗЫВ**  
**официального оппонента**  
**Василия Викторовича Сазонова**  
**на диссертацию**  
**Дениса Андреевича Тучина**

на тему: «Математические модели и методы навигационного обеспечения и баллистического проектирования полётов космических аппаратов», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности: 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

---

**Актуальность темы диссертации.**

Диссертация Д.А. Тучина посвящена решению фундаментальной научно-технической проблемы – созданию математических моделей, методов, алгоритмов и программных комплексов для навигационного обеспечения и баллистического проектирования управляемых полётов космических аппаратов (КА). Современные вызовы в освоении космоса, стоящие перед отечественной космонавтикой, требуют качественного скачка в автономности и надёжности бортовых систем. Реализация сложных проектов по исследованию Луны и других тел Солнечной системы и невозможна без высокоточных математических моделей движения КА, эффективных методов обработки ограниченной измерительной информации и специализированного программного обеспечения, работающего в реальном времени как в наземных баллистических центрах, так и на борту КА с учётом возможностей существующей вычислительной техники. Поэтому тема диссертации Д.А. Тучина является безусловно актуальной.

**Научная новизна и значимость полученных результатов.**

В диссертации получен ряд новых научных результатов, имеющих фундаментальное и прикладное значение. Разработаны новые математические модели, численные методы и алгоритмы, которые реализованы в виде специального программного обеспечения.

1. Разработана **новая** математическая модель навигационных сигналов, принимаемых аппаратурой на борту космического аппарата, а также взаимосвязанные математические модели бортовых навигационных устройств и органов управления космического аппарата для реализации мягкой посадки на поверхность Луны.
2. **Впервые разработан** и реализован в виде комплекса программ для отечественного бортового компьютера алгоритм определения орбиты на борту КА, выходящего за пределы штатного навигационного поля спутниковых систем. **Новизна** метода заключается в комбинировании фильтра Калмана и метода наименьших квадратов, что позволяет эффективно компенсировать ограниченное количество измерений и ошибки бортовых вычислений, невысокую скорость вычислителя и ограниченный объем оперативной памяти.
3. **Предложен** новый подход к построению автономной навигационной системы (АНС), который состоит в аппаратном разделении задач поиска/слежения за сигналом и выполнении навигационных расчётов, что исключает контур обратной связи и обеспечивает надёжность получения первичных измерений независимо от точности знания орбиты. Разработаны оригинальные рекуррентные численные методы фильтрации, минимизирующие требования к памяти и комплекс бортовых программ.
4. **Разработан** быстродействующий численный метод вычисления гравитационных возмущений от Луны и Солнца, основанный на комбинации аналитических моделей и последующей аппроксимации полиномами Чебышёва непосредственно на борту КА. **Новизна** подхода заключается в отказе от хранения больших массивов заранее вычисленных коэффициентов в ПЗУ, что критически важно для бортовых систем с ограниченными ресурсами.
5. **Создан** комплекс связанных математических моделей для имитации работы всех ключевых систем посадочного лунного аппарата: от звёздного датчика и бесплатформенного инерциального блока до доплеровского измерителя скорости и сложной двигательной установки с двумя топливными системами. **Новизна** заключается в комплексности подхода, позволившего на

едином стенде отработать численные методы и алгоритмы терминального управления, использованные в проекте «Луна-25».

**Теоретическая значимость** работы заключается в развитии методов небесной механики и астродинамики применительно к новым задачам. Предложены оригинальные подходы к интегрированию уравнений движения на бортовых ЭВМ с малой разрядностью, разработаны эффективные рекуррентные алгоритмы фильтрации для слежения за сигналом, а также адаптированы и введены в практику баллистического анализа инструменты, позволяющие исследовать свойства пучков траекторий.

**Практическая значимость** работы не вызывает сомнений и подтверждена многолетним успешным использованием полученных результатов в реальных космических проектах.

- Методы и алгоритмы АНС функционируют в составе бортовой аппаратуры серии КА на высокоэллиптических орбитах.

- Разработанное программное обеспечение использовалось для навигационного обеспечения миссий «МКА-ФКИ (ПН1) «Зонд-ПП», «МКА-ФКИ (ПН2) «Рэлек», «Спектр-РГ», а также при 27 запусках разгонного блока «Фрегат» с космодрома во Французской Гвиане.

- Методы и программы были включены в бортовой комплекс управления и стенды полунатурных испытаний КА «Луна-25», что сыграло ключевую роль в отработке режимов посадки и обеспечило успешный перелёт и выход на окололунную орбиту.

#### **Достоверность и обоснованность результатов.**

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертации обеспечивается строгим применением фундаментальных законов механики, известных математических методов и алгоритмов вычислений. Основные результаты прошли широкую апробацию на всероссийских и академических семинарах и конференциях. Решающим подтверждением

является успешная эксплуатация разработанного программного обеспечения в системах управления реальных КА на всех этапах, а также верификация результатов моделирования по данным лётных испытаний, что подробно отражено в диссертации (пп. 2.6.2, 4.8.3).

### **Оценка содержания работы и завершённости.**

Диссертация является завершённым научным трудом, гармонично сочетающим три ключевых аспекта специальности 1.2.2: создание математических моделей, разработку численных методов и их реализацию в виде комплексов программ. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и шести приложений, изложена на 439 страницах, содержит 120 рисунков и 88 таблиц. Список литературы включает 274 наименования.

- **Введение** обосновывает актуальность, цели, научную новизну и практическую значимость работы.

- В **главе 1** подробно рассматриваются классические и новые методы наземного навигационного обеспечения, обработки данных навигационной аппаратуры потребителя, идентификации КА и реконструкции полёта. Особо следует отметить оригинальный критерий отбраковки аномальных измерений (п. 1.9).

- **Глава 2** является ключевой и представляет законченное описание АНС: от архитектуры и моделей коррелятора до трёхэтапного алгоритма определения орбиты. Результаты моделирования и лётных испытаний на высокоэллиптических орбитах показывают высокую точность — 24 м и 3 мм/с ошибки определения радиус-вектора и вектора скорости.

- **Глава 3** содержит глубокую проработку математических моделей сигналов ГЛОНАСС/GPS, необходимых для отработки АНС. Созданный имитационный комплекс – важный практический результат.

- **Глава 4** посвящена комплексному моделированию задачи прилунения. Модели всех бортовых систем и алгоритм терминального управления, апробированные на стенде, представляют собой решение отработки отечественных лунных проектов.

- В **главе 5** предложен подход к баллистическому проектированию межпланетных миссий, демонстрируется эффективность предложенного инструментария на задачах для проектов «Интергелиозонд», «Лаплас-П» и исследования Венеры.

- В **заключении** приводятся основные научные результаты работы, даются рекомендации по использованию полученных результатов и перспективы разработки рассмотренной научной темы.

**Содержание автореферата** полностью соответствует содержанию диссертации.

В процессе рецензирования данной диссертационной работы был выявлен ряд недостатков, отмечу следующие:

1. Работа имеет большой объем и содержит большое количество уточняющего материала, такой стиль изложения идеален для написания учебников, но избыточен для диссертационной работы.
2. На **стр. 18** автор использует термин «ближний космос» и «дальний космос», однако непонятно, что вкладывается в эти термины, в литературе имеются разные трактовки.
3. На **стр. 19** автор указывает, что приведены алгоритмы расчета неких «задержек в бортовой аппаратуре», однако не указывает явно, о каком процессе идет речь.
4. На **стр. 58** приводятся формулы расчета силы светового давления и возмущающего ускорения и эти формулы не показывают зависимость данных силы и ускорения от формы космического аппарата и материала поверхности. Пояснений по этому факту и ссылок на литературу не приводится.

5. На **стр. 60** автор указывает, что постоянно производит сравнение индексов солнечной активности рассчитанный при помощи его методики по данным российских источников и иностранных, но далее непонятно как используются результаты сравнения, в чем смысл это сравнения неясно.
6. На **стр. 67** автор указывает, используется иностранная модель атмосферы NRL-MSISE-00. Почему была выбрана именно эта модель и не используется отечественная модель, например ГОСТ Р 25645.166-2004.
7. На **стр. 111** в критерии отбраковки аномальных измерений (п. 1.9) предполагается, что выборка содержит не более 50 % аномалий, однако пояснений или ссылок на подтверждающие исследования не приводится.
8. На **стр. 162** допущена неточность при описании орбитальной системы координат, ось ОХ аппарата не всегда направлена **вдоль** вектора скорости. Хотя приведенные формулы верные.
9. В главе 5 автор не указывает как планируется адаптировать созданные инструменты баллистического проектирования для учёта негравитационных эффектов (например, давления сил солнечной радиации) при полётах к малым телам Солнечной системы.

Указанные замечания не снижают общую высокую оценку работы Д.А. Тучина. Представленная диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решены научные проблемы, имеющие важное социально-экономическое значение. Имеется соответствие всем требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842. Содержание работы и положения, выносимые на защиту, соответствуют паспорту специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». Результаты работы прошли достаточную апробацию на научных семинарах и конференциях и были опубликованы в 70 печатных изданиях, 59 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 24 – в периодических научных журналах, индексируемых Web of Science и Scopus, 8 – в тезисах докладов,

2 – в монографиях. 5 работ опубликовано без соавторов. Зарегистрирована 1 программа для ЭВМ.

Учитывая всё вышеизложенное, считаю, что представленная работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а её автор Тучин Денис Андреевич заслуживает присуждения ему искомой учёной степени.

### **Отзыв составил официальный оппонент**

Сазонов Василий Викторович, доктор физико-математических наук, доцент по научной специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», декан факультета космических исследований Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (факультет космических исследований).

119991, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр.52., тел. +7 917 565 42 99, sazonov@cosmos.msu.ru, +7 495 939 21 13

  


Сазонов В.В.  
27 февраля 2026 г.