



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИПМ им. М. В. Келдыша РАН

чл.-корр. РАН

А. И. Аптекарев

«02» марта 2023 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного учреждения "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии Наук".

Диссертация «Моделирование работы алгоритмов управления движением наноспутников на аэродинамическом столе» выполнена в федеральном государственном учреждении "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии Наук".

В период подготовки диссертации соискатель Козин Филипп Александрович работал в федеральном государственном учреждении "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии Наук" в должности младшего научного сотрудника.

В 2006 г. окончил магистратуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» по направлению подготовки прикладная математика и физика. В 2009 году окончил очную аспирантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» по направлению подготовки 05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, доцент, Иванов Даниил Сергеевич работает в Федеральном государственном учреждении «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук» в должности старшего научного сотрудника в отделе № 7.

По итогам обсуждения диссертации Козина Ф. А. **принято следующее заключение:**

**Тема диссертации является актуальной** поскольку перед запуском космических аппаратов требуется проведение лабораторного исследования бортовых алгоритмов управления движением. В работе рассматривается стенд с аэродинамическим столом и макетами космических аппаратов, с помощью которого проводится моделирование поступательного и углового движения в задачах группового полета малых спутников.

**Целью** диссертационной работы является создание программно-алгоритмических средств для проведения экспериментов по моделированию работы алгоритмов управления относительным движением макетов наноспутников на лабораторном стенде с аэродинамическим столом.

В диссертации решались следующие задачи:

- 1) разработка математических моделей движения макетов на аэродинамическом столе, математической модели исполнительных элементов и математической модели навигационной системы, выбор и адаптация численных методов для моделирования системы и обработки измерений;
- 2) разработка метода валидации предложенных математических моделей на основе данных лабораторных экспериментов;
- 3) создание программного комплекса и реализация алгоритмов для проведения экспериментов по управлению движением макетов наноспутников на стенде с аэродинамическим столом;
- 4) разработка метода интерпретации результатов лабораторных экспериментов по исследованию алгоритмов управления относительным движением макетов для задач активного увода объектов космического мусора.

**Основные результаты диссертации:**

- 1) разработаны математическая модель движения макетов на аэродинамическом столе, модель тяги вентиляторных двигателей и модель навигационной системы; адаптирован алгоритм на основе фильтра Калмана для задачи оценки вектора состояния макетов по измерениям навигационной системы;
- 2) предложена двухэтапная методика экспериментальной валидации модели движения макетов под управлением вентиляторных двигателей: на первом этапе проводится оценка параметров модели с помощью минимизации разности квадратов измерений и прогноза измерений с использованием метода Ньютона, на втором этапе производится валидации с помощью сравнения результатов экспериментов и результатов расчетов согласно модели;
- 3) создан программный комплекс для проведения лабораторных исследований работы алгоритмов управления движением макетов наноспутников на стенде с аэродинамическим столом;
- 4) разработана методика интерпретации результатов экспериментов, согласно которой был проведен анализ работоспособности алгоритмов управления на основе метода виртуальных потенциалов и на основе метода SDRE в задаче стыковки, алгоритма управления в задаче наблюдения за объектом космического мусора и алгоритма управления в задаче увода объекта космического мусора.

**Все результаты диссертации получены лично соискателем.**

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в предложенных математических моделях, предназначенных для моделирования движения макетов на аэродинамическом столе, в их численной и программной реализации, а также в создании программного комплекса для проведения экспериментов по лабораторным исследованиям алгоритмов управления в задачах группового полета.

**Теоретическая ценность** работы состоит в том, что разработаны модели движения макетов на аэродинамическом столе, тяги вентиляторных двигателей и навигационной системы, позволяющие исследовать работоспособность алгоритмов управления КА в плоскости орбиты.

**Практическая значимость** заключается в создании в том, что результаты лабораторных исследований алгоритмов управления движением могут быть учтены при разработке миссий по уводу объектов космического мусора с околоземной орбиты с использованием малых спутников.

**Достоверность результатов** работы обеспечивается с помощью проведенной валидации предложенных математических моделей с использованием численного моделирования управляемого движения и с использованием результатов экспериментов на лабораторном стенде. Достоверность результатов исследования алгоритмов управления движением подтверждается результатами интерпретации экспериментов.

Материалы диссертации полно представлены в 11 печатных работах, опубликованных соискателем: 6 из них – статьи в изданиях, индексируемых в международных базах Scopus и/или WoS, 6 из них в рекомендованных изданиях из списка ВАК. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в следующих работах:

1. Kozin F., Akhloumadi M., Ivanov D. Verification of Microsatellite Control Algorithms for Space Debris Removal Using UAV Mock-Ups on Planar Air Bearing Testbed // Drones – V. 7, I.1, 2023, 27p. (WoS, Scopus, ВАК)
2. Козин Ф.А. Программный комплекс для моделирования работы алгоритмов управления движением наноспутников на аэродинамическом столе // Математическое моделирование – Т.34, №10, 2022, с. 20-42. (Scopus, ВАК)
3. Akhloumadi M., Kozin F., Ivanov D. Laboratory Study of the Active Debris Removal Algorithms on Air-Bearing Test Bed // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering – V. 984, №. 1, 2020, 10 p. (WoS, Scopus, ВАК)
4. D. Ivanov, F. Kozin, M. Akhloumadi. Laboratory Study of Control Algorithms For Debris Removal Using CubeSat // Advances in Astronautical Sciences – V. 171, 2020, p. 101-117. (WoS, Scopus, ВАК)
5. Ivanov D., Ovchinikov M., Akhloumadi M., Kozin F., Atterwall P. Simulation and Laboratory Testing of the 3U CubeSat Control in the Proximity of Space Debris // Proceedings of 71st International Astronautical Congress – 2020, p. 231-240. (Scopus, ВАК)
6. Ivanov D., Akhloumadi M., Kozin F. Comparison of relative motion control algorithms for point capturing of space debris object // Proceedings of 72nd International Astronautical Congress – 2021, p. 352-361. (Scopus, ВАК)
7. Ахлумади М.Р., Иванов Д.С., Козин Ф.А. Исследование алгоритмов управления движением макетов микроспутников на аэродинамическом столе при сближении и захвате космического мусора // Тезисы докладов Международного семинара «Навигация и управлением движением», Самара, 2020, с. 96.
8. Ахлумади М.Р., Иванов Д.С., Козин Ф.А. Исследование алгоритмов управления движением космического аппарата при сближении с неко-оперирующим объектом космического мусора // Сборник тезисов XLVI Академических чтений по космонавтике, Москва, 2022, с. 96.
9. Ахлумади М.Р., Иванов Д.С., Козин Ф.А. Стыковка макетов микроспутников на аэродинамическом столе с использованием управления на основе метода потенциалов // Труды 62-й Всероссийской научной конференции МФТИ, Москва, 2019, 3 с.
10. Ахлумади М.Р., Иванов Д.С., Козин Ф.А. Моделирование и лабораторные испытания системы управления 3U CubeSat вблизи космического мусора// Труды 63-й Всероссийской научной конференции МФТИ, Москва, 2020, 2 с.



11. Программа для ЭВМ "Программный комплекс для моделирования работы алгоритмов управления движением наноспутников на аэродинамическом столе", авторы: Ф.А. Козин, Д.С. Иванов, М.Ю. Овчинников. Номер регистрации в Роспатенте 2022619159. Дата выдачи 25.05.2022.

**Личный вклад соискателя** состоит в разработке модели движения макета на аэродинамическом столе, реализации программного комплекса и проведении экспериментального исследования алгоритмов в задаче стыковки с макетом космического мусора и в задаче формирования траектории для наблюдения за макетом космического мусора. Соискателем был проведен сравнительный анализ двух подходов к управлению в задаче активного увода космического мусора.

Основные результаты диссертации докладывались на следующих научных конференциях и семинарах:

1. 62-ая, 63-ая научная конференция МФТИ (Долгопрудный, 2019, 2020).
2. XLVI Академические чтения по космонавтике (Москва, 2022).
3. Международный семинар «Навигация и управление движением» (Самара, 2020).
4. 5th IAA Conference on University Satellite Missions and CubeSat Workshop (Roma, 2020).
5. 71st and 72st International Astronautical Congress (CyberSpace Edition, 2020, Dubai, 2021).
6. Научные семинары 7-го и 15-го отделов ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

**Содержание диссертации соответствует специальности 1.2.2 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.**

Диссертация «Моделирование работы алгоритмов управления движением наноспутников на аэродинамическом столе» Козина Филиппа Александровича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Заключение принято на расширенном заседании научного семинара отдела № 15 «Математическое моделирование» ИПМ им. М. В. Келдыша РАН под руководством член-корр. РАН, д.ф.-м.н., зав. Отделом № 15 В.Ф. Тишкина и д.ф.-м.н., г.н.с. А.А. Кулешова.

Всего присутствовало на заседании 14 человек, из них 7 докторов наук и 5 кандидатов наук.

Результаты голосования: "за" – 14 чел., "против" – 0 чел. "воздержалось" – 0 чел. Протокол № 1 от "17" января 2023 г.



Тишкин Владимир Федорович  
член-корр. РАН, д.ф.-м.н., зав. Отд. №15



Кулешов Андрей Александрович  
д.ф.-м.н., г.н.с. отд. №15