

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.237.01,  
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ИНСТИТУТ  
ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ ИМ. М.В. КЕЛДЫША РАН»  
МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ  
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_  
решение диссертационного совета от 12.09.2023 г. № 11

О присуждении **Козину Филиппу Александровичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Моделирование работы алгоритмов управления движением наноспутников на аэродинамическом столе» по специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» принята к защите 22 июня (протокол заседания №11/пз) диссертационным советом 24.1.237.01, созданным на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН», 125047, Москва, Миусская пл., д. 4. Диссертационный совет утвержден приказом Минобрнауки России №118 от 24 февраля 2021 г.

Соискатель **Козин Филипп Александрович**, 05 августа 1983 года рождения, в 2006 году окончил магистратуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» по специальности «Прикладные математика и физика».

В 2009 году соискатель окончил очную аспирантуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего

образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» по направлению подготовки 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Работает в должности младшего научного сотрудника во временной научно-исследовательской лаборатории Интеллектуальные информационные системы в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

Диссертация выполнена в ФГУ ФИЦ «ИПМ им. М.В. Келдыша РАН».

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук, **Иванов Данил Сергеевич**, старший научный сотрудник отдела №7 «Динамика космических систем» ИПМ им. М.В. Келдыша РАН.

**Официальные оппоненты:**

**Морозов Виктор Михайлович**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Лаборатории навигации и управления Научно-исследовательского института механики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,

**Щеглов Георгий Александрович**, доктор технических наук, профессор (уч. зв.), профессор кафедры «Аэрокосмические системы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» -

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в своем **положительном** отзыве, подписанном **Белоконовым Игорем Витальевичем**, доктором технических наук, профессором, заведующим межвузовской кафедрой космических

исследований и **Ломакой Игорем Андреевичем**, кандидатом технических наук, старшим научным сотрудником НИЛ-102, указала, что диссертационная работа Козина Филиппа Александровича представляет собой завершённую научно-квалификационную работу в области лабораторного моделирования управляемого движения малых спутников.

Представленная диссертация вносит существенный вклад в исследования и разработку методов лабораторного моделирования работы алгоритмов управления движением при групповом полёте наноспутников и моделирования управляемого движения в задачах активного увода объектов космического мусора.

Предложенные модели движения макетов на аэродинамическом столе, тяги вентиляторных двигателей и навигационной системы позволяют провести исследования характеристик управляемого относительного движения космических аппаратов в плоскости орбиты. Результаты лабораторных исследований алгоритмов, полученных в диссертации, могут быть использованы профильными организациями (НПО им. С.А. Лавочкина, РКК Энергия, ИСС им. М.Ф. Решетнёва и др.) при разработке миссий по уводу объектов космического мусора. Кроме того, в диссертации представлены результаты исследования управляемого движения для разрабатываемой миссии на базе 3U-кубсата для наблюдения за объектом космического мусора.

Диссертационная работа «Моделирование работы алгоритмов управления движением наноспутников на аэродинамическом столе» в полной мере соответствует требованиям Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 «О порядке присуждения учёных степеней», а её автор Козин Филипп Александрович - заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Соискатель имеет 15 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 11 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 10 работ, в том числе 6 - в изданиях, включенных в список ВАК или индексируемых в международных базах (в Scopus – 6, в Web of Science - 3). Зарегистрирован программный комплекс [7] в Роспатенте. Сведения о публикациях в диссертации достоверны, а приводимые в диссертации результаты полностью опубликованы в работах соискателя.

Наиболее существенные работы представлены ниже:

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. – 2023. V. 7. № 1. Paper №7, 27p.
2. Козин Ф.А. Программный комплекс для моделирования работы алгоритмов управления движением наноспутников на аэродинамическом столе // Математическое моделирование. – 2022. Т.34. №10, с. 20-42.
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. – 2020. V.984. Paper № 012026, 10p.
4. Ivanov D., Kozin F., Akhloumadi M. Laboratory Study of Control Algorithms For Debris Removal Using CubeSat // Advances in Astronautical Sciences. – 2020. V. 171, p. 101-117.
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, CyberSpace Edition. – 2020. Paper IAC-20.A6.5.5, p. 231-240.
6. Ivanov D., Akhloumadi M., Kozin F. Comparison of relative motion control algorithms for point capturing of space debris object // Proceedings of 72<sup>nd</sup> International Astronautical Congress, Dubai. – 2021. Paper IAC-21.A6.5.3, p. 352-361.

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2022619720. Программный комплекс для моделирования работы алгоритмов управления движением наноспутников на аэродинамическом столе / Козин Ф.А., Иванов Д.С., Овчинников М.Ю.; Правообладатель ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. - Заявка №2022619159 от 19.05.2022. Оpubл. (зарег.): 25.05.2022. Бюл. №6 . – 1 с.

В работах [1,3-5] вклад диссертанта заключался в разработке математической модели движения макета на аэродинамическом столе, реализации программного комплекса и проведении экспериментального исследования алгоритмов в задаче стыковки с макетом космического мусора и наблюдения макета космического мусора. В работе [6] диссертантом был проведен сравнительный анализ двух подходов к управлению в задаче активного увода космического мусора. Персональная работа [2] посвящена описанию разработанного программного комплекса.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы ведущей организации, отзывы оппонентов, а также 3 положительных отзыва на автореферат. Отзывы содержат ряд замечаний.

**В отзыве ведущей организации Самарский национальный исследовательский университет:**

1. Не понятно определение «эффективный» угол установки вентилятора.

2. При указанной схеме установки вентиляторов (рисунок 1.3) возможно взаимовлияние потоков воздуха и возникновение возмущений, не учитывающееся в модели движения макета.

3. Не обоснован вид полинома в формуле 1.7, определяющего дисторсионные искажения камеры.

4. Не указано, возможна ли реализация программы управления движением на бортовом компьютере макета для реализации автономного сближения с объектом космического мусора.

**В отзыве официального оппонента Морозова Виктора Михайловича:**

1. В работе не проведен анализ управляемости рассмотренной системы уравнений управляемого движения макетов на аэродинамическом столе и не проведен анализ наблюдаемости с использованием измерений навигационной системы.

2. В описании алгоритма SDRE матрица динамики системы  $A$  в явном виде не является функцией от вектора состояния  $\bar{X}$ , что противоречит исходным предположениям для использования этого алгоритма. Следовало бы привести зависимость относительной угловой скорости  $\omega_{\text{отн}}$  и её производной от вектора состояния в явном виде.

3. В тексте диссертации нет описания методики получения полиномиальной зависимости возмущающих ускорений от положения макета на столе, компенсация которых позволяет улучшить точность отслеживания траектории.

4. В ряде мест текста диссертации используются неудачные обозначения, затрудняющие чтение материала, есть ошибки в подписях рисунков.

**В отзыве официального оппонента Щеглова Георгия Александровича:**

1. В предложенных моделях рассматриваются только возмущения, зависящие от положения объектов на столе. Возмущения, зависящие от скорости движения, автором не рассматриваются, хотя их учет, как представляется, мог бы повысить эффективность алгоритмов коррекции.

2. В тексте диссертации вектор управляющих ускорений имеет разную размерность. Например, в формуле (1.4) его размерность равна двум - учитываются только поступательные ускорения, а в формуле (1.10) размерность равна трем. Из текста диссертации не ясно учитывалось ли

автором угловое управляющее ускорение, поскольку в расшифровке формулы (1.10) вектор управляющих ускорений не раскрыт.

3. Насколько можно понять из описания разработанного программного комплекса, автор не использовал для его работы операционные системы реального времени. В тексте диссертации нет комментариев относительно допустимости такого решения. Не ясно также, как осуществлялась привязка экспериментов к реальному времени в процессе протоколирования результатов экспериментов.

4. В работе все рассматриваемые погрешности указаны в тексте диссертации в абсолютных, а не в относительных величинах, что затрудняет оценку точности алгоритмов.

5. К тексту диссертации имеются редакционные замечания, затрудняющие восприятие работы: имеются опечатки, например, у рисунков 3.18 и 3.19 подпись является одинаковой; используются нестандартные термины, в частности использован англоязычный термин «актюатор» вместо эквивалентного отечественного термина «исполнительное устройство».

**В отзыве на автореферат к.т.н. Мухина Александра Владимировича, начальника отделения 122 АО «ЦНИИмаш»:**

1. К недостаткам работы можно отнести общую непроработанность структуры автореферата диссертации. В частности, в автореферате отсутствуют чётко сформулированные: постановка задачи и описание её решения, применяемые ограничения и особенности используемых математических моделей, а также требования к получаемым результатам и выбранные критерии оценки их эффективности. Отсутствие перечисленных структурных элементов, характерных для большинства научных работ, затрудняет понимание сложности и объёма работ, выполненных соискателем при подготовке диссертации.

**В отзыве на автореферат к.т.н. Прутько Алексея Александровича, старшего научного сотрудника отдела динамики и программного**

**обеспечения систем управления движением и навигации ПАО «РКК «Энергия»:**

1. Из автореферата не до конца понятно, навигация при помощи Aruco-меток и камеры используется только для логирования эксперимента, или измеренный вектор состояния передается в бортовые алгоритмы управления;
2. Из автореферата не понятно, каким образом задаются внешние возмущения для поступательного и вращательного движения, которые имитируют орбитальное движение.

**В отзыве на автореферат к.т.н. Розенгауза Михаила Борисовича, старшего научного сотрудника АО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор»:**

1. Отсутствует сравнение предлагаемых программно-алгоритмических средств с существующими в настоящее время.
2. Недостаточно отражена практическая значимость проведенных исследований.
3. Имеется ряд редакционных замечаний, например, на стр.8 в выражении (1) отсутствует «радиус-вектор одного из космических аппаратов относительно второго космического аппарата в орбитальной системе координат», хотя далее утверждается, что он должен быть.

В целом в присланных отзывах отмечается, что замечания не являются существенными, а диссертационная работа соискателя направлена на решение актуальной задачи и обладает научной новизной. Указывается, что содержание и результаты работы удовлетворяют паспорту научной специальности 1.2.2. и соответствуют требованиям п. 9 Постановления Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их квалификацией и большим опытом в области математического моделирования управления космическими аппаратами, что**

подтверждается их многочисленными научными публикациями по тематике диссертационной работы, а также опытом преподавания связанных дисциплин у оппонентов и сотрудников ведущей организации.

**Диссертационный совет отмечает**, что на основании выполненных соискателем исследований:

1. **разработаны** математические модели движения макетов на аэродинамическом столе, модель исполнительных элементов и модель навигационной системы, позволяющие провести исследование управляемого движения под действием предложенных алгоритмов; адаптирован алгоритм на основе фильтра Калмана для задачи оценки вектора состояния макетов по измерениям навигационной системы.

2. **предложена** методика валидации разработанных математических моделей на основе данных лабораторных экспериментов и предложена методика интерпретации результатов лабораторных экспериментов по исследованию алгоритмов управления относительным движением макетов для решения практических задач: задачи стыковки, задачи наблюдения за объектом, задачи активного увода объектов космического «мусора» с населенных орбит;

3. **разработан** программный комплекс, в котором используются разработанные модели и алгоритмы управления макетами космических аппаратов, для проведения экспериментов по исследованию алгоритмов управления космическими аппаратами в задачах группового полета;

4. **выполнено исследование** характеристик управляемого движения макетов космических аппаратов в задачах группового полета, выявлены границы применимости ряда алгоритмов управления движением согласно методике интерпретации результатов экспериментов.

**Теоретическая значимость исследования** заключается в том, что предложенные модели движения макетов на аэродинамическом столе, тяги вентиляторных двигателей и навигационной системы позволяют исследовать

работоспособность алгоритмов управления космическими аппаратами в плоскости орбиты в задачах группового полёта.

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики** состоит 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. В частности, на лабораторном стенде были проведены исследования управляемого движения для разрабатываемой миссии по наблюдению за объектом космического мусора.

**Оценка достоверности результатов исследования** выявила качественное и количественное согласие полученных результатов численного моделирования управляемого движения с результатами экспериментов на лабораторном стенде.

**Личный вклад соискателя** состоит в разработке математических моделей движения макетов на аэродинамическом столе, модели вентиляторных двигателей с учетом эффективного угла установки двигателя и модели навигационной системы. Модели были валидированы при помощи предложенной методики валидации на основе эксперимента на стенде. На основе моделей соискателем был разработан программный комплекс, позволяющий проводить эксперименты по исследованию алгоритмов управления космическими аппаратами в задачах группового полета. Была разработана методика интерпретации, позволившая на основании серии экспериментов исследовать границы применимости алгоритмов управления в задаче стыковки с некооперирующим объектом космического мусора на основе метода виртуальных потенциалов и на основе State Dependent Riccati Equation (SDRE).

Прослушав выступление соискателя, вопросы ему задали члены совета Н.В. Змитренко, И.С. Меньшов, Б.Н. Четверушкин, М.В. Якобовский.

Соискатель содержательно ответил на все заданные в ходе защиты вопросы и замечания, приведенные в отзывах.

Во время дискуссии в поддержку диссертации выступили: М.Ю. Овчинников (заведующий отделом №7 ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, д.ф.-м.н. профессор), члены совета - И.С. Меньшов, В.Ф. Тишкин и председатель совета Б.Н. Четверушкин.

**На заседании 12 октября 2023 г. диссертационный совет принял решение:** за разработку математических моделей движения макетов на аэродинамическом столе и их программную реализацию, позволяющую проводить лабораторные исследования работы алгоритмов управления движением макетов наноспутников на стенде с аэродинамическим столом, присудить Козину Филиппу Александровичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за 16 против - нет действительных бюллетеней – 1.

Председатель  
диссертационного совета 24.1.237.01

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.1.237.01

  
  
Четверушкин Борис Николаевич

  
Корнилина Марина Андреевна

12 октября 2023 г.