

ОТЗЫВ

официального оппонента Купреева Сергея Алексеевича на диссертацию Пикалова Руслана Сергеевича на тему «Динамика сближения космического буксира с крупногабаритными объектами космического мусора», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин

Актуальность темы исследований. Проблема засорения околоземного космического пространства объектами техногенного происхождения в настоящее время перешла из разряда научно-технических вызовов в категорию глобальных угроз, непосредственно влияющих на безопасность, экономику и долгосрочную устойчивость всей космической деятельности человечества. С каждым годом наблюдается не просто устойчивый, а лавинообразный рост числа объектов космического мусора (КМ), и, по прогнозам ведущих мировых космических агентств, даже полное прекращение новых запусков уже не способно остановить процесс неконтролируемого увеличения их количества из-за продолжающихся столкновений между уже существующими объектами. Это явление, известное как синдром Кesslera, в своём предельном состоянии способно сделать целые диапазоны низких околоземных орбит полностью непригодными для практического использования на десятилетия и даже столетия, что поставит под угрозу не только пилотируемые программы и спутниковые системы связи и навигации, но и фундаментальные научные исследования, а также перспективы промышленного освоения космоса.

Особую опасность представляют крупногабаритные объекты КМ, такие как отработавшие ступени ракет-носителей и разгонные блоки, масса которых может достигать нескольких тонн. На сегодняшний день только на орбитах находится порядка 300 верхних ступеней ракеты-носителя «Космос-3М» и сотни аналогичных объектов других типов. Столкновение такого объекта с действующим космическим аппаратом неизбежно приведёт к его полному разрушению с образованием тысяч новых, зачастую неотслеживаемых, фрагментов, что создает эффект «домино» и многократно ускоряет процесс деградации околоземного пространства. В связи с этим ведущие космические державы и международные организации (ООН, ЕКА, НАСА) признали активное удаление крупногабаритного КМ одной из приоритетных задач

Входящий №	206-1576
Дата	26 АВГ 2026
Самарский университет	

современной космонавтики, а реализация пилотных миссий по уборке орбит стала не просто научной дискуссией, а вопросом ближайших лет.

Одним из наиболее перспективных и технически реализуемых подходов к решению этой проблемы является использование специализированных космических буксиров, оснащённых системами захвата КМ на основе гибких тросовых связей. Гибкая связь имеет ряд неоспоримых преимуществ перед жесткими манипуляторами: она позволяет осуществлять захват объектов, совершающих неконтролируемое вращение с большой угловой скоростью, допускает применение широкого арсенала средств захвата (гарпуны, сети, автономные стыковочные модули), обеспечивает возможность аварийного сброса захваченного объекта в критической ситуации и, что особенно важно, не требует предельно точного позиционирования буксира в непосредственной близости от цели, что значительно снижает риски столкновения на этапе захвата.

Однако ключевым и пока недостаточно проработанным этапом всей миссии по уводу КМ является процесс сближения буксира с захваченным объектом после того, как тросовая связь уже установлена. Именно на этом этапе – этапе свёртывания (смотки) троса – возникают наиболее сложные динамические задачи. Во-первых, необходимо обеспечить безударное сближение, так как любое соударение буксира и объекта КМ может привести к разрушению обоих аппаратов и образованию новых, ещё более мелких и трудно отслеживаемых фрагментов мусора, что полностью нивелирует цель миссии. Во-вторых, процесс свёртывания неизбежно сопровождается возникновением продольных и поперечных колебаний самого троса, которые, при неблагоприятных условиях, могут перерасти в неконтролируемое вращение всей связки или привести к запутыванию и обрыву троса. В-третьих, значительная часть крупногабаритного КМ движется по эллиптическим орбитам, что существенно усложняет управление из-за переменного гравитационного поля, и разработанные ранее для круговых орбит законы управления оказываются неэффективными или вовсе неприменимыми. Наконец, любая теоретическая разработка имеет ценность только тогда, когда она может быть реализована в конкретном техническом устройстве с учётом реальных ограничений по массе, габаритам, энергопотреблению и условиям эксплуатации в космосе.

Таким образом, диссертационная работа Р.С. Пикалова, направленная на комплексное решение проблемы – от разработки математических моделей

и синтеза новых законов управления длиной троса (включая сложные случаи эллиптических орбит и выравнивания скоростей) до создания технического облика и определения требований к исполнительному механизму (лебедке) – является не просто своевременной, а критически актуальной для развития практической космонавтики. Полученные в работе результаты имеют прямое применение не только в задачах уборки КМ, но и могут быть использованы при проведении спасательных операций, возвращении космонавтов на станцию после внекорабельной деятельности, а также в других транспортных операциях на околоземных орбитах. Высокий уровень актуальности подтверждается также тем, что исследование выполнялось при поддержке грантов Российского научного фонда (проекты №№ 16-19-10158, 19-19-00085, 22-19-00160), а его результаты уже нашли отражение в актах о возможности использования в АО «РКЦ «Прогресс» и о внедрении в учебный процесс Самарского университета.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций. Автором корректно сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет. Обоснованность научных положений и выводов обеспечивается использованием апробированных методов классической и аналитической механики (уравнения Лагранжа, принцип Д'Аламбера, теорема Ляпунова об устойчивости по первому приближению), корректным построением математических моделей различной степени сложности (от одномерной модели до плоской модели орбитального движения), а также проведением верификации результатов с помощью численного моделирования.

Предложенные законы управления (нелинейный закон для круговых орбит, закон для выравнивания скоростей, закон для эллиптических орбит) строго выводятся из постановки задачи и полученных уравнений движения. Анализ устойчивости управляемого движения на эллиптической орбите проведен с применением строгого математического аппарата. Достоверность результатов подтверждена успешным сравнением аналитических решений (для частных случаев) с результатами численного интегрирования полных нелинейных уравнений. Получен акт о возможности использования результатов в АО «РКЦ «Прогресс», что также свидетельствует о практической обоснованности работы. Научные выводы и практические рекомендации, включая технические требования к механизму лебедки, представляются хорошо обоснованными.

Оценка новизны и достоверности. В диссертационной работе получен ряд новых, значимых для науки и практики результатов. К наиболее существенным элементам научной новизны можно отнести:

1. Разработку нелинейного закона управления длиной троса, представленного в виде тригонометрического ряда, который гарантирует безударное сближение буксира и объекта КМ на круговой орбите. Новизна заключается в предложенной параметризации закона и доказательстве его эффективности для обеспечения требуемой кинематики процесса.
2. Создание закона управления длиной троса для выравнивания орбитальных скоростей буксира и КМ до начала этапа сближения. Этот результат является ключевым для практической реализации миссии, так как позволяет подготовить систему к безударной смотке троса.
3. Разработку оригинального закона управления, обеспечивающего сближение на эллиптических орбитах в отсутствии тяги двигателей буксира. Это существенное расширение области применимости предложенного подхода, поскольку большая часть крупного КМ находится именно на таких орбитах. Новизна подтверждена строгим доказательством асимптотической устойчивости полученного управления.
4. Получение функциональной зависимости для параметров системы, обеспечивающей гашение углового движения связки. Это позволяет решить проблему неконтролируемого вращения системы в процессе транспортной операции.
5. Синтез технического облика и определение требований к механизму лебедки, включая кинематический анализ и расчет необходимой мощности сервопривода. Этот результат переводит теоретические разработки в плоскость инженерной реализации.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Она базируется на корректной механической постановке задач, использовании строгих математических методов, верификации аналитических решений численными методами, а также сопоставлением с известными данными (например, при выборе параметров троса на основе миссии YES-2). Основные результаты опубликованы в 18 работах, в том числе в рецензируемых журналах из перечней Scopus, Web of Science и ВАК, а также прошли

апробацию на многочисленных международных и всероссийских конференциях.

Замечания по диссертационной работе в целом.

1. В работе рассматривается плоское движение системы. В то же время реальная задача является пространственной, и влияние третьей координаты (выход из плоскости орбиты) может быть существенным, особенно на эллиптических орбитах. Не совсем ясно, насколько предлагаемые законы управления, доказавшие свою эффективность в плоском случае, чувствительны к пространственным возмущениям, и требует ли это дополнительной модификации.

2. При моделировании вязкоупругого троса используется линейная модель (сила упругости пропорциональна деформации, демпфирования – скорости деформации). В реальности тросы (особенно из кевлара) могут обладать нелинейными свойствами (например, зависимость модуля Юнга от деформации, гистерезис). В работе не обсуждается влияние возможной нелинейности свойств материала на точность моделей и на результаты моделирования, особенно в режимах с большими динамическими нагрузками.

3. В задаче управления разворачиванием для выравнивания скоростей (глава 4) рассматриваются два этапа: разворачивание и последующее свертывание. Однако в работе не приводится анализ переходного процесса между этими двумя этапами и не оценивается влияние возможных остаточных колебаний на начало этапа сближения, что могло бы дополнить исследование.

Отмеченные недостатки не носят принципиального характера и не влияют на положительную оценку диссертации в целом.

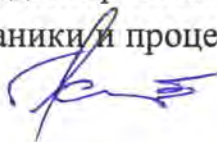
Заключение. Диссертационная работа Пикалова Руслана Сергеевича является завершенным научно-квалификационным исследованием, содержащим решение актуальной научно-технической задачи – разработки теоретических основ и технических решений для управления процессом безударного сближения космического буксира с крупногабаритным космическим мусором с использованием тросовой системы. Полученные результаты обладают несомненной научной новизной и практической значимостью.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Диссертационная работа соответствует требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней в Самарском университете, а ее

содержание соответствует паспорту специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин (по пунктам 1, 2, 5 и 10).

Таким образом, Пикалов Руслан Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин.

Официальный оппонент, доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры механики и процессов управления инженерной академии
РУДН



Купреев Сергей Алексеевич

21 августа 2026 г.

Контактные данные:

тел.: +7(495) 995-09-61, e-mail: kupreev-sa@rudn.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена
диссертация: 05.07.09 – Динамика, баллистика, управление движением
летательного аппарата.

Адрес места работы: 117198 г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.6.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Российский университет дружбы народов имени
Патриса Лумумбы», инженерная академия, кафедра механики и процессов
управления

Подпись д.т.н., доц. Купреева Сергея Алексеевича удостоверяю.

Ученый секретарь ученого совета инженерной академии РУДН,

кандидат технических наук, с.н.с.




О.Е. Самусенко