

Отзыв официального оппонента
на диссертационную работу Пикалова Руслана Сергеевича «ДИНАМИКА
СБЛИЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКОГО БУКСИРА С КРУПНОГАБАРИТНЫМИ
ОБЪЕКТАМИ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА», представленную на соискание учёной
степени кандидата технических наук по специальности 1.1.7. «Теоретическая механика,
динамика машин»

Диссертация Р.С. Пикалова **посвящена** исследованию рациональных законов управления тросом, связывающим буксир с неуправляемым космическим объектом для их безопасного сближения, и динамики этого процесса. В качестве основного приложения рассмотрены разгонный блок «Волга» в качестве буксира и отработавшая орбитальная ступень ракеты-носителя «Космос-3М» как неуправляемый объект.

Масштабное расширение деятельности в околоземном космическом пространстве и неуклонный рост космического мусора (КМ) являются объективными факторами, ставящими рассмотренную в диссертации тему увода КМ с помощью тросовой системы в разряд **важных и актуальных**. Использование троса в различных космических операциях давно вышла за рамки только поисковых исследований. Так, в 90-х годах прошлого века по программе Small Expendable Deployer System (SEDS) была проведена серия успешных экспериментов по отработке технологии спуска груза с орбиты без энергетических затрат с использованием длинных (20 км) тросовых систем. Подобный, правда, чуть менее успешный, эксперимент (YES2) с тросом длиной 30 км в 2007 г. проводился и на самарском (ЦСКБ «Прогресс») спутнике «Фотон-М».

Разработанная методика применения тросовых систем для захвата и увода крупных неуправляемых космических объектов может найти и иные приложения кроме КМ, например, такие как спасение космических аппаратов (КА) в нештатных ситуациях, транспортное обслуживание орбитальных мастерских по ремонту и утилизации КА и др.

Управление тросовой системой (ТС) и ее динамика, особенно с учетом упругости, в условиях невесомости и отсутствия точки опоры являются достаточно сложными задачами механики. Что, к сожалению, подтверждает и большое количество неудач в летных экспериментах с ТС, проводившихся разными странами и компаниями на протяжении полувека. Поэтому проведенное Р.С. Пикаловым исследование с ориентацией на реализуемость получаемых результатов, несомненно, должно способствовать успеху будущих миссий.

Диссертация, объёмом 143 стр., состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованных источников и двух приложений. Список использованных

Входящий №	206-7442
Дата	31 АВГ 2026
Самарский университет	

источников содержит 145 работ, которые достаточно полно отражают область исследований диссертанта. В качестве приложений приведены «Акт о возможности использования результатов диссертационных исследований» от АО «РКЦ «Прогресс» и «Акт о внедрении (использовании) результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс» от Самарского университета.

Во **введении** сформулированы цель и задачи исследования; обоснованы актуальность темы, степень ее проработки; дана общая характеристика методического подхода к их решению; перечислены основные принятые в диссертации допущения; сформулированы выносимые на защиту положения; в целом, корректно обозначена новизна и практическая значимость диссертационной работы. Отмечено, что основные результаты по теме диссертации опубликованы в 18 статьях, в том числе, 9 - в журналах, индексируемых в WoS/Scopus, 2 – в журналах, рекомендованных ВАК РФ, и доложены на 10 международных и российских конференциях. Корректные ссылки на собственные публикации, имеющие отношение к материалам каждой главы, даны в конце этих глав.

Автор отмечает отличительную особенность своей работы – акцент на применение известных подходов к уводу КМ тросовыми системами для крупногабаритных (по сравнению с буксиром) объектов и на возможность реализации законов управления на современном уровне технических требований к механизмам, в частности, лебедкам.

В **первой главе** описано современное состояние проблемы борьбы с засорением околоземного пространства; дана классификация КМ; описаны имеющие непосредственное отношение к диссертации активные методы увода связки космического буксира (КБ) и КМ с управлением длиной троса; обоснованы цель исследования и общая постановка соответствующих задач. К сожалению, в обзоре публикаций по теме диссертации, выполненной, в целом, очень обстоятельно, не нашлось место работам ученых МГУ (см., например, Diakov, P.A., Malashin, A.A., Smirnov, N.N. Problem of load transportation along a space tethered system. *Acta Astronautica*, v. 150, 2018, P. 44-48).

Рассмотренный в диссертации этап миссии по уводу КМ наглядно обозначен на рис. 1.11. Отмечено одно из важных, на мой взгляд, преимуществ использования управляемых ТС для увода крупногабаритного КМ – возможность при определенных условиях этими же средствами стабилизировать КМ, который с высокой вероятностью в начальный момент совершает хаотичное вращение. Проведенный обзор литературы

автор использовал для выделения цели своей диссертационной работы: разработке комплексной системы захвата и безударного процесса увода крупногабаритных объектов КМ на базе КБ с механизмом лебедки, обеспечивающей эффективное управление длиной троса.

В целом, материалы этой главы дают правильное представление о глубине проблемы и достигнутых успехах в ее решении теоретического и практического плана, что свидетельствует о хорошей ориентации автора в этом вопросе.

В главе 2 представлена простейшая одномерная математическая модель стягивания тросом КБ и КМ. Введен закон управления жестким и вязкоупругим тросом, обеспечивающий выполнение граничных условий процесса. Однако, выполнимость двух из четырех сформулированных в постановке задачи требований, чтобы «3. Работа тяги за время манёвра должна быть минимальной; и 4. Трос на протяжении всего манёвра находится в нагруженном состоянии» при выбранном законе управления (2.7) не доказана. Проведенное автором численное моделирование показало характерные особенности изучаемого динамического процесса, в том числе, что выбранный закон управления длиной троса позволяет осуществлять безударное сближение КБ с КМ. Результаты этой главы **важны**, т.к. обосновывают базу для дальнейшего исследования динамики ТС для все более общих моделей движения.

Несколько замечаний к главе 2, из-за которых она, в целом, оказалась не самым сильным местом в диссертации:

1. На стр. 45-46 читаем: «...Следовательно, **без ограничения общности** (здесь и далее текст выделен оппонентом) *перепишем неравенство (2.20) в следующем виде: ... (2.21)*». Однако, хотя условие (2.21) остается необходимым для минимума тяги, как и (2.20), но область неопределенности положения минимума в случае (2.21), шире, чем в (2.20). Поэтому оценка (2.21) верна, но не эквивалентна (2.20).

2. На стр. 42: «Введённые граничные условия (2.5) обеспечивают равенство нулю *относительной скорости*.» Это так, но не во всем процессе, а только на его концах.

3. На стр. 46: «При выполнении условия (2.22) трос остается в нагруженном натянутом состоянии на протяжении всего манёвра. ... физически возможно, чтобы, в этом случае происходит выпуск (развёртывание) троса. В конечном счете, это приводит к увеличению времени выполнения манёвра, дополнительным затратам энергии и к усложнению конструкции механизма свёртывания троса....» (здесь и далее

при цитировании текста диссертации сохранена орфография автора). Во-первых, это утверждение противоречит приведенному ранее на стр. 42 (см. п. 2), а во-вторых, возможность размотки троса может увеличить время сближения, но, что более важно, позволит снизить риск обрыва троса при увеличении натяжения, как, например, это предусмотрено фрикционом спиннинговой катушки.

4. На стр. 46: «...физически возможно, чтобы $T \leq 0$, в этом случае происходит выпуск (развёртывание) троса.» Как раз физически непонятно, что означает отрицательная сила натяжения T (провисший трос отталкивает КБ от КМ?). На самом деле, появление отрицательной силы натяжения – это издержки принятой в этой главе упрощенной модели троса и никакого физического смысла не имеет, кроме сигнала исследователю о том, что принятая модель с этого момента времени перестает работать.

5. На рис. 2.1 и 2.2, призванных иллюстрировать динамическую модель связки КБ + КМ, не указана сила натяжения троса. Не исключено, что более аккуратная схема позволила бы избежать указанной в п. 4 неточности.

6. На стр. 48: «Мы получили, что работа силы T не зависит от коэффициентов a_{2i+1} . А с точки зрения безударного движения и сохранения троса в натянутом состоянии, для поддержания постоянной связи, **наиболее желательный случай**, когда коэффициент $a_1=1$, следовательно, **все остальные коэффициенты равны нулю**.». Если для выбора значений коэффициентов ряда (обнуления всех кроме одного) в принятом законе управления главное основание – «желательный случай», то зачем автор исследовал влияние этих коэффициентов?

7. На стр. 49: «Как было получено из результатов моделирования, **брать $n>0$** (т.е. учитывать все гармоники, кроме первой – прим. оппонента) **лишено практического смысла** – в режиме движения появляются лишь дополнительные гармоники, приводящие...». Как видно из рис. (2.5), (2.6), движения КБ и КМ имеют колебательный характер, что может быть связано не столько с физикой процесса, сколько с априори заданной гармонической структурой закона управления.

8. На стр. 49: «Из рисунка 2.5 видно, что при значениях $a_1=0$ и $a_3=1$ **дважды происходит соударение буксира и мусора**.». На самом деле, соударение только одно – при первом совпадении координат груза и буксира. Повторное их равенство означало бы разъединение тел, однако, после соударения продолжение графика просто теряет смысл.

9. На стр. 50: «Отметим следующий факт, при значениях $T=0$ трос находится в состоянии покоя – свёртывание не происходит.» Свёртывание и развёртывание определяется производной dl/dt , а не силой натяжения троса, которая положительна во всех случаях без провисания, в последнем случае она обнуляется.

10. На стр. 51: «Во второй главе **получен**: нелинейный закон управления...» Точнее было бы: не «получен», а обосновано его задание, поскольку структура закона управления установлена априори.

Указанные замечания хотя и снижают качество диссертации, но не оказывают принципиального влияния на оценку представленной работы, т.к. являются следствием лишь недостаточно аккуратной интерпретации результатов, а не самих результатов. Забегая вперед, замечу, что качество изложения остальных глав существенно выше. Это, возможно, объясняется тем, что исследования главы 2 относятся к первым шагам диссертанта в разработке темы. Так что замеченный рост уровня изложения в последующих главах – свидетельство научного роста диссертанта в процессе учебы в аспирантуре и работы под руководством профессора В.С. Асланова.

В **главе 3** записаны уравнения движения связки КБ + КМ для плоской круговой орбиты; исследовано влияние параметров троса на ее динамику при жесткой сцепке и с демпфером. **Важными результатами** здесь представляются полученная диссертантом аналитическая зависимость частоты колебаний троса от его длины, и результаты численного анализа процесса стягивания системы КБ + КМ тросом с демпфером.

Некоторые замечания к главе 3:

1. На стр. 52: «На точку S_1 действует постоянная сила F - тяга двигателей буксира, направленная вдоль линии S_2S_1 , и сила натяжения вязкоупругого троса T_t . На точку S_2 действует сила натяжения вязкоупругого троса T_t .» Как следует из контекста и рис. 3.1 под силами здесь понимаются векторы. Но тогда на точку S_1 должна действовать сила $(-T_t)$ в направлении, противоположном T_t .

2. На постановочном рис. 3.1 опечатка в изображении вектора Δ .

В **главе 4** рассмотрены две интересные задачи синтеза управления. Одна рассматривает угловое движение связки КБ + КМ при движении по круговой орбите и ставит целью остановку ее вращения и последующую стабилизацию при сближении. Решение второй задачи направлено на выравнивание относительных линейных скоростей КБ и КМ перед сближением.

Важными результатами решения этих задач являются: предложенный диссертантом закон управления тягой двигателей системы ориентации КБ и длиной троса, а также выведенный критерий (4.13) для значений параметров связки, при которых не развивается ее вращение. Эффективность выполнения поставленных задач подтверждена численным моделированием. Закон управления длиной троса (4.34) является модификацией закона, введенного во главе 2. Это иллюстрирует характерный для диссертанта логичный прогрессирующий подход к изложению постановки и результатов исследования: от простого к сложному, при котором полученные на предыдущем этапе аналитические результаты используются в качестве обоснованной базы формирования законов управления для усложняющихся моделей.

В главе 5 исследовано управление тросом и динамика связки КА, когда КМ и КБ находятся на эллиптической орбите и буксир не использует тягу.

Эллиптичность орбиты как фактор длиннопериодического траекторного движения, казалось бы, не должна кардинально влиять на угловое движение ТС при сближении КА. Однако, в работах ученых Самарского университета показано, что в зависимости от параметров связки могут наблюдаться неустойчивые положения равновесия, а в силу действия периодических возмущений, связанных с малым эксцентриситетом орбиты, могут возникать хаотические явления, приводящие к значительным эволюциям углового положения КА. Поэтому глава 5 диссертации изначально **представляется важной**.

При исследовании влияния эллиптичности орбиты диссертант применил модель движения связанной системы тел П. Вильямса с разумными упрощениями, пренебрегая влиянием аэродинамических сил и массой троса. Это позволило провести качественный анализ остающейся все еще достаточно сложной нелинейной динамической системы в зависимости от параметров и исследовать устойчивость периодических движений на основе теоремы Ляпунова об устойчивости по первому приближению. Получена широкая область значений параметров закона управления тросом, при которых движение асимптотически устойчиво. Также диссертантом выявлена интересная особенность процесса сближения буксира с КМ: с ростом эксцентриситета орбиты уменьшается время выполнения такого маневра.

В главе 6 определен практический облик каждого элемента тросовой системы, в том числе, представлена схема и состав лебёдки, обеспечивающей процесс свёртывания троса и реализацию полученных в работе законов управления. Материалы этой главы

подчеркивают главную особенность диссертации – нацеленность на практическую реализацию теоретических результатов.

Согласно данным выше оценкам каждой главы, диссертант, в целом, верно оценил новизну основных результатов своей работы. Автореферат соответствует тексту диссертации. Основные результаты, содержащиеся в диссертации, опубликованы в 2017 – 2025 гг., в том числе 2 статьи – в рекомендованных ВАК изданиях.

Таким образом, диссертация Р.С. Пикалова представляет собой законченное научное исследование, выполненное на актуальную тему с использованием современных методов. Его результаты имеют научную и практическую значимость, что подтверждается и Актом АО «РКЦ «Прогресс». Работа соответствует требованиям ВАК и заслуживает положительной оценки, а ее автор - присвоения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.1.7. Теоретическая механика, динамика машин.



24.08.2026

Филатьев Александр Сергеевич
доктор технических наук
Ведущий научный сотрудник
Факультет космических исследований
МГУ имени М.В. Ломоносова
119991, Ленинские горы, д. 1, стр. 52.
Тел.: +7 916 615 6606
Э/почта: filatyev@yandex.ru

Подпись Филатьева Александра Сергеевича заверяю:



В.В. Сазонов
Декан Факультета космических исследований
МГУ имени М.В. Ломоносова