

**ОТЗЫВ официального оппонента**  
**на диссертацию на соискание ученой степени**  
**кандидата физико-математических наук**  
**Буланова Дениса Михайловича**  
**на тему «Исследование эволюции вращательного движения**  
**искусственного спутника Земли»**  
**по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика»**

Диссертация Д.М. Буланова посвящена исследованию возможности описания реального вращательного движения двух однотипных искусственных спутников Земли (ИСЗ) Фотон-12 и Фотон М-2 при помощи эволюционных уравнений, полученных В.В. Белецким, и изучению связи между решениями полных уравнений движения, используемых для определения вращательного движения, и эволюционных уравнений движения. **Актуальность темы** не вызывает сомнения как в практическом смысле из-за необходимости знания углового положения ИСЗ при интерпретации показаний исследовательских приборов, установленных на спутнике, так и в теоретическом смысле ввиду продемонстрированной возможности использовать упрощенные математические модели при моделировании установившегося к концу полета вращательного движения космического аппарата.

**Анализ содержания и основных результатов работы.** Диссертация объемом 120 страниц состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы, включающего 68 наименований.

Во введении дана общая характеристика работы: освещена актуальность темы, сформулированы цели и задачи работы, ее теоретическая и практическая значимость, научная новизна, достоверность, раскрыта апробация работы, перечислены используемые методы, приведены положения, выносимые на защиту, приведен обзор литературы.

Первая глава посвящена обработке магнитных измерений с целью определения неуправляемого вращательного движения исследуемых

спутников. Несмотря на упрощение математической модели вращательного движения, в частности, за счет принятия исследуемых спутников динамически симметричными твердыми телами, полученные результаты дали полное представление о движении спутника. Автором отмечена близость вращательного движения обоих спутников к регулярной прецессии Эйлера, установившейся в конце полета. Также определены предельные значения продольной компоненты угловой скорости, близость к которым в последствии позволила перейти к описанию установившегося вращательного движения спутника с помощью обобщенно-консервативной модели.

Во второй главе автором подробно исследуются эволюционные уравнения В.В.Белецкого, полученные усреднением уравнений движения относительно центра масс по регулярной прецессии Эйлера. Решения усредненных уравнений сравниваются с компонентами орта собственного кинетического момента, рассчитанными вдоль решений системы уравнений движения, используемых для определения вращательного движения из первой главы. В работе результаты обработки измерений на большом числе интервалов времени напрямую сопоставлены с усредненными уравнениями, возникающими в теории В.В.Белецкого. Установлено, что изменение собственного кинетического момента обоих спутников хорошо описывается этими уравнениями на тех отрезках времени, где их непрерывно возрастающая угловая скорость превышала  $0.8-0.85^\circ/\text{с}$ .

В третьей и четвертой главах подробно рассматривается дальнейшее упрощение математической модели вращательного движения спутника для целей определения углового движения. Показано, что при значениях угловой скорости, близких предельным значениям, уравнения вращательного движения допускают дальнейшее упрощение: опустить неконсервативную составляющую действующего на него постоянного внешнего момента и орбиту спутника можно принять круговой, записав уравнения движения в орбитальной системе координат. Тогда используемые уравнения вращательного движения и

отвечающие им уравнения В.В. Белецкого становятся обобщенно-консервативными.

В пятой главе исследуется общий случай для обоих спутников. Решения уравнений В.В. Белецкого сравниваются с движением оси симметрии спутника, рассчитанным вдоль решений используемой для определения ориентации уже упрощенной полной системы уравнений движения. Они являются соответственно периодическими и похожими на условно-периодические. В последних доминируют две частоты – высокая и низкая. Амплитуды остальных частот на порядок ниже. Спектральный анализ показал, что низкая частота совпадает с частотой решений уравнений В.В. Белецкого, решения этих уравнений достаточно точно совпадают с низкочастотной компонентой в тригонометрическом разложении для движения орта оси динамической симметрии спутников.

Шестая глава посвящена рассмотрению частного случая движения: найден участок полета спутника Фотон-12, на котором низкочастотная компонента колебаний продольной оси спутника мала, и орт собственного кинетического момента спутника близок к нормали к плоскости орбиты. Движение орта оси динамической симметрии на продолжительных отрезках времени удалось достаточно точно аппроксимировать периодическими решениями, продолженными из решений Ляпунова, существующих в окрестности одного из стационарных решений уравнений движения оси симметрии спутника.

В заключении сформулированы основные результаты работы, а также определены возможные направления дальнейших исследований.

#### **Научное значение и новизна исследования.**

Все результаты, полученные соискателем, являются новыми и оригинальными. Установлена нижняя граница значений угловой скорости, для которых изменение собственного кинетического момента обоих рассматриваемых автором спутников достаточно точно описывается эволюционными уравнениями В.В. Белецкого. Показано, что при значениях

угловой скорости, близких к ее найденному в работе предельному значению, уравнения вращательного движения допускают упрощение. Также найден участок полета Фотона-12, внутри которого движения продольной оси спутника относительно орбитальной системы координат удалось аппроксимировать периодическим решениями автономных уравнений движения для оси динамической симметрии спутника ввиду малой низкочастотной составляющей. Результаты работы представляют интерес для дальнейших исследований в ИПМ имени М.В. Келдыша РАН, ИКИ РАН, Институте проблем механики имени А.Ю. Ишлинского РАН и организациях, связанных с проведением исследований на ИСЗ серии «Фотон».

#### **Достоверность результатов и обоснованность научных положений.**

Все результаты работы получены строгими математическими методами и надежными численными методами. Использованные математические модели согласуются с данными измерений. Результаты обработки измерений находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами и другими методами. Результаты диссертационного исследования полностью представлены в публикациях соискателя, а также прошли апробацию на ряде научных семинаров на механико-математическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова, на всероссийских и международных конференциях.

Автореферат достаточно полно и правильно отражает содержание диссертации. Работа написана на высоком научном уровне, изложена ясным языком.

#### **По исследованию имеются следующие замечания:**

1. Автором недостаточно проиллюстрированы положения, используемые им при выборе математической модели движения исследуемых в работе ИСЗ. Так в главе 1 не приведены значения моментов инерции ИСЗ, которые рассматриваются в работе как динамически симметричные. Не приводятся схемы ИСЗ «Фотон», необходимые для обоснования описания действующего аэродинамического момента, хотя в диссертации приводится рисунок спутника «Протон» при описании исследованного В.В.Белецким и

его учениками «пропеллирующего» эффекта при движении этого спутника. Не раскрыта природа постоянного момента вдоль оси  $ox_1$  ИСЗ. Не обосновано применение в качестве модели для описания аэродинамического момента сферы со смещенным центром.

2. Большую часть работы занимают вопросы и результаты обработки магнитометрических измерений. Вместе с тем, в работе не приведено достаточных данных об используемых в составе ИСЗ «Фотон» магнитометрах и их установке на спутниках, хотя эти сведения важны при написании алгоритмов обработки информации. В диссертации при обработке измерений на основе независимости модуля магнитного поля Земли от используемой системы координат определяется постоянная величина  $\Delta H$ . В действительности, величина магнитной помехи обусловлена влиянием не только магнитно-твердых материалов, но и влиянием магнитно-мягких материалов и токовых контуров, и не является постоянной.
3. Автору было бы полезно рассмотреть возможность распространения полученных в работе результатов на другие ИСЗ, имеющие, например, иные параметры орбиты.
4. Использование в диссертации, содержащей 120 страниц, 6 глав не является удачной компоновкой материала.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена, согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

06.06.2022г.