

ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертацию Сазонова Василия Викторовича «Математическое моделирование воздействия внешней среды на космический аппарат с изменяющейся геометрией поверхности», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Диссертационная работа В.В. Сазонова посвящена созданию общего подхода к разработке быстрых, но достаточно точных методов математического моделирования воздействия внешней среды на космический аппарат с изменяющейся геометрией поверхности. Этот подход заключается в оригинальном методе описания геометрии поверхности космического аппарата. На основе предложенного метода автором разработан комплекс алгоритмов и программ для математического моделирования воздействия внешней среды на космический аппарат.

Разработка современной космической техники и управление полётом невозможны без учёта факторов воздействия внешней среды на космический аппарат. Для этой цели необходимо использование математического моделирования.

Современные космические аппараты обладают набором подвижных элементов, которые изменяют своё положение в ходе полёта. К таким элементам относятся: солнечные батареи, радиаторы охлаждения, манипуляционные роботы, антенны и другие части конструкции. Движение солнечных батарей и радиаторов охлаждения обусловлено отслеживанием направления на Солнце, антенны направляют определённым образом для решения задач связи. Принципиальным моментом является то, что движение тех или иных элементов внешней поверхности происходит практически постоянно. Существующие подходы к созданию геометрических моделей, используемые в системах автоматизированного проектирования (САПР), позволяют задавать подвижные элементы, но использование таких моделей для решения прикладных задач математического моделирования, особенно с учётом изменения геометрии внешней поверхности, представляет большие трудности. Поэтому создание так называемых интерактивных геометрических моделей космических аппаратов, поддерживающих изменение формы поверхности в ходе решения задач математического моделирования, и специальных быстрых алгоритмов, которые могут работать на персональных компьютерах, является в настоящее время **актуальной** задачей.

Диссертация В.В. Сазонова состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. В конце каждой главы формулируются полученные результаты. Работа содержит 18 таблиц и 94 рисунка. Список используемой литературы составляет 163 наименования.

Во **введении** обосновывается актуальность выбранной темы исследования и степень её разработанности, проводится обзор литературы, формулируются цели и задачи работы, её научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Сформулированы методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов.

Первая глава посвящена разработке подхода к созданию интерактивной иерархической геометрической модели космического аппарата. Сформулированы требования к геометрической модели, которая должна позволять:

- обеспечить построение многогранных сеток с линейными размерами не более заданных;
- удалять невидимые поверхности;
- вычислять интегралы по всей поверхности модели или её частям;
- выделять части поверхности, освещённые точечным источником света или плоскопараллельным световым потоком;
- находить проекции поверхности на заданную плоскость;
- включать или отключать заданные части модели.

Для реализации указанных требований к геометрической модели использован иерархический подход. Модель – это набор объектов, объединённых древовидной структурой. Каждый объект состоит из набора геометрических примитивов и может включать другие объекты. Каждый объект, кроме корневого, имеет один родительский объект. Каждый объект может иметь объекты-потомки или не иметь таковых.

Объект задаётся в своей локальной системе координат, которая может отличаться от системы координат вышестоящего объекта. Используются прямоугольные декартовы системы координат. Для задания объектов применяются следующие геометрические примитивы: параллелограмм, треугольник, боковая поверхность усечённого конуса и параллелепипед. Поддерживается загрузка объектов моделей из сторонних систем автоматизированного проектирования. Разработаны алгоритмы построения расчётных сеток, удаления невидимых поверхностей, построения проекции внешней поверхности модели на заданную плоскость. Алгоритмы реализованы автором диссертации в виде программных модулей.

Разработанная геометрическая модель позволяет вычислить миделево сечение, моменты аэродинамических сил и моментов, действующих на КА, находить освещённый участок солнечной батареи, вычислять характеристики электромагнитной волны, отражённой от поверхности станции.

Во **второй** главе рассмотрена математическая модель сил и моментов, вызванных аэродинамическим сопротивлением, при полёте КА на околоземной орбите. В этой модели существенно используется геометрическая модель внешней поверхности КА, позволяющая учесть изменения этой поверхности во времени. При математическом моделировании аэродинамического сопротивления используются три

гипотезы о взаимодействии молекул атмосферы с поверхностью КА: абсолютно неупругий удар, абсолютно упругий удар и смешанная модель.

Разработанная геометрическая модель внешней поверхности КА использована для восстановления орбитального движения Международной космической станции по данным автономной системы навигации. Оценка параметров движения определяется из условия минимизации функционала, состоящего из суммы квадратов взвешенных невязок между измеренными и расчётными значениями векторов положений и скорости. Оценка параметров движения выполнялась для двух моделей миделева сечения: постоянной (стандартная модель с баллистическим коэффициентом) и с учётом изменения миделева сечения во времени. Расчёт изменения миделева сечения во времени выполняется на основе геометрической модели. Сравнение результатов для двух моделей проводилось по измерениям, полученным автономной системой навигации в 2018 году. Использование модели с изменяющимся миделевым сечением на интервалах длительностью 10 суток даёт существенно меньшую ошибку, чем стандартная модель.

Рассмотрено математическое моделирование вращательного движения транспортного грузового корабля «Прогресс МС» с учётом аэродинамического момента, вычисляемого на основе детальной геометрической модели внешней поверхности КА. В качестве примера восстановлено вращательное движение транспортных грузовых кораблей «Прогресс МС-07» и «Прогресс МС-09» по данным бортовых датчиков угловых скоростей. Проведена оценка погрешности. Таким образом, модифицированная модель движения космического корабля относительно центра масс позволяет восстанавливать движение космических кораблей «Прогресс» по данным датчиков угловых скоростей с заданной точностью.

Глава 3 посвящена математическому моделированию работы системы электропитания космического аппарата, оснащённого солнечными батареями, в условиях полёта на околоземной орбите. Автором разработан оригинальный алгоритм и разработано программное обеспечение математического моделирования. Принципиальным отличием разработанного алгоритма от существующих алгоритмов является учёт изменения положения подвижных элементов и возможного затенения плоскости солнечных батарей элементами конструкции внешней поверхности космического аппарата. Разработанное программно-алгоритмическое обеспечение верифицировалось с использованием телеметрической информации, полученной с российского сегмента Международной космической станции. Результаты математического моделирования сравнивались с реальными значениями токов, вырабатываемых солнечной батареей.

Рассмотрены две модели работы солнечной батареи (СБ): модель на основе решения диодного уравнения и упрощённая модель, учитывающая только два фактора: площадь освещённых участков СБ и угол падения солнечных лучей на плоскость СБ. Рассмотрена подвижная модель СБ,

которая ориентируется на Солнце. СБ такого типа используется в российском сегменте Международной космической станции.

Для задания характеристик СБ был разработан специальный язык программирования, позволяющий полностью описать все характеристики СБ и задать правила их движения. Был разработан транслятор с этого языка, который является частью зарегистрированной программы расчёта затенения солнечных батарей космических аппаратов.

Для определения освещённости СБ использована геометрическая модель внешней поверхности КА, представленная в первой главе диссертации. Моделирование работы СБ выполняется для набора моментов времени и состоит из следующих шагов:

- определение положения КА в пространстве;
- определение ориентации КА относительно инерциальной системы координат J2000;
- проверка затенения солнечной батареи КА небесными телами;
- задание точной модели внешней поверхности КА с учётом подвижных элементов;
- проверка затенения солнечной батареи КА элементами конструкции внешней поверхности;
- определение токов всех генераторов и общего тока СБ.

Разработанные алгоритмы и программы позволили оценить вклад в выработку электроэнергии солнечными батареями от излучения Солнца, отражённого от поверхности Земли.

Проведена оценка точности предложенной математической модели на 12 интервалах длительностью в 3...7 суток, выбранных в интервале с декабря 2019 по ноябрь 2020 года. Модель показала возможность получения прогноза прихода электроэнергии в среднем с точностью 1% ... 5%, а в худших случаях до 12% за 5 суток.

Четвёртая глава диссертации посвящена алгоритму восстановления траектории относительного сближения космического корабля с орбитальной станцией. Траектория восстанавливается по данным аппаратуры спутниковой навигации и телеметрической информации о расходе топлива космического корабля. В результате обработки данных о расходе топлива определяются моменты включения и выключения двигателей. Компоненты импульсов определяются одновременно с параметрами траектории по данным аппаратуры спутниковой навигации. Разработанные алгоритмы реализованы в виде программного комплекса, который был применён для восстановления траекторий сближения семи грузовых и транспортных космических кораблей: «Прогресс МС-10», «Прогресс МС-16», «Союз МС-03», «Союз МС-09», «Союз МС-12», «Союз МС-13» и «Союз МС-14».

Движение космического корабля и орбитальной станции рассматривается в гринвичской системе координат. Приведена система обыкновенных дифференциальных уравнений, которая учитывает возмущения от нецентральности гравитационного поля Земли,

аэродинамическое торможение в атмосфере Земли, гравитационное влияние Солнца и Луны, а также работу двигателей.

Траектория космического корабля определяется по данным аппаратуры спутниковой навигации. Уточняемыми параметрами являются векторы положения и скорости космического корабля в начальный момент времени, баллистический коэффициент и величины импульсов. Для оценки уточняемых параметров используются два подхода. В первом подходе минимизируется сумма квадратов модулей разностей между измеренными и расчётными векторами положений космического корабля на всей траектории сближения. В диссертации отмечается, что в двух из рассматриваемых семи случаев возникают проблемы с точностью. В этих случаях СКО оценки положения составило 53 и 126 м. Поэтому в диссертации был предложен второй подход. Рассматриваемый временной отрезок разбивался на участки пассивного и активного движения. Движение на каждом участке восстанавливалось независимо. При этом СКО оценки составило 18 м, однако на траектории появились изломы и петли, которые не характерны для движения космического корабля.

Для минимизации функционалов используется методы Гаусса-Ньютона и Левенберга-Марквардта. Используется несколько проходов. После нахождения минимума выполняется фильтрация: удаляются измерения, величины остатков которых в 3.8 раза превышают оценку стандартного отклонения.

Следует отметить, что для получения оценок параметров используются только измерения положения, получаемые от аппаратуры спутниковой навигации.

Глава 5 посвящена математическому моделированию работы радиотехнической системы с активным ответом. Эта система установлена на орбитальной станции и используется при стыковке с космическим кораблём. Для моделирования получены аналитические выражения для вычисления вектора напряжённости электрического поля волны, излучаемой антенной и отражённой от поверхности станции волны в точке наблюдения. В этой точке суммируются прямая электромагнитная волна, излучённая антенной системы, которая установлена на станции, и волна, отражённая от поверхности станции. С использованием приближения физической оптики получено выражение для прямой и отражённой компоненты электромагнитной волны. Получено решение задачи определения геометрической видимости: определение видимости антенны из точки наблюдения и из точки на поверхности станции. Для решения задачи геометрической видимости использованы интерактивная геометрическая модель внешней поверхности КА и метод трассировки лучей, описанные в главе 1. Разработан алгоритм расчёта уровня радиосигнала в точке наблюдения от антенны радиотехнической системы, установленной на протяжённом объекте, с заданной диаграммой направленности и с учётом возможного отражения электромагнитных волн от поверхности этого объекта. Предложен алгоритм поиска зон возможной неустойчивой работы

радиотехнической системы измерения параметров относительного движения космического корабля и станции.

На основе этих алгоритмов разработан программный комплекс, используемый для анализа работы радиотехнической системы определения параметров относительного движения «Курс», установленной на Международной космической станции (МКС) и грузовых и транспортных космических кораблях «Союз» и «Прогресс». Анализ производится на предмет возможных сбоях при определении параметров относительного движения из-за дифракции электромагнитных волн на поверхности станции. Приводятся результаты математического моделирования во время шести стыковок космических кораблей к МКС и сравнение с результатами обработки телеметрической информации (ТМИ) системы «Курс», получаемой с борта КК. Показана адекватность предлагаемой математической модели для оценки зон возможной неустойчивой работы радиотехнической системы «Курс».

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Обоснованность научных положений и выводов диссертации не вызывает сомнений, поскольку автор использует проверенные подходы к математическому моделированию движения искусственных спутников Земли, эффективные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений и задач оптимального управления. Достоверность полученных результатов подтверждена верификацией разработанных математических моделей, алгоритмов и программного обеспечения путём сравнения результатов математического моделирования с реальными данными, полученными при обработке телеметрической информации с космических аппаратов, совершающих и совершавших космический полёт. Новизна выносимых на защиту результатов также не вызывает сомнений, поскольку в диссертации предложены новые математические модели, методы и алгоритмы, применённые к актуальным задачам математического моделирования воздействия внешней среды на космический аппарат с изменяющейся геометрией внешней поверхности, которые позволяют получать существенно более точные результаты моделирования.

В ходе анализа работы, автореферата и публикаций соискателя учёной степени по теме диссертационного исследования обнаружены следующие недостатки и неточности:

1. Во второй главе для определения параметров движения КА по измерениям автономной системы навигации используется функционал, в который входят измерения положения и скорости КА. В четвёртой главе использован функционал, в который входят только измерения положения. В тексте диссертации нет объяснения этому несоответствию.

2. На с. 66 нецентральность гравитационного поля Земли названа «неравномерностью».

3. На с. 178 выражение в формуле (4.6) повторено дважды.

4. На с. 179 нумерованный перечень начинается с семи, а не с единицы.

Эти замечания не снижают общего высокого уровня оценки работы В.В. Сазонова и не ставят под сомнение обоснованность, новизну и достоверность полученных результатов. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой разработан подход к созданию быстрых, но достаточно точных методов математического моделирования воздействия внешней среды на космический аппарат с изменяющейся геометрией поверхности. Основные результаты диссертации опубликованы в 13 изданиях, удовлетворяющих требованиям ВАК, докладывались на многочисленных международных конференциях и на семинарах университетов, научных центров и научно-технических советах профильных предприятий.

Исходя из вышеизложенного, считаю, что рецензируемая работа соответствует специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» и удовлетворяет всем требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора наук, а её автор, Василий Викторович Сазонов, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.



А.Г. Тучин

Подпись А.Г. Тучина заверяю

Учёный секретарь

ИПМ им. М.В. Келдыша РАН

к.ф.-м.н.



А.А. Давыдов