

ОТЗЫВ официального оппонента

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

В диссертационной работе В.В. Сазонова предлагается общий подход к разработке быстрых, но достаточно точных методов воздействия внешней среды на космический аппарат (далее – КА) с изменяющейся геометрией поверхности. Решение подобных задач математического моделирования крайне востребовано в процессе проектирования и испытаний космической техники, а также управления полетом.

Факторы воздействия внешней среды на КА имеют сильное влияние на его функционирование в целом. Например, воздействие атмосферы на низколетящий КА вносит существенное возмущение в орбитальное движение и движение относительно центра масс, от условий освещения Солнцем солнечных панелей зависит количество вырабатываемой ими электроэнергии и т.п. При этом создание условий космического полета на Земле в полном объеме невозможно, моделирование отдельных факторов является крайне затратным мероприятием, поэтому использование математического моделирования является хорошей альтернативой и активно используется при проектировании и эксплуатации космической техники.

Современные КА, в том числе крупногабаритные космические конструкции, имеют набор подвижных элементов (солнечные батареи, радиаторы, манипуляторы и т. д.), движение которых существенно меняют форму внешней поверхности. Поэтому для адекватного математического моделирования воздействия внешней среды на КА необходимо учитывать все изменения геометрии внешней поверхности. Таким образом, тема диссертационного исследования В.В. Сазонова является безусловно **актуальной**.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. В конце каждой главы формулируются полученные в этой главе результаты. Работа содержит 1 листинг, 1 блок-схему, 18 таблиц и 92 рисунка, список используемой литературы составляет 163 наименования.

Во **введении** дается общая характеристика работы, обосновывается актуальность темы диссертационного исследования, проводится обзор литературы по теме исследования, определяются цель и задачи исследования, формулируются положения, выносимые на защиту, обосновывается научная

новизна работы, указывается теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

В **первой главе** автор рассматривает задачу создания интерактивной геометрической модели внешней поверхности КА. Одной из ключевых функциональностей предложенной модели является свойство интерактивности, то есть возможность реагировать на управляющие воздействия во время процесса моделирования, например, изменять форму поверхности путем поворотов так называемых подвижных элементов. Модель строится в виде дерева, где в каждом узле находится геометрический модуль – объект, состоящий из набора геометрических примитивов (прямоугольников, треугольников, прямоугольных параллелепипедов, боковых поверхностей усеченного конуса). При помощи сравнительно небольшого количества примитивов можно достаточно точно приблизить внешнюю поверхность КА, что демонстрируется в диссертации на примерах Международной космической станции и космического корабля «Прогресс». Особый интерес представляет задание солнечных батарей КА в виде особых примитивов, которые генерируются при помощи входного файла, разработанного на предложенном автором формальном языке.

Также автором разработаны вспомогательные алгоритмы построения расчетных сеток, удаления невидимых линий, вычисления интегралов по поверхности модели и ее частям (видимым из заданной точки или освещаемой прямым излучением Солнца). Все предложенные модели и алгоритмы реализованы в виде программного модуля.

Во **второй главе** рассматривается математическое моделирование аэродинамического сопротивления, действующего на низколетящий КА. Предложен алгоритм расчета возникающих сил и моментов аэродинамического сопротивления по детальной модели внешней поверхности КА. Автором используются модифицированные математические модели орбитального движения низколетящего КА и его движения относительно центра масс, где сила и момент аэродинамического сопротивления рассчитываются по детальной геометрической модели внешней поверхности.

Модифицированная математическая модель орбитального движения использовалась в работе для восстановления движения Международной космической станцией. Сила аэродинамического сопротивления вычислялась при помощи геометрической модели внешней поверхности, учитывалось ее изменение в ходе полета. Вычисленные значения сглаживались рядами Фурье по синусам. Проводилась статистическая оценка погрешности аппроксимации, результаты сравнивались с использованием стандартной модели, где миделево сечение космического аппарата на интервале моделирования предполагалось постоянным. Применение модифицированной математической модели движение позволило существенно уменьшить ошибку аппроксимации.

В третьей главе рассматривается задача математического моделирования работы солнечных батарей КА. Автором разработан алгоритм математического моделирования, учитывающий возможное затенение поверхности солнечных батарей небесными телами и элементами конструкции внешней поверхности космического аппарата, а также движение солнечных батарей и других подвижных элементов КА. Освещенность поверхности солнечных батарей определяется по детальной геометрической модели при помощи алгоритма удаления невидимых поверхностей, основанного на трассировке лучей.

В четвертой главе рассмотрены задачи восстановления траектории движения КА относительно орбитальной станции во время сближения и стыковки. Восстановление происходит по данным датчиков автономной системы навигации, установленных на КА и орбитальной станции, и по телеметрической информации о расходе топлива.

В пятой главе рассматривается задача математического моделирования работы радиолокационной системы с активным ответом определения параметров движения КА относительно орбитальной станции.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы по работе, а также очерчены направления дальнейшего развития темы.

Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации.

Считаю, что сформулированные автором научные положения и полученные в диссертации выводы обоснованы использованием проверенных подходов к математическому моделированию движения искусственных спутников Земли, эффективными численными методами решения обыкновенных дифференциальных уравнений и общепризнанными подходами к решению задач оптимального управления. Достоверность полученных результатов подтверждается путем верификации разработанных математических моделей, алгоритмов и программного обеспечения, сравнения результатов математического моделирования с реальными данными, полученными при обработке телеметрической информации с реальных КА. Новизна выносимых на защиту результатов не вызывает сомнений, поскольку в диссертации предложены новые математические модели, методы и алгоритмы, примененные к актуальным практически значимым задачам.

Следует отметить некоторые недостатки работы.

1. В главе 4 решается задача восстановления траектории КА, при этом геометрия его поверхности никак не используется, что несколько противоречит формулировке темы диссертации.

2. При описании моделирования взаимодействия поверхности КА с молекулами атмосферного газа фразу о том, что параметры модели «подбираются, исходя из некоторых соображений» (стр. 59) хорошо было бы дополнить указанием на эти соображения.

3. Имеются неточности в ссылках на рисунки, например на стр. 48 ссылка на рис. 1.6 вместо рис. 1.5; на стр. 53 ссылка на отсутствующий в диссертации рис. 1.6в.

4. В тексте имеется немало количество грамматических ошибок.

Указанные недостатки не снижают общей высокой оценки работы В.В. Сазонова, не вызывает сомнения обоснованность, новизна 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 ее автор, Сазонов Василий Викторович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по этой специальности.

Доктор физико-математических наук,
главный научный сотрудник
лаборатории 57 «Активных систем»
ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН

А.Г. Чхартишвили

24 марта 2022 г.

Россия, 117997, Москва
ул. Профсоюзная, д. 65
Телефон: +7 495 334-89-10
E-mail: dan@ipu.ru

