

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-математической наук по специальности 1.2.2 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Современные космические аппараты, в том числе крупногабаритные космические конструкции имеют сложную форму внешней поверхности, на которой располагается набор подвижных элементов таких как солнечные батареи, радиаторы охлаждения, роботы-манипуляторы и компоненты целевой аппаратуры. В ходе космического полета эти элементы двигаются в соответствии с планом полета для решения целевых задач, внешняя поверхность аппарата при этом может существенно менять свою форму. Воздействие внешней среды является существенным фактором, влияющим на движение космического аппарата, выполнение им своих главных задач и функционирование служебных систем. Сопротивление атмосферы, световое давление, воздействие космической радиации, освещение Солнцем, электромагнитное излучение оказывают существенное влияние на работу космического аппарата и космической системы в целом. Учет воздействия внешней среды необходимо учитывать как в процессе проектирования космического аппарата, так и при управлении полетом. Моделирование условий космической среды на Земле является непростой и крайне затратной задачей, поэтому широко применяется математическое моделирование, которое стало общепринятой практикой в процессе создания космической техники и при управлении полетом.

Диссертация В.В. Сазонова направлена на создание подхода к разработке быстрых, несколько упрощенных, но достаточно точных методов математического моделирования воздействия внешней среды на космический аппарат с изменяющейся геометрией внешней поверхности. С учетом вышеизложенного выбранная тема исследования является безусловно актуальной. Стоит отметить, что задача в такой постановке рассматривается впервые.

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, устанавливается научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе предлагается подход к созданию интерактивной геометрической модели внешней поверхности космического аппарата. 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 подвижных элементов конструкции. 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. Такой набор примитивов достаточно точно позволяет приблизить внешнюю поверхность космического аппарата сравнительно небольшим количеством примитивов, что демонстрируется в диссертации на примерах Международной космической станции и космического корабля «Прогресс». Предусмотрен механизм использования в качестве объектов моделей, загружаемых из сторонних систем автоматизированного проектирования. Каждый объект в дереве имеет свое ортогональное преобразование и сдвиг относительно вышестоящего в иерархии объекта. Меняя параметры преобразований, можно задать движение объектов, в модели реализованы механизмы поворотов вокруг заданных осей с течением времени или в зависимости от направления на заданные ориентиры (Солнце). Находкой автора является задание солнечных батарей космического аппарата в виде особых примитивов, которые генерируются при помощи текстового файла сформированного, на разработанном 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, являющегося составной частью нескольких прикладных программных продуктов, три из которых зарегистрированы как результаты интеллектуальной деятельности в виде программ для ЭВМ.

Во второй главе рассматривается математическое моделирование аэrodинамического сопротивления, действующего на низколетящий космический аппарат. Предложен алгоритм расчета главного вектора и главного момента сил аэродинамического сопротивления по детальной модели внешней поверхности космического аппарата. Приведены содержательные примеры подобных расчетов. Первый пример – весьма точный расчет миделя Международной космической станции (МКС) в функции времени в ходе ее полета в режиме орбитальной. Этот пример использовался в работе для уточнения реконструкции движения МКС по измерениям аппаратуры спутниковой навигации (АСН). Действующая на станцию сила аэродинамического сопротивления вычислялась с учетом переменности баллистического коэффициента пропорциональной изменениям миделя станции. Для удобства вычисленные значения миделя аппроксимировались суммой линейной функции времени и отрезком дискретного ряда Фурье по синусам. Проведена статистическая оценка

погрешности такой аппроксимации, показавшая ее приемлемость. Результаты уточненной реконструкции движения МКС сравнивались с результатами, полученными стандартным способом реконструкции с постоянным миделевым сечением на интервале определения движения. Применение нового способа реконструкции позволило существенно уменьшить ошибку аппроксимации данных измерений АСН. Второй пример – способ задания аэродинамического момента в задачах математического моделирования неуправляемого вращательного движения транспортного грузового корабля *Прогресс*. Компоненты этого момента в строительной системе координат корабля рассчитаны в узлах сетки на поверхности двумерной сферы. В расчетах использована детальная геометрическая модель внешней оболочки корабля. Найденные аппроксимации используются в уравнениях вращательного движения корабля. Приведены результаты применения таких уравнений в задаче реконструкции движения кораблей *Прогресс МС-07*, *Прогресс МС-08* в режиме гравитационной ориентации по измерениям угловой скорости и задаче прогноза электрического заряда, снимаемого с солнечных батарей корабля, в режиме одноосной солнечной ориентации.

В третьей главе рассматривается задача математического моделирования работы солнечных батарей космического аппарата. 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 космического аппарата. Освещенность поверхности солнечных батарей определяется по детальной геометрической модели при помощи алгоритма удаления невидимых поверхностей, основанного на трассировке лучей. Для вычисления мгновенного тока используются 2 математических модели работы солнечных батарей. Разработанное программное обеспечение прошло верификацию путем сравнения результатов моделирования с результатами обработки телеметрической информации со Служебного модуля *Звезда* Российского сегмента Международной космической станции. Результаты верификации показывают существенно более высокую точность моделирования по сравнению с существующими моделями.

В четвертой главе приведены результаты реконструкции движения космических кораблей *Союз* и *Прогресс* относительно МКС во время сближения истыковки. Реконструкция выполнена по данным АСН, имеющейся на космических кораблях и МКС, а также по телеметрической информации о расходе топлива космическим кораблем. Автором разработана математическая модель, реализующий ее алгоритм и программное обеспечение. Верификация математической модели проводится на данных 7стыковок космических кораблей *Союз* и *Прогресс* с МКС.

В пятой главе рассматривается задача математического моделирования работы радиолокационной системы с активным ответом определения параметров движения космического корабля относительно орбитальной

станции. Автором используется математическая модель распространения и дифракции электромагнитной волны на протяженном объекте с применением приближения физической оптики. Предложен алгоритм поиска зон возможной неустойчивой работы системы. Алгоритм и разработанное программное обеспечение прошли верификацию на телеметрических данных полученных на шести стыковках космических кораблей «Союз» и «Прогресс» с Международной космической станцией.

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

Автореферат полностью и корректно отражает содержание диссертации.

Считаю, что выработанные научные положения и полученные в диссертации выводы диссертации обоснованы тем, что автор использует проверенные подходы 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 сравнением результатов математического моделирования с реальными данными, полученными при обработке телеметрической информации с реальных космических аппаратов. Новизна выносимых на защиту результатов также не вызывает сомнений, поскольку в диссертации предложены новые математические модели, методы и алгоритмы, примененные к актуальным задачам математического моделирования воздействия внешней среды на космический аппарат с изменяющейся геометрией внешней поверхности, которые позволяют получать существенно более точные результаты моделирования.

После анализа диссертации и публикаций соискателя можно утверждать, что представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой разработан подход к созданию быстрых и достаточно точных методов математического моделирования воздействия внешней среды на космический аппарат с изменяющейся геометрией поверхности. Обоснованность основных положений, новизна и достоверность результатов не вызывают сомнение. 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 представленная 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 специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретической механики ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева

Асланов Владимир Степанович

Жека «16» мая 2022 г.

Почтовый адрес: 443086, г Самара,
Московское шоссе, д. 34
Тел. +7-927-688-97-91
E-mail: aslanov_vs@mail.ru

Подпись Асланова ВС удостоверяю.

Начальник отдела сопровождения деятельности ученых советов Самарского университета

— Васильева И. П.

2022 E

