



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ
«КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА,
ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ
КОМПЛЕКСЫ» имени А.Г. ИОСИФЬЯНА»
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»)



Хороменный тупик, д. 4, стр. 1, Москва, 107078
Тел.: (495) 608-84-67, (495) 365-56-10; Факс: (495) 624-86-65, (495) 366-26-38
e-mail: info@vniiem.ru; http://www.vniiem.ru
ОКПО 04657139; ОГРН 5117746071097; ИНН/КПП 7701944514/770101001

25.08.22 № ВГ-68/2038/В

На № _____ от _____



УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
АО «Корпорация «ВНИИЭМ»

Лобанов А.В.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу 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».

Актуальность темы диссертации

Разработка, испытания и эксплуатация современной космической техники являются наукоемкой, комплексной и многостадийной работой, в которой надо учитывать большой набор различных параметров, в том числе факторов, определяющих воздействие внешней среды на космический аппарат (КА). Так, воздействие остаточной атмосферы существенно влияет на орбитальное движение КА и его движение относительно центра масс, выработка электроэнергии солнечными батареями зависит от освещенности поверхности батарей, угла падения солнечных лучей и других факторов. Учет указанных и других факторов внешней среды необходим для определения параметров функционирования космического аппарата, как во время проектирования и испытаний, так и в процессе эксплуатации. Условия космического полета на Земле полностью воспроизвести невозможно, создание приближенных условий требует существенных материальных затрат, поэтому целесообразно использовать математическое моделирование.

Конструкции современных космических аппаратов крайне разнообразны, часто содержат набор подвижных элементов, таких как солнечные батареи, антенны и др. Изменения положения этих элементов во

времени ведет к изменению формы внешней поверхности, и, соответственно, к изменению влияния внешней среды на космический аппарат.

Диссертационная работа В.В. Сазонова направлена на выработку общего подхода к созданию эффективных методов решения задач математического моделирования воздействия внешней среды на космический аппарат с изменяющейся геометрией внешней поверхности. В настоящее время это является актуальной научной задачей.

Краткий анализ содержания работы

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, подчеркивается научная новизна работы, указывается теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

В **первой** главе автором предлагается подход к заданию интерактивной иерархической геометрической модели внешней поверхности космического аппарата. Под интерактивностью понимается возможность изменения формы внешней поверхности путем поворотов подвижных элементов в ходе процесса математического моделирования. Модель строится иерархически в виде дерева объектов, каждый объект составлен из набора геометрических примитивов: боковых поверхностях усеченного конуса, параллелепипедов, прямоугольников и треугольников. Поддерживается возможность загрузки геометрических моделей из сторонних систем автоматизированного проектирования (САПР). Разработаны алгоритмы построения расчетных сеток, решения задачи удаления невидимых поверхностей, отыскание проекции внешней поверхности на заданную плоскость, вычисления интегралов по внешней поверхности геометрической модели. Созданные модели и алгоритмы реализованы в виде программных модулей.

Во **второй** главе рассматривается задача математического моделирования аэродинамического сопротивления, действующего на орбитальный космический аппарат. Разработаны алгоритмы расчета силы и момента аэродинамического сопротивления по детальной геометрической

модели внешней поверхности. Автором предложены модифицированные математические модели орбитального движения космического аппарата и его движения относительно центра масс, где сила и момент аэродинамического сопротивления рассчитывается при помощи разработанных алгоритмов. Проведена верификация предложенных математических моделей и расчетных алгоритмов путем обработки телеметрической информации, модель орбитального движения была использована для восстановления траектории Международной космической станции (МКС) по данным автономной системы навигации. Модифицированная модель движения относительно центра масс использовалась для восстановления вращательного движения по датчикам угловых скоростей космических кораблей «Прогресс».

Третья глава посвящена математическому моделированию работы солнечных батарей совершающего полет космического аппарата. Автором разработан алгоритм и программное обеспечение для весьма точного расчета реального электрического тока, снимаемого с солнечных батарей произвольного космического аппарата. Проведена верификация разработанного программного обеспечения посредством сравнения результатов математического моделирования с реальной телеметрической информацией, объектом верификации выбран Служебный модуль Российского сегмента (РС) Международной космической станции. Отличительной чертой предложенного алгоритма и разработанного программного обеспечения является учет изменений внешней поверхности станции в ходе полета из-за поворотов ее подвижных элементов и учет затенения поверхности солнечных батарей элементами конструкции внешней поверхности. Предложен алгоритм определения параметров математических моделей для прогноза выработки электроэнергии солнечными батареями космического аппарата. Анализ телеметрической информации, собранной в течение года полета РС МКС позволил оценить вклад в выработку электрического заряда его солнечными батареями части излучения Солнца, отраженной от поверхности Земли.

Четвертая глава посвящена решению задачи восстановления траектории движения космического корабля относительно орбитальной станции во время сближения и стыковки. Восстановление происходит по данным датчиков автономной системы навигации, установленных на космическом корабле и орбитальной станции и по телеметрической информации о расходе топлива космическим кораблем. Автором разработаны математическая модель, реализующий ее алгоритм и

программное обеспечение. Верификация математической модели проводится на данных, взятых с 7-ми стыковок космических кораблей «Союз» и «Прогресс» с Международной космической станцией.

В пятой главе рассматривается задача математического моделирования работы радиолокационной системы с активным ответом измерения параметров движения космического корабля относительно орбитальной станции во время сближения и стыковки. Автором предложена математическая модель, основанная на использовании приближения физической оптики, разработаны алгоритмы моделирования и программное обеспечение. Разработан алгоритм поиска зон неустойчивой работы системы, где возможны сбои в определении параметров относительного движения. Созданное программное обеспечение прошло верификацию путем сравнения результатов моделирования с реальными телеметрическими данными, полученными с бортов космических кораблей «Союз» и «Прогресс» во время шести стыковок с Международной космической станцией.

Степень достоверности результатов проведенных исследований

Достоверность исследований, представленных в диссертации В.В. Сазонова, обеспечивается использованием общепринятых подходов к созданию математических моделей движения космических аппаратов, обоснованному выбору применяемых методов вычислительной математики и математического моделирования, применением адекватных математических моделей геопотенциала и плотности атмосферы Земли. Все разработанные математические модели, алгоритмы и программное обеспечение прошли верификацию на реальных данных, полученных при анализе полета космических кораблей «Союз», «Прогресс» с Международной космической станцией.

Оценка новизны, научной и практической значимости проведенных исследований

Диссертационная работа В.В. Сазонова является одной из первых и весьма немногих работ, в которых учитывается воздействие внешней среды на космический аппарат с изменяющейся во времени внешней поверхностью. Движение подвижных элементов изменяет форму внешней поверхности космического аппарата, что усложняет процесс математического моделирования. Элементы внешней поверхности могут заслонять друг друга от набегающего воздушного потока или закрывать от падающих солнечных лучей. В диссертации предлагаются модели и алгоритмы, реализованные в виде программного обеспечения, для решения важных для проектирования

космической техники и управления полетом космических аппаратов задач: расчета аэродинамического сопротивления, действующего на космический аппарат сложной изменяемой формы, моделирования работы подвижных солнечных батарей космического аппарата, работы радиолокационной системы измерения параметров относительного движения и нахождения зон ее возможной неустойчивой работы. Предложенные автором модели и алгоритмы являются достаточно точными, хотя не обладают большой вычислительной сложностью, и могут работать на персональных компьютерах разработчиков космической техники и специалистов служб управления полем в интерактивном режиме.

Диссертантом предложена удачная математическая модель орбитального движения космического аппарата с переменным миделевым сечением. Получено существенное улучшение аппроксимации движения МКС на длительных (до 10-ти суток) интервалах моделирования. Предложена математическая модель движения космического аппарата относительно центра масс, где момент сил аэродинамического сопротивления вычисляется с использованием детальной геометрической модели, аппроксимируемой разложением по сферическим функциям.

Отметим, что задача математического моделирования работы солнечных батарей с учетом возможного их затенения элементами конструкции внешней поверхности космического аппарата и изменением формы этой поверхности на достигнутом уровне точности решена впервые. Разработанные алгоритмы и программное обеспечение верифицировано и может быть использовано в процессе проектирования перспективной космической техники, в процессе управления полетом для прогноза выработки электроэнергии на участке планирования и оценки эффективности работы солнечных батарей, что было продемонстрировано автором на примерах работы для МКС.

Для Международной космической станции впервые решена сложная задача математического моделирования работы радиолокационной системы измерения параметров относительного движения «Курс» и разработано программное обеспечение поиска зон возможной неустойчивой работы. Показана эффективность разработанного программного обеспечения. Для верификации указанной математической модели решена вспомогательная задача определения траектории движения космического корабля относительно орбитальной станции во время сближения и стыковки.

Полученные в диссертации результаты существенно внедрены в АО НИИ ТП в части моделирования стыковки транспортных космических кораблей с МКС и в ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева», а также моделирования работы солнечных батарей КА. Разработанное автором диссертации программное обеспечение планируется к использованию в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» для создания «цифровых двойников» КА. Результаты работ автора также могут быть использованы и в других организациях, занимающихся проектированием космической техники и центрах управления полетами космических аппаратов, научных организациях и организациях высшего образования (МГУ имени М.В. Ломоносова, МГТУ им. Н.Э. Баумана, МАИ, СамГУ им. С. П. Королева и др.).

Полнота опубликования и апробация проведенных исследований

По теме диссертации автором опубликовано 28 работ. Основные результаты представлены в 13-ти работах, 10-ти статьях в журналах, удовлетворяющих требованиям ВАК, 3 свидетельства на программы для ЭВМ. Также по теме диссертации опубликовано 15 работ, из которых 2 перевода основных публикаций, 1 статья из Scopus, 2 статьи в журналах из списка ВАК по родственной специальности и 10 тезисов докладов на конференциях.

Результаты диссертации неоднократно докладывались на российских и международных конференциях, научных семинарах и научно-технических советах профильных предприятий.

Замечания по диссертационной работе

1. В главе 2 представлена математическая модель орбитального движения КА, учитывающая силу аэродинамического сопротивления. Во введении указано, что в представленной модели используется предположение, что молекулы газа при соударении с поверхностью КА испытывают абсолютно неупругий удар. При этом в тексте диссертации (в главе 2) показано, что можно использовать смешанный подход, считая, что доля молекул при столкновении испытывает абсолютно неупругий удар, а доля молекул – абсолютно упругий удар. В современных программных комплексах, которые используются на предприятиях космической отрасли, для описания столкновений молекул газа с поверхностью используется модель Максвелла или многопараметрическая модель Ночиллы. Имеются результаты экспериментального определения коэффициентов аккомодации для различных покрытий. Из диссертации останется неясным, каким образом в конечном итоге выбран метод учета соударения молекул с поверхностью и

как обоснован выбор этого метода. Не приведены ссылки на современные работы по данному вопросу.

2. В главе 4, посвященному восстановлению траектории относительного сближения космического корабля с орбитальной станцией, указано, что моделирование производится с учетом нецентральности гравитационного поля Земли и гравитационных возмущений, обусловленных влиянием Солнца и Луны. При этом указанные возмущения действуют одновременно на оба сближающихся космических объекта. Из диссертации неясно, какое количественное влияние оказывают эти факторы на точность восстановления траектории сближения.

3. В главе 5 при математическом моделировании работы радиолокационной системы с активным ответом используется допущение, что поверхность станции является идеально проводящей, однако остается не вполне ясным, входят ли в рассмотрение геометрически изменяемые внешние поверхности солнечных батарей, ведь они не являются проводящими.

4. При верификации разработанных моделей автор использует телеметрическую информацию, т. е. экспериментальные результаты. С практической точки зрения этот подход не вызывает никаких возражений. Вместе с тем представляется, что методически этот подход следовало бы квалифицировать, как идентификацию моделей, т. е. уточнение параметров модели по результатам испытаний. А верификацию модели можно было бы проводить по сравнению с другими (численными, точными) моделями рассматриваемых процессов.

Вместе с тем, указанные замечания, безусловно, не снижают высокой оценки полученных автором результатов.

Заключение

В целом диссертация Сазонова Василия Викторовича является законченным научным исследованием на актуальную тему, содержит ряд новых математических моделей и алгоритмов, эффективность которых проверена на реальных объектах космической техники. Работа выполнена автором самостоятельно и на высоком научном уровне. Основные результаты работы и выводы представлены в автореферате, который соответствует основному содержанию работы. Диссертация показывает, что автор обладает высокой математической культурой, способен анализировать существующие проблемы, формулировать необходимые для решения задачи, вести полномасштабные научные исследования средствами математического моделирования и получать требуемые результаты в виде готовых

математических моделей, алгоритмов и программного обеспечения, а также проводить их верификацию. Анализ автореферата, диссертации и основных публикаций автора по теме работы позволяет сделать вывод, что В.В. Сазоновым были решены важные народно-хозяйственные и практические задачи в области математического моделирования и его применения для проектирования космической техники и управления космическими полетами, что можно характеризовать, как важное научно-техническое достижение. Работа отвечает требованиям Постановления Правительства Российской Федерации от 29.04.2013 № 842 «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.2.2 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв обсужден на совместном заседании специалистов отдела общих научных исследований и отдела научно-технического сопровождения создания специальных космических комплексов.

Заместитель генерального директора
по научной работе, д.т.н., проф.



Геча В.Я.

Начальник отдела общих научных
исследований, д.т.н., доц.



Захаренко А.Б.

Начальник отдела научно-технического
сопровождения создания специальных
космических комплексов, к.т.н.



Пугач И.Ю.