

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор Публичного акционерного общества «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва»



И.Я. Озар

2020 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Публичного акционерного общества «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва» по диссертационной работе Яскевича Андрея Владимировича «Компьютерные модели динамики стыковки и причаливания космических аппаратов», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика»

Диссертация «Компьютерные модели динамики стыковки и причаливания космических аппаратов» выполнена Яскевичем Андреем Владимировичем в отделе по электромеханическим системам, Публичного акционерного общества «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва» (ПАО «РКК «Энергия»).

В период подготовки диссертации соискатель Яскевич Андрей Владимирович работал в ПАО «РКК «Энергия» начальником отдела по электромеханическим системам.

В 1975 году окончил Рижский Краснознаменный институт инженеров гражданской авиации по специальности «Электронно-вычислительные машины», в 1985 году аспирантуру Московского Государственного Технического Университета имени Н.Э Баумана по специальности «Системы управления». С 1986 г. по настоящее время работает в ПАО «РКК «Энергия». В 1999 году

защитил кандидатскую диссертацию по специальности 05.13.16 - «Применение вычислительной техники, математического моделирования и математических методов в научных исследованиях» на тему: «Разработка методов автоматизированного формирования процедур расчета движения механических систем космических манипуляторов для полунатурного моделирования процессов управления».

Диссертационная работа рассмотрена на расширенном заседании секции «Бортовые и наземные системы и приборы космических аппаратов и средств выведения» НТС ПАО «РКК «Энергия». По итогам ее обсуждения принято следующее заключение.

Диссертационная работа Яскевича Андрея Владимировича «Компьютерные модели динамики стыковки и причаливания космических аппаратов» является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение.

Личное участие соискателя ученой степени в получении результатов. Представленные в работе научные результаты получены лично автором. Во всех случаях использования результатов других исследований приведены ссылки на источник информации. Материалы диссертации полно представлены в 22 статьях, опубликованных в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, из них 3 статьи в журналах, входящих в базы данных Web of Sciences и Scopus, 13 по специальности «Теоретическая механика», а также в трудах 3-х международных конференций и коллективной монографии, индексированных в Scopus:

1. Яскевич А.В. Математическая модель космического манипулятора для полунатурной отработки операций причаливания полезного груза. // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2004. №4. С. 157-176.
2. Яскевич А.В. Комбинированные уравнения движения для описания динамики стыковки космических аппаратов с помощью системы «штырь-конус». //Изв. РАН. Космические исследования. 2007. Том 45. №4. С. 325 – 336.

3. Яскевич А.В. Изменения параметров стыковочного механизма, обеспечивающие снижение нагрузок при стыковке космических кораблей с международной космической станцией. // Космонавтика и ракетостроение. 2008. №2 (51). С. 93-101.
4. Яскевич А.В. Математическая модель периферийного стыковочного механизма. Часть 1. Уравнения движения дифференциальных механизмов. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 7. С. 63-70.
5. Лесков А.Г., Яскевич А.В., Илларионов В.В., Морошкин С.Д., Чернышев И.Е. Математический стенд для отработки управления манипулятором ERA на контактной фазе причаливания. // Инженерный журнал: наука и инновации. Электронное научно-техническое издание. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва). 2013. №9 (21). С. 57 (13 С.).
6. Яскевич А.В. Математические модели гистерезиса, описывающие деформации механизмов для стыковки космических аппаратов. // Электронный журнал «Труды МАИ». Труды МАИ. №83. 2015. 23 С.
7. Яскевич А.В. Кинематическая схема стыковочного механизма типа «штырь-конус» для перспективных космических кораблей. // Космическая техника и технологии. 2017. № 4 (19). С. 95-100.
8. Яскевич А.В. Уравнения динамики стыковочных механизмов. Часть 1. Алгоритмы для механических систем со структурой дерева. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Том 19. №1. С. 58 – 64.
9. Яскевич А.В. Уравнения динамики стыковочных механизмов. Часть 2. Алгоритмы для кинематических контуров. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Том 19. №2. С. 139 – 144.
10. Яскевич А.В. Алгоритмы определения параметров контакта при моделировании стыковки и причаливания космических аппаратов. // Космическая техника и технологии. 2018. №2 С. 80-92.
11. Яскевич А.В. Контактные силы в уравнениях движения космических аппаратов при стыковке и причаливании. // Космическая техника и технологии. 2018. №3. С. 90-102.

12. Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В. Уравнения динамики периферийных стыковочных механизмов как параллельных манипуляторов. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2019. № 59. 32 С.
13. Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В. Компьютерное моделирование динамики периферийного упруго-адаптивного стыковочного механизма космических аппаратов. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2019. № 76. 35 С.
14. Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В. Компьютерное моделирование динамики стыковочных механизмов центрального типа для космических аппаратов. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2019. № 89. 40 С.
15. Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В. Гибридное моделирование на 6-степенном стенде причаливания космических аппаратов. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2019. № 117. 24 С.
16. Яскевич А.В. Математическая модель динамики периферийного стыковочного механизма с накоплением энергии сближения космических аппаратов. // Космическая техника и технологии. 2019. № 3. С. 98-108.
17. Яскевич А.В. Особенности динамики стыковки космических аппаратов при использовании периферийного механизма с накоплением кинетической энергии сближения. // Космическая техника и технологии. 2019. № 4. С. 109-120.
18. Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В. Компьютерные модели контактного взаимодействия стыковочных агрегатов космических аппаратов. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2020. № 4. 40 С.
19. Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В. Гибридное моделирование причаливания космических аппаратов. // Изв. РАН. Теория и системы управления. №4. 2020. С 136 – 150.
20. Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В. Оптимизация вычислений в процедурах расчета динамики систем твердых тел. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2020. № 22. 44 С.

21. Голубев Ю.Ф., Яскевич А.В. , Мирхайдаров В.М. Оценка динамики причаливания на компьютерном стенде моделирования в реальном времени. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2020. № 84. 24 С.
22. Yaskевич A. Math simulation of contact interaction during spacecraft docking and robotic assembly operations. //ECCOMAS Thematic Conference - COMPDYN 2013: 4th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. Proceedings. An IACM Special Interest Conference 2013. С. 4304-4320.
23. Yaskевич A.V., Pavlov V.N., Lopota V.A. International docking system standard status and prospect. //Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC 65, Our World Needs Space. 2014. P. 3197 – 3205.
24. Golubev Yu.F., Yaskевич A.V. Simulation of spacecraft berthing with a robotic arm. //Proc. of the CLAWAR 2020: 23rd International Conf. on Climbing and the Support Technologies for Mobile Machines. Moscow, Russian Federation, 24-26 Aug. 2020. P. 137-144.
25. Yaskевич A.V. Docking systems and operations. // Safety Design for space systems. Edited by G. E. Musgrave, A. Larsen, T. Sgobba. Elsevier. 2009. 919 P. (P. 268 – 280).

В работе [5] автору принадлежит идея создания стенда, его структура, математические модели контактного взаимодействия соединяемых устройств. В работах [12 – 15, 18, 19] автор осуществил постановку задачи, вывод уравнений, разработал программы и выполнил моделирование. В работе [20] автор разработал структуру данных и алгоритмы для выполнения матричных вычислений в символьном виде и их оптимизации. В работе [21] автор осуществил постановку задачи, разработал модели контактного взаимодействия соединяемых устройств, предложил использование дополнительных графических моделей для целей управления и определил их облик.

Актуальность. Работа посвящена актуальной проблеме прикладной механики систем многих тел – разработке компьютерных моделей динамики стыковки и причаливания космических аппаратов. Такие модели необходимы для

поддержки проектирования и разработки конструкции систем стыковки, при их наземной экспериментальной отработке, при уточнении параметров алгоритмов управления, при анализе результатов летных испытаний. Применяемые алгоритмы обеспечивают высокую скорость вычислений для обеспечения эффективного анализа качества стыковки на статистическом множестве случайных начальных условий, а также для моделирования в причаливания реальном времени.

Научная новизна диссертации состоит в том, что в ней впервые представлены общая методология разработки корректных, детальных и вычислительно эффективных моделей динамики стыковки и причаливания, а также разработанные на ее основе модели конкретных процессов. В рамках выполненного исследования решены следующие научные задачи.

1. Определены общие закономерности кинематики стыковочных механизмов центрального и периферийного типов с параллельной структурой, разработана методика формирования и решения уравнений их контурных связей на основе метода разделения переменных.
2. Предложены эффективные алгоритмы расчета динамики стыковочных механизмов, учитывающие наличие кинематических контуров и обеспечивающие расчет сил и моментов, действующих на стыкуемый космический аппарат. Предложены методы оптимизации вычислений при реализации этих алгоритмов в символьном виде.
3. Разработаны основанные на экспериментальных данных модели и алгоритмы для расчета упругих деформаций звеньев и передач к различным устройствам стыковочных механизмов с характеристикой в виде гистерезиса.
4. Разработаны уравнения взаимного движения стыкуемых космических аппаратов с учетом их контактного взаимодействия и упругих деформаций их конструкции.
5. Предложен метод описания контактирующих поверхностей стыковочных агрегатов наборами простейших геометрических элементов, для пар которых получены аналитические решения, определяющие возможность и параметры

контакта. Предложен метод дихотомии для оценки возможности контакта сложных поверхностей, которые аппроксимированы множествами однородных простейших геометрических элементов.

6. Разработана детальная математическая модель динамики стыковки с использованием существующей системы центрального типа («штырь-конус»). Полученные с ее помощью результаты соответствуют данным испытаний на динамическом стенде с шестью степенями свободы. На основе большого объема моделирования динамики стыковки предложены модификации кинематической схемы стыковочного механизма и определены их параметры.

7. Предложена новая схема периферийного стыковочного механизма, позволяющая наиболее полно и с наименьшими затратами выполнить требования международного стандарта систем стыковки в части допустимого диапазона начальных условий. Разработана детальная математическая модель динамики стыковки с использованием этого механизма, с помощью которой проведено исследование, подтвердившее правильность выбора его параметров.

8. Впервые предложен и реализован на динамическом стенде с шестью степенями свободы метод гибридного моделирования причаливания. Разработана модель для расчета в реальном времени динамики упругого космического манипулятора, переносящего стыкуемый космический аппарат.

9. Предложен и реализован новый метод компьютерной визуализации функционирования и контактного взаимодействия стыковочных агрегатов, облегчающий анализ динамических процессов.

Достоверность результатов диссертации подтверждается соответствием результатов компьютерного моделирования экспериментальным данным, а также обеспечивается внутренними средствами тестирования, встроенными в программы компьютерного моделирования.

Практическая ценность полученных результатов подтверждается тем, что представленные в диссертации модели и алгоритмы реализованы автором в виде программных комплексов (программы визуализации разрабатывались при непосредственном участии и под руководством автора). Они были использованы:

- при анализе динамики, при составлении программ и анализе данных наземных динамических испытаний процессов стыковки кораблей ATV (Automated Transport Vehicle) и ПТК (Перспективный Транспортный Корабль), модулей МЛМ (Многоцелевой Лабораторный Модуль), НЭМ (Научно-Энергетический Модуль);
- при анализе данных летных испытаний кораблей «Союз», «Прогресс» и расчете нагрузок на конструкцию Международной космической станции;
- при проектировании кинематики новых стыковочных механизмов;
- при экспериментальной отработке процессов причаливания модуля МИМ-1 (Малый Исследовательский Модуль -1), радиатора и шлюзовой камеры.

Результаты исследования закреплены в патентах РФ на новые кинематические схемы и принципы функционирования стыковочных механизмов:

1. Патент № 2706639. Российская федерация. Стыковочный механизм космического аппарата. Яскевич А.В., Павлов В.Н., Шепелкин Н.А., Бурцев М.А., Чернышев, И.Е., Рассказов Я.В; заявитель и патентообладатель – ПАО «РКК «Энергия»; дата регистр. 19.11 2019 г.; приоритет от 20.10.2016 г.
2. Патент № 2662605. Российская федерация. Стыковочный механизм космического аппарата. Яскевич А.В., Павлов В.Н., Шепелкин Н.А., Бурцев М.А., Чернышев, И.Е., Рассказов Я.В; заявитель и патентообладатель – ПАО «РКК «Энергия»; дата регистр. 26.07 2018 г.; приоритет от 20.10.2016 г.
3. Патент № 2657623. Российская Федерация. Периферийный стыковочный механизм. Яскевич А.В., Павлов В.Н., Чернышев И.Е. Рассказов Я.В., Земцов Г.А., Карпенко А.А.; заявитель и патентообладатель — ПАО «РКК «Энергия»; дата регистр. 14.06 2018 г.; приоритет от 01.06.2017 г.
4. Патент № 2706741. Российская Федерация. Устройство стягивания периферийного стыковочного механизма. Яскевич А.В., Павлов В.Н., Рассказов Я.В., Чернышев И.Е., заявитель и патентообладатель — ПАО «РКК «Энергия».

Основные результаты работы прошли **апробацию** на следующих конференциях:

- Всесоюзное совещание “Методы компьютерного конструирования моделей классической и небесной механики”, Ленинград, 1989 г.;
- International workshop ‘New Computer Technologies in Control Systems, NCTCS-95’, August 13-19, 1995, Pereslavl-Zalessky, Russia;
- 2-й Международный симпозиум “Интеллектуальные системы”, INTELS’96, Санкт-Петербург, 1996 г.;
- Международная конференция «Проблемы и перспективы прецизионной механики и управления в машиностроении», Саратов (1997 г., 2002 г.);
- Международная конференция “Информационные средства и технологии”, Москва, 1999 г.;
- 5-й (2004 г.), 6-й (2007 г.) Международный симпозиум по классической и небесной механике. Великие Луки, Россия;
- 6-я (2008 г.), 8-я (2013 г.) Международная конференция по механике и баллистике «Окуневские чтения», Санкт-Петербург;
- EUROMECH Colloquium 495. Advances in simulation of multibody system dynamics, 2008, Bryansk, Russia;
- 6-е Поляховские чтения. Международная научная конференция по механике, Санкт-Петербург, 2012 г.;
- COMPDYN 2013. 4th ECCOMAS thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Kos Island, Greece, 2013;
- International Astronautical Congress, IAC-65, Toronto, Canada, 2014;
- Международная научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника», Санкт-Петербург (2013 г., 2014 г., 2017 г., 2018 г., 2019);
- XI (Казань, 2015 г.), XII (Уфа, 2019 г.) Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики;
- CLAWAR 2020. 23rd International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines. Moscow, Russia, 2020.

Диссертационная работа А.В. Яскевича соответствует требованиям, предъявляемым к докторской диссертации по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика». Ее содержание в соответствии с пунктами 4, 5, 7 паспорта специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика» охватывает следующие области исследований – механика систем твердых тел, колебания механических систем, механика робототехнических и мехатронных систем.

Диссертация «Компьютерные модели динамики стыковки и причаливания космических аппаратов» Яскевича Андрея Владимировича рекомендуется к защите на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика».

На расширенном заседании секции «Бортовые и наземные системы и приборы космических аппаратов и средств выведения» НТС ПАО «РКК «Энергия» присутствовало 18 чел. Заключение принято единогласно (протокол № 32 от 23.11.2020 г.).

Первый заместитель генерального конструктора
по летной эксплуатации, испытаниям ракетно-
космических комплексов и систем,
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РАН

В.А. Соловьев

Первый заместитель генерального конструктора
по бортовым и наземным комплексам управления,
руководитель центра

Р.М. Самитов

Заместитель руководителя центра – начальник отдела,
доктор технических наук, профессор



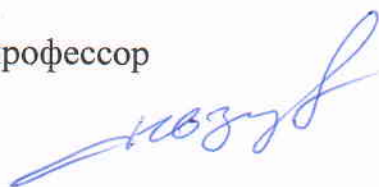
С.В. Борзых

Начальник отдела,
доктор технических наук



В.Н. Платонов

Доктор технических наук, профессор



Н.Е. Зубов

Ученый секретарь ПАО «РКК «Энергия»,
кандидат физико-математических наук



О.Н. Хатунцева

Публичное акционерное общество «Ракетно-космическая корпорация «Энергия»
имени С.П. Королёва»

Адрес 141070, Россия, Московская область, г. Королев, ул. Ленина, дом 4а,
тел. (495)-513-84-45, post@rsce.ru.