

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ  
им. А.Ю. ИШЛИНСКОГО  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИПМех РАН)

пр. Вернадского, д.101, к.1, г. Москва, 119526  
Тел. (495) 434-00-17 Факс 8-499-739-95-31  
ОКПО 02699323, ОГРН 1037739426735  
ИНН/КПП 7729138338/772901001

22.04.2021 № 1504/21-2171.1-188

На № \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ  
ДИРЕКТОР ИНСТИТУТА ПРОБЛЕМ  
МЕХАНИКИ им. А.Ю. ИШЛИНСКОГО  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

д.ф.-м.н.

Якуш С.Е.

«22»

2021 года



### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

о диссертации 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 А.В. Яскевича посвящена созданию вычислительно эффективных математических моделей динамических процессов, сопровождающих стыковку или причаливание друг к другу космических аппаратов на околоземной орбите. Современная вычислительная техника позволяет осуществлять весьма точную симуляцию динамических процессов, происходящих в сложных механических системах со многими степенями свободы, если структура и параметры математической модели полно и адекватно характеризуют свойства физического прототипа и условия его эксплуатации. Несмотря на высокое быстродействие современных компьютеров, для симуляции процессов в реальном времени проблема вычислительной эффективности модели (включая алгоритмы вычислений) остается актуальной. Моделирование процессов соединения космических аппаратов на орбите путем их стыковки или причаливания необходимо как для динамических расчетов при различных режимах управления на этапе проектирования конструкций соответствующих агрегатов, так и для имитации процесса стыковки или причаливания на стендах-тренажерах, причем в последнем случае процессы должны рассчитываться в реальном



времени. Без компьютерного моделирования создание новых стыковочных агрегатов практически невозможно ввиду высокой стоимости космических экспериментов и их опасности, если экспериментальный образец недостаточно проработан. Тема диссертации А.В. Яскевича **актуальна** в связи с необходимостью технического совершенствования стыковочных механизмов космических аппаратов, необходимостью наземных испытаний таких механизмов и точной отработки процессов стыковки или причаливания в реальном времени на стендах, наличием высокопроизводительных компьютеров и недостаточностью теоретической базы для создания адекватных математических моделей. Созданию такой теоретической базы, а также практически эффективных вычислительных методов, посвящена рецензируемая работа.

Диссертация состоит из введения и восьми глав. **Во введении** дан аналитический обзор современных методов составления уравнений движения сложных механических систем, состоящих из многих твердых тел, в общем случае связанных между собой шарнирами различных типов. Этот обзор составлен с ориентацией на компьютерную симуляцию процесса стыковки космических аппаратов на основе математической модели, адекватно характеризующей динамические свойства стыкуемых аппаратов и детально учитывающей особенности конструкции стыковочных механизмов. Поэтому значительное место в обзоре занимает проблема вычислительной эффективности математических моделей. Автор приходит к выводу, что разработанные к настоящему времени модели и алгоритмы не обеспечивают в полном объеме решение задач, связанных с анализом и совершенствованием стыковочных механизмов, и требуются дальнейшие исследования по их совершенствованию. Тем самым обосновывается актуальность темы диссертационной работы и необходимость решения поставленных задач для развития научных основ расчета и проектирования стыковочных агрегатов, а также компьютерного моделирования процесса стыковки при различных начальных условиях.

**В главах 1 и 2** излагается общая методика составления кинематических (глава 1) и динамических (глава 2) уравнений для систем твердых тел с учетом специфики конструкции стыковочных агрегатов и их функционирования, а также описываются предложенные диссертантом



алгоритмы численного решения этих уравнений. В диссертации проанализированы конструктивные особенности стыковочных устройств, вытекающие из их назначения, в частности топологическая структура, характеризующаяся кинематическими цепями, образуемыми телами системы. На основе проведенного анализа диссертантом выделен отдельный класс систем твердых тел, в который вкладываются модели существующих и разрабатываемых перспективных стыковочных механизмов. Для этого класса механических систем в диссертации разработаны вычислительные алгоритмы, обладающие существенно более высокой (до нескольких порядков по объему арифметических операций) эффективностью по сравнению с общей методикой, реализованной в коммерческих вычислительных комплексах для инженерных расчетов.

**В главе 3** излагаются алгоритмы расчета сил и моментов сил, возникающих вследствие деформации компонентов стыковочных устройств, с учетом явлений гистерезиса. Эти алгоритмы основаны на упрощенных моделях и не требуют решения сложных краевых задач для уравнений в частных производных или интегро-дифференциальных уравнений, описывающих взаимодействие упруго-пластических тел. Идентификация параметров модели осуществляется на основе экспериментов с конкретными стыковочными агрегатами. Предлагаемые модели и алгоритмы для расчета сил и моментов сил взаимодействия не требуют больших затрат времени на вычисления и обеспечивает достаточную для моделирования процесса стыковки точность.

Главы 1 - 3 формируют теоретико-механическую основу для детального расчета динамики стыковочных механизмов, с существенно более высокой скоростью, чем было возможно ранее. Это дает возможность проводить детальное моделирование процесса стыковки в реальном времени, используя в качестве вычислительных средств широко распространенные и сравнительно недорогие персональные компьютеры. Такое моделирование необходимо для высокоточной отработки процессов стыковки на гибридных стендах, в которых стыковочные агрегаты реальные, а их движение воспроизводится стендом на основе интегрирования полных уравнений динамики стыкуемых космических аппаратов, снабженных испытываемыми стыковочными агрегатами.



**В главе 4** представлены уравнения движения двух стыкуемых аппаратов, рассматриваемых как упругие тела с относительно малой упругой податливостью. Эта податливость неравномерно распределена по объему тел. Например, возможны зоны повышенной податливости, обусловленные выносными конструкциями типа солнечных батарей. Описывается подход к интегрированию уравнений движения, комбинируя аналитические и численные методы. Наличие упругих компонент вызывает колебания, период которых значительно меньше периода времени процесса стыковки и орбитального движения стыкуемых аппаратов. Поэтому колебания, вызванные упругой податливостью можно считать высокочастотными и рассматривать их отдельно от движения тел в недеформированной конфигурации. На каждом шаге численного интегрирования уравнений движения деформации и их скорости (с учетом демпфирования) рассчитываются отдельно с помощью аналитических выражений. Это позволяет увеличить скорость вычислений без значительного снижения точности. В этой же главе описываются методы расчета многоточечного контактного взаимодействия стыкуемых аппаратов, позволяющие не прибегать к уравнениям в частных производных и оставаться в рамках модели с конечным числом степеней свободы. В завершение этой главы описываются принципы и методы формирования начальных условий для моделирования динамики процесса стыковки.

**В главе 5** описаны предложенные автором диссертации модели и алгоритмы для расчета геометрических параметров контактного взаимодействия стыковочных устройств активного и пассивного аппаратов. Методика расчета предусматривает аппроксимацию поверхностей недеформированных компонентов стыковочных механизмов с помощью простых геометрических фигур, а именно, плоскостей, сфер, цилиндров, усеченных конусов, отрезков прямых и дуг окружностей. Эти фигуры, названные автором примитивами, задаются простыми математическими формулами. Предполагается, что любая сложная поверхность может быть с достаточной точностью приближена конечным набором примитивов. Контакт компонентов стыковочных устройств локально моделируется как контакт соответствующих примитивов и проявляется их взаимным



проникновением. Если таковое имеет место, вычисляется сила контактного взаимодействия, зависящая от глубины проникновения контактирующих примитивов друг в друга и скорости ее изменения. Считается, что эта сила обусловлена упругими и диссипативными свойствами контактирующих тел, а проникновение их друг в друга отождествляется с деформацией. Так как деформация контактирующих тел мала по сравнению с их линейными размерами, каждый контакт считается «точечным». Точка контакта определяется как пересечение общей нормали к контактирующим поверхностям или линиям с одной из них. Число точек контакта предполагается конечным. В главе 5 проведен геометрический расчет параметров контакта всех возможных пар примитивов. Благодаря выбору примитивов этот расчет не требует решения трансцендентных уравнений и проводится аналитически, что упрощает и ускоряет вычисления. В зависимости от величины и скорости изменения деформации на каждом текущем шаге интегрирования дифференциальных уравнений движения может быть вычислена сила взаимодействия в каждой точке контакта по методике, изложенной в главе 4.

**В главах 6 – 8** методология моделирования динамики стыковки, развитая в предыдущих главах, применяется для практических расчетов стыковочных агрегатов различного типа, используемых в современной космонавтике. При этом в моделях дополнительно учитывается специфика конкретных механизмов. Проведены расчеты стыковки космических аппаратов с помощью стыковочных агрегатов центрального типа (глава 6) и с помощью упруго-адаптивного периферийного стыковочного механизма (глава 7). В главе 8 проводится расчет соединения космических аппаратов посредством причаливания одного аппарата к другому с помощью манипулятора. Для визуализации расчетов используется новое средство, предложенное автором и названное им динамической мнемосхемой. Расчеты, изложенные в главах 6 – 8, носят не иллюстративный характер. Они проводились с целью анализа динамических характеристик процесса



стыковки посредством различных стыковочных устройств, как используемых в настоящее время, так и перспективных. На основе этого анализа корректировались режимы управления различными этапами стыковки. Моделирование обнаружило ряд явлений, вызвавших необходимость внести ряд изменений в конструкцию стыковочных агрегатов. На модифицированные конструктивные решения получены патенты, соавтором которых является диссертант. Модели, разработанные диссертантом, позволили правильно интерпретировать информацию, получаемую в результате гибридного моделирования стыковки на 6-степенном стенде. В результате их адекватность подтверждена экспериментально. Подвижная платформа стенда воспроизводит относительное движение стыковочных агрегатов, которые физически взаимодействуют между собой. Силы взаимодействия измеряются датчиками стенда и входят в дифференциальные уравнения движения стыкуемых космических аппаратов. На основе интегрирования этих уравнений формируются сигналы управления подвижной платформой. Методика гибридного моделирования процесса соединения космических аппаратов посредством причаливания с помощью манипуляторов разработана диссертантом и на момент ее создания не имела прямых аналогов.

Методология, развитая в работе, не привязана жестко к конкретным конструкциям стыковочных агрегатов, она достаточно универсальна и может быть использована для стыковочных агрегатов различных типов. Значительным достижением, относящимся к теоретической механике, мне видится выделение достаточно широкого класса систем тел, соединенных шарнирами, к которому принадлежат, в частности, космические аппараты, снабженные стыковочными устройствами известных типов. Для этого класса систем диссертантом разработаны алгоритмы и математические модели, вычислительная эффективность которых на два порядка (по числу арифметических операций) выше, чем при реализации общих, универсальных подходов, используемых для моделирования динамики



произвольных сложных механических систем. Этот результат чрезвычайно важен для компьютерного моделирования процесса стыковки. Он открывает возможность проводить полномасштабное компьютерное моделирование в реальном времени, используя недорогие вычислительные средства типа персональных компьютеров, что весьма важно для проведения наземных стендовых испытаний стыковочных устройств и отработки навыков космонавтов по проведению стыковки на тренажерах. К достижениям автора в области теоретической механики можно отнести также создание модели силового взаимодействия стыковочных устройств с учетом конструктивных особенностей и свойств используемых материалов (гистерезис). Предложенные и разработанные в диссертации теоретические результаты использовались для расчетов реальных стыковочных агрегатов в процессе их проектирования и технической отработки. Диссертанту удалось получить ряд новых результатов по динамике процесса стыковки и обнаружить важные особенности динамического поведения стыкуемых аппаратов, которые не удавалось обнаружить раньше другими методами. Обнаруженные на этапе моделирования эффекты были подтверждены экспериментально, и с их учетом была проведена модификация стыковочных устройств. Тесная связь теоретических исследований с инженерными расчетами и экспериментом – большое достоинство диссертации А.В. Яскевича.

Все выносимые на защиту результаты являются новыми и достоверными. **Научная новизна** состоит в выделении особого класса систем твердых тел, к которому принадлежат космические аппараты со стыковочными устройствами, разработке для этого класса систем эффективных методов расчета кинематики и динамики, разработке новых методов расчета геометрических и силовых характеристик взаимодействия стыковочных устройств, решении большого числа практических задач, актуальных для совершенствования конструкции стыковочных механизмов и управления процессом стыковки. Новизна подтверждается сравнением результатов диссертации с подходами других авторов к решению сходных



проблем. Косвенно новизна подтверждается публикацией результатов диссертации в профильных научных журналах, поступления в которые проходят тщательное рецензирование квалифицированными специалистами; рецензирование, в частности, предусматривает оценку степени новизны. **Достоверность результатов** базируется на выборе методов исследования, адекватных поставленным задачам, квалифицированном использовании этих методов, и подтверждении теоретических выводов и расчетов экспериментами.

**Практическая значимость** полученных результатов состоит в их использовании при проектировании стыковочных механизмов и анализе наземных и летных испытаний процессов стыковки и причаливания кораблей и модулей к Международной космической станции. Ценность результатов диссертации для инженерной практики подтверждается также тем, что диссертант является соавтором 4 патентов на изобретения, связанные со стыковочными механизмами космических аппаратов. В этих изобретениях существенно использованы научные результаты А.В. Яскевича, вошедшие в его диссертацию.

По результатам диссертации имеется 22 публикации, из них 14 – в журналах, рекомендованных ВАК для публикаций по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика. Из упомянутых 14 статей 12 работ, в которых изложены базовые результаты диссертации, опубликованы диссертантом без соавторов, что свидетельствует о **личном получении** соискателем результатов, выносимых на защиту. Результаты диссертации неоднократно докладывались на российских и международных научных конференциях.

Материал диссертации изложен последовательно и систематически в стиле, отвечающем научно-технической литературе. Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

Диссертация свидетельствует о высокой квалификации ее автора как ученого в области теоретической и прикладной механики, специалиста в области вычислительной механики и инженера-исследователя в области



механики систем космических аппаратов, их стыковочных устройств в частности. Диссертантом внесен значительный вклад в разработку современных и перспективных стыковочных агрегатов космических аппаратов. Результаты диссертации могут быть рекомендованы для практического использования в научных учреждениях и проектных организациях, деятельность которых связана с теорией механизмов, механикой космического полета, космонавтикой и космической робототехникой. К таким организациям относятся Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук, Институт прикладной математики им М.В. Келдыша Российской академии наук, Институт проблем механики им А.Ю. Ищлинского Российской академии наук, Институт машиноведения им А.А. Благонравова Российской академии наук, Институт космических исследований Российской академии наук, Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики (ЦНИИ РТК), Центральный научно-исследовательский институт машиностроения (ЦНИИМаш). Результаты диссертации целесообразно включить в учебные курсы для студентов и аспирантов, специализирующихся в механике космических аппаратов.

### **Замечания**

Существенных замечаний по научному содержанию работы и изложению результатов нет. Иногда не вполне аккуратно используются некоторые термины.

1. В тексте работы встречается словосочетание «декартовый вектор», смысл которого не вполне понятен. Понятие вектора в математике и механике вполне определено. Зачем нужно прилагательное «декартовый», неясно. По-видимому, имеется в виду, что данный вектор представлен своими компонентами в декартовой системе координат.



2. В диссертации используются термины «число степеней свободы» и «число степеней подвижности». Первый термин является термином теоретической механики, второй иногда используется в инженерной литературе и научной литературе по теории машин и механизмов. Каково содержательное отличие этих терминов, из диссертации неясно. Если они используются как синонимы, то предпочтительно использовать термин «число степеней свободы», во всяком случае, в диссертации по теоретической механике.
3. На стр. 130 употреблено непонятное словосочетание «объем относительного движения».

Данные замечания не снижают общую высокую оценку диссертации.

### **Заключение**

Диссертационная работа Яскевича Андрея Владимировича на тему «Компьютерные модели динамики стыковки и причаливания космических аппаратов» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена крупная научная проблема теоретической и инженерной механики, а именно, сформированы научные и методические основы моделирования процесса стыковки и причаливания космических аппаратов на орбите. Совокупность полученных результатов можно квалифицировать как значительное научное достижение в области теоретической и инженерной механики. Рассматриваемая диссертационная работа соответствует паспорту специальности 01.02.01 – Теоретическая механика и полностью отвечает требованиям пп. 9 – 11, 13, 14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Яскевич Андрей Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика.

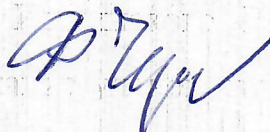


Диссертация А.В. Яскевича и отзыв на нее обсуждены и одобрены на заседании семинара ИПМех РАН по теории управления и динамики систем под руководством академика РАН Ф.Л. Черноушко 25 марта 2021 года (Протокол № 1).

Отзыв составил доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН Болотник Николай Николаевич. Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук защищена Н.Н. Болотником по специальности 01.02.01 – Теоретическая механика.

Главный научный сотрудник

ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН,  
доктор физико-математических наук,  
академик РАН

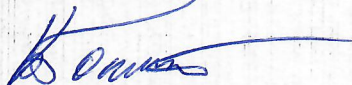


Черноушко Феликс Леонидович

119526, г. Москва, пр. Вернадского, д. 101, корп. 1, тел. +7 (495) 434-02-07  
E-mail: chern@ipmnet.ru

Главный научный сотрудник

ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН,  
доктор физико-математических наук,  
член-корреспондент РАН,



Болотник Николай Николаевич

119526, г. Москва, пр. Вернадского, д. 101, корп. 1, тел. +7 (495) 434-35-01  
E-mail: bolotnik@ipmnet.ru



Заместитель директора

ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН,

доктор технических наук,

профессор РАН

Ермолов Иван Леонидович

119526, г. Москва, пр. Вернадского, д. 101, корп. 1, тел. +7 (495) 434-35-47

E-mail: ermolov@ipmnet.ru

Подписи Черноусько Ф.Л., Болотника Н.Н.

и Ермолова И.Л. заверяю:

Ученый секретарь

ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН к.ф.-м.н.



22.07.2021

Котов Михаил Алтаевич.