

## ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Яскевича Андрея Владимировича  
на тему «Компьютерные модели динамики стыковки и  
причаливания космических аппаратов», представленной на соискание  
ученой степени доктора физико-математических наук  
по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика»

Компьютерное моделирование различных технических систем методами динамики систем тел является развитым и эффективным инструментом, используемым исследователями на различных этапах: при проектировании, модификации, анализе отказов и т.д. Вне зависимости от области применения, соответствующее программное обеспечение имеет общие черты: автоматический синтез уравнений в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений, численные методы их решения, методы визуализации, обработки и анализа результатов. Наличие общих подходов не отрицает необходимости учитывать специфические особенности моделируемых объектов, например, железнодорожных экипажей, автомобилей, гусеничных машин. Учет таких особенностей приводит к разработке отдельных модулей универсальных программных систем, таких как MSC.ADAMS или российская программа «Эйлер», либо созданию специализированных программ, ориентированных на отдельное направление, например, CarSim (автомобили), NUCARS, Vampire (железнодорожные экипажи). Для разработки модулей или программ обязательно привлекаются ведущие исследователи-специалисты в данной предметной области, но часто программы создаются такими специалистами. Данная работа как раз относится к последнему типу. Отличительными особенностями объекта моделирования в диссертационной работе являются: критически опасные последствия сбоя системы; гибридный характер модели, связанный с необходимостью учета податливости звеньев и упругости конструкции космического аппарата (КА); повышенные требования к точности модели и быстродействию процесса моделирования; уникальность объекта, т.е. отсутствие массовости в использовании разработанного программного обеспечения, в отличие от железнодорожной или авто-

мобильной отраслей. Перечисленные особенности систем стыковки и причаливания КА подтверждают актуальность и важность выполненной работы, а также обосновывают характер разрабатываемого программного обеспечения в виде in-house (ведомственного) продукта.

Программа, разработанная автором, включает все необходимые этапы моделирования и анализа динамики систем стыковки и причаливания КА. Для синтеза уравнений движения используются методы составных и присоединенных тел с авторскими модификациями, учитывающими особенности объекта. С целью повышения быстродействия расчета уравнений разработана и реализована специализированная система автоматических выкладок, позволяющая синтезировать уравнения в символьной форме.

Учитываются податливость отдельных звеньев механизмов стыковки и манипулятора, используемого для причаливания. Гистерезисные модели податливых звеньев и силовых элементов строятся на базе экспериментальных данных. Для учета упругих свойств корпусов КА применяется метод разделения движений на движение как абсолютно твердого тела и на малые упругие отклонения, разложенные в ряд по собственным формам колебаний.

Контактное взаимодействие тел в процессе стыковки и причаливания моделируется с использованием подхода податливого контакта. Для расчета геометрии контакта выполнена классификация возможных контактных поверхностей; выделены пары графических примитивов, для которых положение точки контакта рассчитывается по аналитическим зависимостям. В случае более сложных поверхностей предложен метод дихотомии для быстрой локализации точки контакта.

Для отображения результатов численного моделирования создана оригинальная визуальная среда.

Все используемые и разработанные алгоритмы представляются корректными.

Программа использована для анализа динамики различных систем стыковки и причаливания КА, в том числе созданных при непосредственном участии автора. Выполнено моделирование причаливания на 6-степенном стенде, схема которого была предложена автором и реализована в 1991-м го-

ду. Сравнение численного моделирования с экспериментальными данными показало впечатляющее совпадение результатов.

Специализированное программное обеспечение, разработанное автором для решения задач стыковки и причаливания КА, безусловно, является новым, как и ряд реализованных алгоритмов (метод решения контактных задач, алгоритмы синтеза уравнений в символьной форме и т.д.). Работа носит законченный характер, является фундаментальным исследованием и имеет большое значение для теоретической механики в разделе моделирования динамики систем тел и прикладное значение для аэрокосмической отрасли и для общего машиностроения.

По содержанию автореферата имеются следующие замечания.

1. Утверждение «модели и алгоритмы для расчета контактного взаимодействия сложных поверхностей при выполнении сборочных операций отсутствуют» является некорректным. Методы компьютерного моделирования контактных взаимодействий в динамике систем тел имеют многолетнюю историю плодотворного развития, в том числе в случае произвольных контактных поверхностей.
2. Для моделирования упругой конструкции КА используется метод разделения движения, требующий использования нескольких тысяч собственных форм колебаний конструкции. Повысить эффективность моделирования могло бы применение известного метода Крейга-Бэмптона, позволяющего ограничить число степеней свободы несколькими десятками или сотнями и, в том числе, исследовать взаимное влияние разделенных движений.
3. Для расчета геометрии контакта сложных поверхностей предложен метод дихотомии. Поскольку переход контакта с одной образующей на другую при непрерывном движении происходит скачком, приходится применять высокую степень дискретизации поверхности. Для повышения быстродействия расчета представляется целесообразным использовать метод дихотомии для грубой локализации контакта с последующим определением точного положения итерационным методом ньютоновского типа.

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку работы. На основании содержания автореферата можно сделать вывод о том, что представленная к защите диссертация является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей всем критериям, установленным п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (в редакции от 01.10.2018, с изменениями от 26.05.2020). Ее автор Яскевич Андрей Владимирович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика».

Отзыв составил

Доктор физико-математических наук по специальности 01.02.01 – «Теоретическая механика», профессор, руководитель лаборатории «Вычислительная механика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения «Брянский государственный технический университет»

Погорелов Дмитрий Юрьевич

«12» апреля 2021 г.

Почтовый адрес: Бульвар 50 лет октября, д. 7, г. Брянск, Брянская область, Россия, 241035.

Тел. 8 4832 56 86 37

e-mail: [pogorelov@umlab.ru](mailto:pogorelov@umlab.ru)

