

## ОТЗЫВ НАУЧНОГО КОНСУЛЬТАНТА

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»

Практика создания новых космических аппаратов, взаимодействующих в Космосе, требует разработки надежной теоретической базы и программного обеспечения методов их проектирования. Для возможности учета динамики контактного взаимодействия всех компонентов механических систем, участвующих в стыковке и причаливании, необходимо выполнение сложных, комплексных математических и компьютерных расчетов. При этом расчет динамики и анализ большого объема получаемых при моделировании данных могут быть выполнены за приемлемое время только при использовании специальных алгоритмов и программных инструментов.

А.В. Яскевич более тридцати лет выполняет лично и возглавляет в ПАО РКК «Энергия» работы по математическому моделированию и экспериментальной отработке процессов стыковки КА. Математические модели стыковки, использовавшиеся до начала его научной и практической деятельности, не учитывали динамику важнейшего компонента – стыковочного механизма, имеющего собственные степени свободы. В силу этого они описывали приближенно и не всегда корректно только начальную фазу процесса. Отработка остальных стадий процесса стыковки осуществлялось по частям экспериментально, а в целом только в космическом пространстве, что очень затратно.

Необходимость теоретической оценки возможности причаливания космических аппаратов с использованием манипулятора впервые возникла в конце 80-х гг. 20-го века, и А.В. Яскевич предложил новый оригинальный

подход к этой проблеме – гибридное моделирование, которое до сих пор реализовано только в ПАО РКК «Энергия». Он разработал математическую модель динамики движения механической системы «космический манипулятор – переносимый космический аппарат», которая в последующем им неоднократно совершенствовалась для использования в новых проектах. Необходимо заметить, что Россия вплоть до последних лет являлась монополистом и в настоящее время остается лидером в области разработки практически действующих систем стыковки. Этим во многом объясняется тот факт, что публикации, посвященные методике математического моделирования динамики стыковки и гибридного моделирования причаливания, до настоящего времени практически отсутствуют.

Таким образом, работа А.В. Яскевича, посвященная решению огромного комплекса указанных выше насущных проблем освоения космического пространства является, безусловно, актуальной.

В первой половине диссертации Яскевич А.В. излагает полученные им общие методы решения задач моделирования стыковки. В главе 1 выделены различные классы стыковочных механизмов и определены их основные структурные свойства. На основе указанной классификации автором предложены новые общие методы формирования и решения уравнений контурных связей.

В главе 2 анализируются известные алгоритмы, обеспечивающие расчет динамики отдельных кинематических цепей с помощью минимального числа векторно-матричных операций. Предлагается оригинальный способ их эффективного комбинированного использования в моделях динамики стыковочных механизмов центрального и периферийного типов. Предлагается также впервые созданный автором алгоритм расчета сил и моментов, действующих на космический аппарат в процессе стыковки.

В главе 3 описаны разработанные автором новые модели и алгоритмы для расчета упругих деформаций с гистерезисом для кинематических цепей и отдельных звеньев стыковочных механизмов. Без таких алгоритмов невозможно правильно учесть потери энергии в процессе контактного взаимодействия. В силу сложности конструкций механизмов эти модели основаны на экспериментальных данных, полученных при статических измерениях и динамических испытаниях.

Глава 4 посвящена моделям динамики взаимного движения стыкуемых космических аппаратов с учетом их упругого контактного взаимодействия. Новизна применяемого подхода к расчету упругих колебаний конструкции состоит в использовании соотношений, полученных предварительно на основе аналитического решения для каждой собственной формы колебаний на шаге интегрирования, что значительно упрощает вычисления при большом (до нескольких тысяч) числе этих форм. При этом разработанная автором программа инициализации модели стыковки совместима с системой NASTRAN, с помощью которой вычисляются эти формы, что обеспечивает автоматическое вычисление необходимых коэффициентов.

В главе 5 описаны разработанные соискателем модели для описания сложных контактирующих поверхностей стыковочных агрегатов с помощью наборов различных простейших геометрических фигур, а также алгоритмы, которые обеспечивают наиболее быстрое определение точек и параметров контакта с помощью аналитических выражений и итерационных процедур. Продемонстрировано применение данного подхода для описания контактного взаимодействия стыковочных агрегатов центрального и периферийного типа, для различных устройств причаливания.

Во второй части диссертации представлены разработанные на основе упомянутой выше общей методологии модели процессов стыковки и причаливания с использованием различных механизмов и устройств при учете их конкретных уникальных свойств. В главе 6 описаны модели

динамики стыковки с использованием стыковочных агрегатов центрального типа. Приведены модели динамики осевого демпфера и привода с использованием дифференциала, модели динамики механизма при боковых и угловых движениях, результаты сравнения с данными динамических испытаний, предложены модификации кинематической схемы, уменьшающие контактные нагрузки и обеспечивающие стыковку к различным вариантам геометрии стыковочных агрегатов. Параметры новых механизмов выбраны на основе большого объема моделирования. В главе 7 представлена кинематическая схема и принцип работы предложенного автором нового периферийного упруго-адаптивного стыковочного механизма, уравнения динамики его платформы с дифференциальными шарнирами, модели устройств поглощения энергии и стягивания. Приведены результаты моделирования для наиболее критичных начальных условий стыковки.

В главе 8 описана разработанная и внедренная автором в производственный процесс методика гибридного моделирования причаливания космических аппаратов, когда для их соединения используются реальные стыковочные механизмы. Под руководством автора разработан соответствующий компьютерный стенд. Содержатся результаты выполненной с его помощью экспериментальной отработки причаливания модуля МИМ1 к МКС манипулятором SSRMS.. Автором же разработана компьютерная модель визуализации для облегчения процесса наведения и соединения оператору, управляющему манипуляторов в реальном времени.

Все предложенные автором методы и алгоритмы реализованы автором в виде эффективно работающего быстродействующего программного комплекса в символьном виде с помощью средств компьютерной алгебры, что придает им достаточную общность и мобильность в применении. Разработанные автором модели и алгоритмы компьютерной оптимизации вычислений при символьной реализации алгоритмов рассматриваются в Приложении.

Для всех представленных в главах 6-8 моделей динамики автором предложены новые принципы и программные средства (динамические мнемосхемы) для визуализации результатов моделирования, позволяющие оперативно оценить ход контактного взаимодействия.

Научная новизна диссертации состоит в том, что в ней впервые представлены общая методология разработки корректных, вычислительно эффективных и информативных моделей динамики стыковки и причаливания, разработанные на ее основе модели конкретных процессов. Новые фундаментальные теоретические методы, представленные в диссертации, и методы их практической реализации, без сомнения, лягут в основу осуществления новых перспективных проектов космической науки и техники и будут способствовать дальнейшему научно-техническому прогрессу космической отрасли.

Все результаты, представленные в диссертации, получены лично соискателем. Компьютерные программы визуализации разрабатывались при его непосредственном участии и под его руководством.

Достоверность получаемых результатов моделирования подтверждается сравнением с данными динамических испытаний на 6-ступенном стенде, созданном под научным руководством диссертанта.

Основные результаты работы отражены в 22 статьях в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Результаты диссертации многократно обсуждались на Всероссийских и международных конференциях. Предложенные кинематические схемы новых стыковочных механизмов защищены 4 патентами РФ.

Практическая значимость полученных результатов состоит в их использовании при анализе динамики стыковки различных кораблей («Союз», «Прогресс», ATV, ПТК) и модулей (МЛМ, НЭМ) к МКС (в том числе при анализе нештатных ситуаций), при проектировании новых стыковочных механизмов, при экспериментальной отработке процессов



