

## Основные результаты 2 этапа проекта

*Целью* выполнения настоящих ПНИ является:

1. Получение значимых научных результатов, касающихся создания аналитических и цифровых методов проектирования композитных анизотропных и многослойных конструкций космических аппаратов для глобальных информационных систем.

2. Предоставление научно-исследовательским организациям, занимающимся проектированием космических аппаратов, новых и эффективных методов проектирования конструктивных элементов космических аппаратов глобальных информационных систем.

3. Вывод на рынок интеллектуальных продуктов новых аналитических и цифровых методов и методик проектирования композитных конструкций, позволяющих переходить к созданию новых видов космических аппаратов.

*Объектом* исследований являются композитные анизотропные и многослойные оболочки и панели, являющиеся конструктивными элементами корпусов космических аппаратов, адаптеров и диспенсеров полезной нагрузки, спиц зонтичных антенн и солнечных батарей.

Данный этап исследований посвящен разработке аналитических и цифровых методов проектирования композитных анизотропных и многослойных конструкций космических аппаратов.

В ходе выполнения второго этапа проекта получены следующие *основные научные результаты*:

1. Разработаны аналитические и цифровые методы проектирования композитных трехслойных панелей, являющихся структурными элементами космического аппарата. Эти методы включают: определение основной частоты поперечных колебаний трехслойной панели корпуса космического аппарата, с закрепленными и свободными краями; определение критического усилия трехслойной панели при симметричной потере устойчивости; определение частот симметричных колебаний трехслойной панели корпуса космического аппарата; определение критического усилия сжатой трехслойной панели космического аппарата со свободным краем; определение критического усилия сжатой трехслойной панели космического аппарата со свободными и закрепленными краями. Моделирование трехслойных структур выполнено с помощью сдвиговой модели пластин и дискретной модели, основанной на методе конечных элементов. Созданные методы пригодны для оценки деформативности, устойчивости и динамического поведения трехслойных конструкций космического аппарата.

2. Разработаны методики проектирования композитных трехслойных панелей космических аппаратов.

Методики сформированы на основе разработанных аналитических и цифровых методов. В методиках учитываются условия закрепления и нагружения, характерные для структурных элементов космических аппаратов. Методики предназначены для проектирования трехслойных панелей, исходя из условия минимальной массы при различных граничных условиях с учетом ограничений, накладываемых на значения основной частоты колебаний, критического усилия потери устойчивости и частоты симметричных колебаний. Методики имеют точность не хуже 5% относительно численных методов.

3. Разработаны аналитические и цифровые методы проектирования композитных слоистых ортотропных оболочек и панелей, являющихся структурными элементами космического аппарата. Эти методы включают: определения критических усилий ортотропных панелей космического аппарата, обладающих различными условиями закрепления краев; определения основной частоты колебаний ортотропной пластины уголкового отражателя, закрепленной в центральной точке; расчета деформативности композитной ортотропной мембраны (подложки), натянутой на каркас солнечной батареи космического аппарата; определения критического усилия ортотропной цилиндрической

оболочки корпуса космического аппарата, нагруженной силами инерции при жестком закреплении краев; определения основной частоты консольно-закрепленной композитной цилиндрической оболочки корпуса космического аппарата; определения основной частоты поперечных колебаний ортотропного цилиндрического корпуса космического аппарата с закрепленными краями. Моделирование слоистых структур выполнено с помощью классической теории оболочек и пластин и дискретной модели, основанной на методе конечных элементов. Созданные методы пригодны для оценки деформативности, устойчивости и динамического поведения многослойных ортотропных конструкций космического аппарата.

4. Разработаны методики проектирования композитных слоистых ортотропных оболочек и панелей, являющихся структурными элементами космического аппарата. Методики сформированы на основе разработанных аналитических и цифровых методов. В методиках учитываются условия закрепления и нагружения, характерные для структурных элементов космических аппаратов, выпускаемых Индустриальным партнером. Методики предназначены для проектирования ортотропных оболочек и панелей, исходя из условия минимальной массы при наличии ограничений, накладываемых на значения основной частоты поперечных колебаний, критического усилия сжатия, максимального прогиба и критического поперечного ускорения. Методики имеют точность не хуже 5% относительно численных методов.

5. Разработаны аналитические и цифровые методы проектирования композитных анизотропных сетчатых оболочек и панелей, являющихся структурными элементами космического аппарата. Эти методы предназначены для: расчета деформативности композитного анизотропного сетчатого корпуса космического аппарата, нагруженного поперечными силами инерции; определения основной частоты поперечных колебаний консольно-закрепленного композитного анизотропного сетчатого корпуса космического аппарата; определения основной частоты поперечных колебаний композитного анизотропного сетчатого корпуса космического аппарата; расчета деформативности композитной анизотропной цилиндрической сетчатой оболочки корпуса космического аппарата, нагруженной осевой сжимающей силой на жестком краевом диске; расчета деформирования сетчатой цилиндрической оболочки, в центре пролета которой находится внутренний топливный бак, нагруженной поперечными силами инерции; определения критического усилия сжатой композитной анизотропной сетчатой панели с закрепленными краями. Моделирование сетчатых структур выполнено с помощью континуальной модели и дискретной модели, основанной на методе конечных элементов. Созданные методы пригодны для оценки деформативности, устойчивости и динамического поведения сетчатых конструкций космического аппарата.

6. Разработаны методики проектирования композитных анизотропных сетчатых оболочек и панелей, являющихся структурными элементами космического аппарата. Методики сформированы на основе разработанных аналитических и цифровых методов. В методиках учитываются условия закрепления и нагружения, характерные для структурных элементов платформ и полезной нагрузки космических аппаратов, создаваемых Индустриальным партнером и другими предприятиями космической отрасли. Методики предназначены для проектирования композитных анизотропных сетчатых оболочек и панелей, исходя из условия минимальной массы при наличии ограничений, накладываемых на значения перемещения (прогиба) при действии поперечных сил инерции, основной частоты поперечных колебаний, критического усилия сжатия. Результатами проектирования, согласно методикам, являются параметры сетчатой структуры, обеспечивающие выполнение заданных условий. Методики имеют точность не хуже 5% относительно численных методов.

7. Разработаны программы и методики численного исследования цифровых моделей анизотропной сетчатой и трехслойной панелей корпуса космического аппарата. Программы и методики предназначены для проведения численных исследований по

оценки влияния конструктивных параметров панели на устойчивость и определения параметров, которые удовлетворяют заданным ограничениям по массе и величине критического усилия сжатия.

8. Выполнены численные исследования по моделированию анизотридной сетчатой панели корпуса космического аппарата и трехслойной панели корпуса космического аппарата. Выполненные исследования позволили определить влияние анализируемых параметров сетчатой панели и трехслойной панели на величину критического усилия. Подобное исследование позволит выбрать параметры соответствующих панелей, удовлетворяющие ограничениям, накладываемым на критическое усилие и массу конструкции.

9. Разработана концепция для проектирования перспективного композитного конструктивного элемента полезной нагрузки перспективного спутника связи гражданского назначения.

Были рассмотрены и проанализированы три варианта конструкции перспективного спутника связи гражданского назначения:

–конструкция спутника, у которой в качестве основных силовых элементов используются цилиндрическая оболочка диаметром 1,63 метра и две расположенные крест-накрест трёхслойные сотовые панели;

–конструкция спутника, у которой в качестве основных силовых элементов используются цилиндрическая оболочка диаметром 1,63 метра, цилиндрическая оболочка диаметром 0,53 метра и коническая оболочка для их соединения;

–конструкция спутника, у которой в качестве основных силовых элементов используются цилиндрическая оболочка диаметром 1,63 метра, цилиндрическая оболочка диаметром 1,19 метра и коническая оболочка для их соединения.

Проведена оценка собственных основных частот колебаний этих конструкций и осуществлено проектирование составных частей полезной нагрузки космического аппарата. Были определены оптимальные проектные параметры анизотридных сетчатых цилиндрических оболочке на основе методик проектирования композитных анизотридных сетчатых оболочек и панелей, являющихся структурными элементами космического аппарата, которые удовлетворяют предъявляемым к конструкции требованиям.

10. Разработаны рекомендации и предложения по использованию полученных результатов на предприятиях космической отрасли (в том числе на предприятии Индустриального партнера), а также в дальнейших исследованиях и разработках. Результаты работы рекомендованы к использованию на предприятиях, производящих конструктивные элементы космической техники из композиционных материалов – АО «ЦНИИСМ» и АО «ИСС». Методы проектирования композитных конструкций будут переданы в профильные заинтересованные организации в виде методик проектирования (руководящих материалов), научных статей и докладов на конференциях.

Полученные научные результаты рекомендованы, прежде всего, к внедрению и использованию на предприятии Индустриального партнера - АО «ИСС» при проектировании следующих перспективных конструкций: композитного анизотридного сетчатого корпуса космического аппарата с наружной крупногабаритной трансформируемой антенной; силовых корпусов приборных отсеков, выполненных в виде композитных анизотридных сетчатых цилиндрических оболочек, космической научной обсерватории «Миллиметр»; корпусов перспективных телекоммуникационных космических аппаратов «Экспресс-АМУЗ», «Экспресс-АМУ7», «ANGOSAT-2», выполненных в виде композитных анизотридных сетчатых цилиндрических оболочек, скрепленных с трехслойными панелями; корпусов, выполненных в виде композитной цилиндрической оболочки, усиленной анизотридной структурой –для перспективной тяжелой высокоэнергетической платформы космических аппаратов связи; композитного анизотридного сетчатого корпуса с внутренним топливным баком для перспективных космических аппаратов, предусматривающих электрореактивную систему довыведения на

высокоэнергетические орбиты; корпусов перспективных космических аппаратов двойного назначения.

11. Разработан проект ТЗ на проведение ОКР по созданию композиционных элементов конструкций КА.

Основанием для разработки проекта ТЗ является работы, проводимые Индустриальным партнером по созданию перспективного спутника связи гражданского назначения в рамках реализации Программы инновационного развития АО «ИСС» на 2016–2025 годы. Целями выполнения ОКР являются разработка элемента конструкции корпуса КА из полимерных композиционных материалов с оптимизацией по жесткостным и массовым характеристикам, его изготовление и экспериментальное подтверждение прочности, жесткости и работоспособности в составе КА при воздействии динамических и статических нагрузок, а также климатических воздействий. Элемент конструкции представляет собой сетчатую анизотридную цилиндрическую оболочку из углепластика с двумя торцевыми шпангоутами. Выбор такого элемента обусловлен необходимостью повышения массой эффективности силовых конструкций корпусов КА, обеспечивающих выведения полезной нагрузки. При разработке ТЗ учитывался уровень нагрузок и воздействий, соответствующий данным условий эксплуатации предполагаемого средства выведения КА.

12. Проведена сравнительная оценка научно-технического уровня полученных результатов с современным уровнем аналогичных разработок.

Проведенное сравнение позволило сделать вывод о том, что существующая в мире потребность в увеличении весовой эффективности космических аппаратов, состоящих из композитных элементов, инициирует разработку эффективных методов их проектирования. Отмечается, в открытой литературе отсутствуют данные о существовании методик, пригодных для интегрального, т.е. учитывающего все возможные ограничения проектирования композитных сетчатых и многослойных конструкций, используемых в КА. В выполненных аналогичных исследованиях решены отдельные задачи анализа композитных конструкций, посвященные в основном исследованиям прочности и устойчивости. Отсутствуют решения, позволяющие выполнить оценки деформативности сетчатых и многослойных конструктивных элементов космических аппаратов.

В проекте впервые разработаны аналитические и цифровые методы проектирования композитных анизотридных сетчатых оболочек и панелей, пригодные для оценки деформативности, устойчивости и динамического поведения сетчатых конструкций космического аппарата. Сочетание аналитических и численных методов позволило сформировать синтетический подход, который может быть встроен в процесс создания цифровых двойников композитных конструктивных элементов космических аппаратов на этапе проектирования. Показано, что эти результаты по своему научно-техническому уровню соответствуют лучшим зарубежным практикам, современному уровню развития методов проектирования конструкций космической техники из композиционных материалов.

13. Выполнена технико-экономическая оценка результатов ПНИ.

Проведенная технико-экономическая оценка показала, что разработанный комплекс методик при сохранении требуемой точности расчетов обладает целым рядом преимуществ при его использовании, к которым относятся:

–более широкий диапазон исходных данных, что приводит к оптимальным выходным параметрам (ключевое преимущество);

–благодаря своей универсальности может использоваться специалистами, не обладающими специальными знаниями в области механики композиционных материалов.

Показано, что использование научных результатов ПНИ позволит достичь значительного улучшения массогабаритных характеристик КА в части снижения массовой доли конструкции и пропорционального увеличения доли полезной нагрузки на 1,5-3% (9-

270 кг в зависимости от типа КА), что, в конечном итоге, повысит экономическую эффективность производства отдельно взятого КА. Кроме того, внедрение результатов ПНИ приведёт к снижению материальных затрат на производство на 3-4% за счет использования в производстве отечественных композиционных материалов. Все это повышает конкурентоспособность КА на мировом рынке благодаря высокой весовой эффективности и сокращению сроков производства. Суммарный экономический эффект применения разработанных методик может достигать 375 - 487,5 млн. руб. в расчете на 1 КА.

14. Выполнено обобщение полученных результатов, проведена оценка полноты выполнения работ и достижения поставленных целей ПНИ.

Заявленные прикладные научные исследования выполнены полностью в соответствии с Техническим заданием. Цели выполнения ПНИ достигнуты. Созданное направление исследований композитных конструкций можно с уверенностью отнести к критическим технологиям и приоритетным направлениям модернизации и технологического развития экономики России. Разработанные методы и методики проектирования позволят повысить весовую эффективность космических аппаратов, их эксплуатационные параметры и время работы на орбите. Результаты исследований помогут увеличить экономическую и экспортную привлекательность отечественной космической техники.