

УДК 629.7

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПАРНЫХ СРАВНЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КОМПОЗИТНЫХ КОРПУСОВ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ

О.Г. Жидкова

Специальное конструкторско-технологическое бюро «Пластик», Сызрань, Россия
ol_zhidkova@yahoo.com

Аннотация

Рассматривается задача проектирования прецизионных крупногабаритных корпусных конструкций. Отмечена перспективность применения композиционных материалов в крупногабаритных несущих конструкциях космических телескопов. Проектная задача создания несущей конструкции корпуса телескопа оптико-электронного комплекса сформулирована в стандартной форме в терминах нелинейного математического программирования. Осуществлена декомпозиция задачи на ряд структурных и параметрических подзадач. Отмечены трудности формализации задачи выбора структурных решений и на примере корпусной композитной конструкции космического телескопа показаны пути её решения. Подробно рассмотрены выбор концепции силовой схемы корпуса телескопа и директивной технологии его изготовления. Для выбора рационального варианта конструкции и технологических приёмов изготовления корпуса с учётом разнородных требований к изделию применён метод парных сравнений. Приведены оригинальные технические решения, подтверждённые патентами: корпус телескопа в виде оболочки с наружным набором подкрепляющих рёбер и технология её формования с использованием эластичных формующих элементов. Показаны примеры корпусных конструкций из композиционных материалов, спроектированных и изготовленных с использованием представленных методов. Эффективность применённых методов при проектировании композитных конструкций в условиях действия комплекса разнородных требований к изделию подтверждена параметрами изготовленных изделий.

Ключевые слова: космические телескопы, терморазмеростабильность, композиты, метод парных сравнений, углепластики, проектирование, технология.

Цитирование: Жидкова, О.Г. Применение метода парных сравнений при проектировании композитных корпусов космических телескопов /О.Г. Жидкова // Онтология проектирования. – 2019. – Т.9, №4(34). – С.536-548. – DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-536-548.

Введение

На сегодняшний день освоение и использование космического пространства является одним из фундаментальных направлений развития науки и техники. Среди проблем, решаемых при освоении космического пространства, – космическая и наземная связь, энергетика, радиоастрономия, исследования космических и наземных объектов. Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) позволяет решать многоцелевые задачи и является приоритетным направлением космической деятельности Российской Федерации [1]. Повышение качества дистанционного зондирования Земли и освоения космического пространства определяется новыми техническими решениями в области создания оптико-электронных систем и комплексов.

Проектирование космических аппаратов (КА) в настоящее время развивается в нескольких направлениях, в частности разрабатываются как малые КА и их группировки, так и космические оптико-электронные комплексы для размещения крупногабаритной аппаратуры.

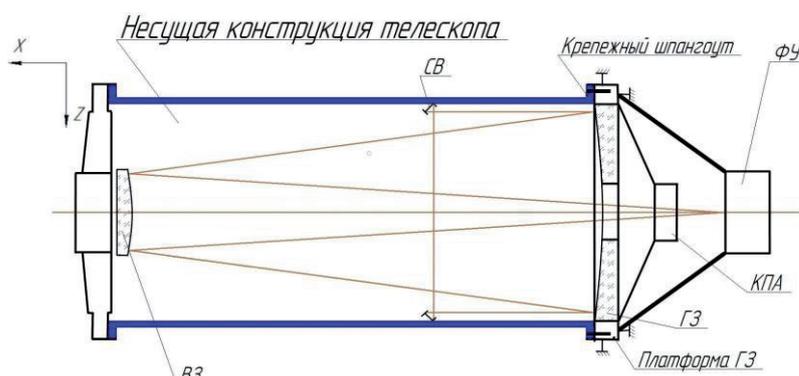
Малые КА позволяют оперативно решать отдельные задачи в области ДЗЗ и космических исследований, отрабатывать новые технологии, а также активно используются в образовательном сегменте. Для исследований объектов в космосе и на Земле в ряде стран (Россия, США, Канада, Япония, страны Европейского космического агентства) разрабатываются крупноразмерные космические телескопы, позволяющие решать задачи ДЗЗ с высокой разрешающей способностью средств наблюдения [2-4]. При этом рост абсолютных размеров телескопов требует новых технических решений [5].

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) имеют большие перспективы при применении в крупногабаритных несущих конструкциях по ряду преимуществ перед металлами (низкий коэффициент линейного термического расширения - КЛТР, высокие удельные жёсткость и прочность). Наиболее перспективным композиционным материалом для крупноразмерных конструкций, в том числе космического назначения, представляется слоистый углепластик квазиизотропной структуры армирования с КЛТР порядка $1 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$, что позволяет создать изделия со свойством терморазмеростабильности [6]. Единичное производство крупноразмерных корпусов космических телескопов требует разработки новых методик проектирования и технологий изготовления.

В статье отражён опыт решения подобных задач на этапах выбора концептуальных решений по конструкции корпуса и технологии его изготовления с использованием методов системного анализа. В качестве объекта проектирования рассматривается космический телескоп, оптическая система которого построена по схеме Ричи-Кретьена [7] (рисунок 1).

Данная оптическая схема технологична и хорошо отработана в конструкциях космических телескопов, применяется в системах ДЗЗ высокого разрешения. Цилиндрический корпус телескопа предназначен для установки и фиксации на строго заданных расстояниях главного и вторичного зеркал оптической системы.

Для примера выбран телескоп с длиной цилиндрической несущей части 3000 мм и диаметром объектива 1350 мм, что соответствует некоторым опубликованным проектам [2].



ГЗ – главное зеркало, ВЗ – вторичное зеркало,
ФУ – фокальный узел, КПА – корректор полевых aberrаций,
СВ – световозвращатель

Рисунок 1 – Оптическая схема телескопа
и схема его закрепления в конструкции КА

1 Постановка задачи проектирования корпусной композитной конструкции

Задача проектирования конструкции ставится на основе требований, предъявляемых к ней, и начинается с анализа геометрических ограничений на внешнюю форму и внутреннее пространство корпуса телескопа. Эти ограничения регламентируются заказчиком в техническом задании, которое также нормирует и основные технические характеристики проектируемой конструкции.

Одной из наиболее трудных задач, рассматриваемых на начальной стадии разработки несущей конструкции, является разрешение противоречия между требованиями, диктуемыми оптической схемой оптико-электронного комплекса (ОЭК) в виде заданных габаритных размеров, и обеспечением жёсткости и прочности конструкции при минимальной массе.

Корпусная конструкция должна обеспечивать сохранность пространственных линейных и угловых положений элементов оптической системы ОЭК, достигнутых в результате наземной юстировки, для обеспечения необходимого качества изображения. В условиях штатной эксплуатации максимальные значения допустимых отклонений пространственных линейных и угловых параметров посадочных площадок под элементы оптической системы не должны превышать 30 мкм и 20" соответственно. В оптической схеме телескопа вторичное зеркало (ВЗ) находится на расстоянии около трёх метров от главного зеркала (ГЗ), что приводит к необходимости обеспечения заданного положения ВЗ в процессе работы телескопа в ориентированном полёте в диапазоне перепада температур $\Delta T = \pm 5$ К. Конструкция корпуса должна обеспечивать первую собственную частоту колебаний вместе с оптическими узлами не ниже 40 Гц. На цилиндрической части несущей конструкции в зоне стыковки с платформой ГЗ должны быть предусмотрены люки диаметром не менее 300 мм для обеспечения доступа к рабочей поверхности ГЗ на любом этапе наземной эксплуатации до момента установки ОЭК на изделие. Конструкция должна также обладать достаточной прочностью на различных этапах жизненного цикла.

Проектная задача создания размеростабильной несущей конструкции ОЭК формулируется следующим образом: *необходимо спроектировать конструкцию минимальной массы, которая обеспечивает требования по жёсткости в форме ограничений на взаимные линейные смещения и развороты ГЗ и ВЗ и минимальную низшую собственную частоту колебаний, и удовлетворяет требованиям по прочности на всех этапах жизненного цикла.*

В стандартной форме в терминах нелинейного математического программирования [8] данная задача может быть записана следующим образом.

Необходимо найти вектор X^* , при котором

$$f(X^*) \leq f(X) \forall X \in \Omega,$$

где $\Omega = \{X: g_j(X) \leq 0, j = 1, 2, \dots, m\}$ – множество (область) допустимых проектов;

X – вектор проектных переменных;

$f(X)$ – целевая функция;

$g_j(X)$ – ограничения;

j – номер ограничения.

Целевая функция данной проектной задачи – минимум массы. Ограничения накладываются на жёсткость, прочность и низшую собственную частоту. В качестве проектных переменных выступают структурные характеристики конструкции и её материала (параметры каркаса корпуса и параметры внутренней структуры композита).

Требуется выбрать параметры конструкции, определяющие форму и размещение отдельных силовых элементов, а также геометрические характеристики элементов (толщины оболочки, рёбер и пр.). Кроме этого, при проектировании конструкций из слоистых ПКМ необходимо учитывать ряд требований из механики композитов и подходов, выработанных практикой [9]:

- структура тонкостенного композита должна быть симметричной относительно срединной поверхности;
- при выкладке пакета КМ слои должны чередоваться в соответствии со схемой армирования;
- толщины элементов конструкции могут изменяться только дискретно с учётом толщины монослоя и схемы укладки композита.

Одновременно с выбором конструктивной схемы решается задача выбора технологических приёмов, позволяющих изготовить конструкцию с требуемым набором элементов и функциональных деталей для крепления приборов. С учётом опыта разработчиков и производителей композитных конструкций подобного назначения проведена декомпозиция про-

ектной задачи на подзадачи, позволяющая осуществить поиск рациональных решений на каждом из следующих этапов:

- I. выбор конструкционного материала;
- II. выбор концепции конструкции;
- III. назначение рациональных размеров элементов, направленное на снижение массы;
- IV. выбор базовой технологии изготовления проектируемой конструкции;
- V. проектирование технологического процесса.

Каждый из этапов проектирования композитной конструкции корпуса телескопа имеет свои особенности. На I этапе задача выбора материала осложняется требованием сохранения размеров корпуса в условиях космического пространства и, как следствие, минимизации КЛТР. Ограниченный спектр композиционных материалов и возможность определения их достоверных характеристик после изготовления конструкции делает необходимым использование теоретико-экспериментального подхода к выбору конструкционного материала. На III этапе процесс выбора и назначения рационального распределения материала и геометрических размеров элементов конструкции в современных условиях проектирования осуществляется на базе математического моделирования. На V этапе при проектировании эффективного технологического комплекса в силу его сложности и многофакторности в процедуре подбора параметров технологического процесса решающую роль играет эксперимент.

Структурные решения на этапах II и IV являются прерогативой творческой (часто интуитивной) деятельности проектантов–конструкторов и аналитиков [10], при этом особую важность имеет результат выбора варианта структуры, так как неудачный выбор может потребовать пересмотра всего проекта в целом. Каждое из принимаемых структурных решений имеет свои достоинства и недостатки. Как правило, их трудно выразить количественно, но можно оценить экспертными методами на качественном уровне. Для решения трудноформализуемых проектных задач выбора принципиальной конструктивной схемы и технологических приёмов изготовления конструкции (этапы II и IV проектной задачи) могут быть применены методы системного анализа, в частности метод парных сравнений.

2 Применение метода парных сравнений

Проблема выбора является одной из задач системного анализа. Для решения задач выбора разработан ряд методов экспертных оценок, в том числе методы ранжирования, парных сравнений, множественных сравнений, а также методы непосредственной численной оценки, метод Терстоуна, Дж. фон Неймана и О. Моргенштерна и другие [11].

Широко используется метод парных сравнений, применяемый для оценки слабо детерминированных систем на качественном уровне. Существует несколько вариантов этого метода. Классическим вариантом метода является разработанный в 1970 году Томасом Саати метод анализа иерархий, основанный на сравнении альтернативных вариантов, выполняемом экспертом [12]. Для каждой пары вариантов эксперт выбирает степень предпочтительности и заполняет матрицу парных сравнений по выбранным правилам.

В рассматриваемой задаче принятия структурных решений имеет место ситуация, когда в отношении двух вариантов, например i и j , можно сказать, что по определённому критерию i более предпочтителен, чем j ($i > j$) или наоборот ($i < j$), а также ситуация, когда варианты по выбранному критерию равноценны ($i \approx j$). Принято присваивать этим оценкам следующие числовые значения:

$$x_{ij} = \begin{cases} 2, & \text{если } i > j; \\ 1, & \text{если } i \approx j; \\ 0, & \text{если } i < j. \end{cases}$$

Далее составляется таблица (матрица измерений) парных сравнений. На диагонали матрицы результатов парных сравнений всегда расположены единицы (вариант эквивалентен самому себе):

$$x_{ii} = 1.$$

Рейтинг каждого варианта рассчитывается как сумма строк матрицы сравнений:

$$r_i = \sum_{j=1}^n x_{ij}.$$

В общем случае возможно проведение парного анализа в отношении критериев сравнения с последующей нормировкой матрицы парных сравнений и вычислением весовых коэффициентов критериев (вектора весов критериев) с формированием решения о степени важности того или иного критерия [13, 14].

Ранг вариантов исполнения определяется по сумме элементов (суммарный рейтинг по критериям) соответствующей строки: наиболее предпочтительному варианту с наибольшим суммарным рейтингом присваивается ранг, равный единице, второму по предпочтительности – ранг, равный двум и так далее.

3 Выбор концепции конструкции

На начальных этапах проектирования конструкций из полимерных композитов важнейшим этапом является выбор концептуального решения по силовой схеме [15]. Проектная практика предлагает целый ряд технических решений: простая оболочка; оболочка, подкреплённая каркасом (шпангоуты и стрингеры внутри по типу авиационных конструкций); трёхслойная оболочка; стержневая (ферменная) конструкция; конструкция, состоящая из оболочки с каркасом, расположенным снаружи (рисунок 2).

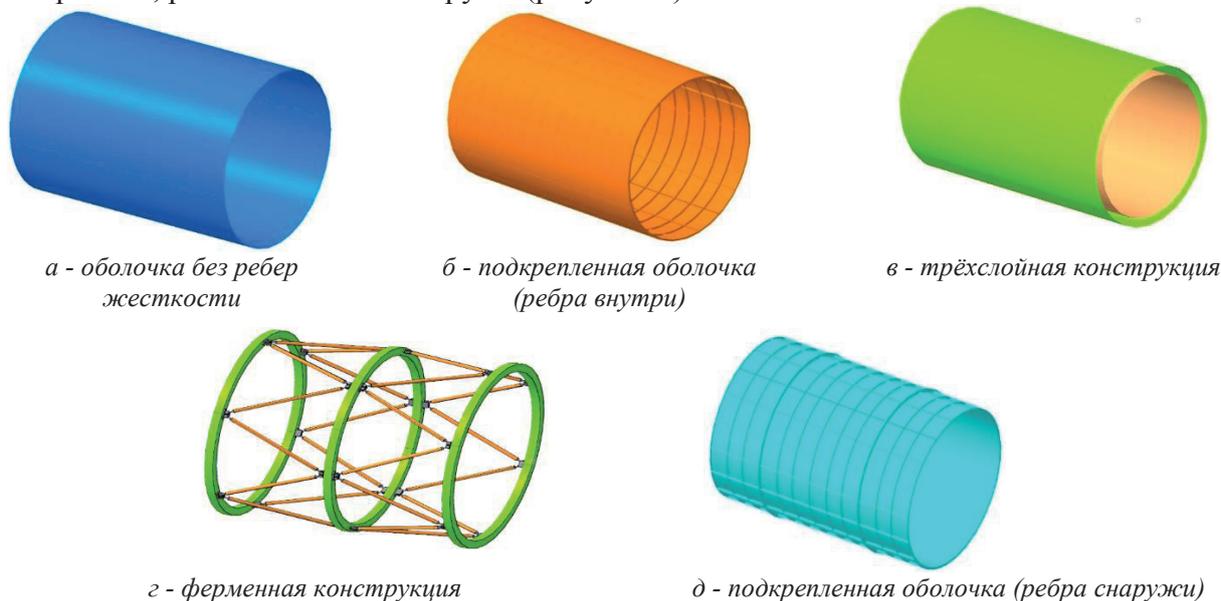


Рисунок 2– Варианты конструктивного исполнения корпусной конструкции

Для выбора типа силовой схемы корпусной конструкции космического телескопа применён метод парных сравнений (см. раздел 2). В качестве критериев для сравнения рассмотрены:

- критерий А – обеспечение возможности размещения элементов оптической системы телескопа внутри конструкции;
- критерий В – обеспечение возможности крепления навешиваемого оборудования на корпусной конструкции телескопа, а также крепления самой конструкции к ответной части;
- критерий С – обеспечение возможности доступа к оборудованию внутри корпусной конструкции с целью его настройки и обслуживания.

Результаты парного анализа возможных вариантов исполнения корпусной конструкции по критериям А, В и С сведены в матрицы парных сравнений (таблицы 1-3) и рассчитан рейтинг каждого варианта конструктивного исполнения.

Таблица 1 – Результаты парного анализа вариантов исполнения корпусной конструкции по критерию А

| Вариант исполнения | Трёхслойная конструкция | Подкреплённая оболочка (рёбра внутри) | Подкреплённая оболочка (рёбра снаружи) | Оболочка без рёбер жёсткости | Ферменная конструкция | Рейтинг |
|--|-------------------------|---------------------------------------|--|------------------------------|-----------------------|---------|
| Трёхслойная конструкция | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 6 |
| Подкреплённая оболочка (рёбра внутри) | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 2 |
| Подкреплённая оболочка (рёбра снаружи) | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 7 |
| Оболочка без рёбер жёсткости | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 6 |
| Ферменная конструкция | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 4 |

Таблица 2 – Результаты парного анализа вариантов исполнения корпусной конструкции по критерию В

| Вариант исполнения | Трёхслойная конструкция | Подкреплённая оболочка (рёбра внутри) | Подкреплённая оболочка (рёбра снаружи) | Оболочка без рёбер жёсткости | Ферменная конструкция | Рейтинг |
|--|-------------------------|---------------------------------------|--|------------------------------|-----------------------|---------|
| Трёхслойная конструкция | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 6 |
| Подкреплённая оболочка (рёбра внутри) | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 7 |
| Подкреплённая оболочка (рёбра снаружи) | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 | 7 |
| Оболочка без рёбер жёсткости | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 |
| Ферменная конструкция | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 3 |

Наиболее предпочтительным вариантом конструкции корпуса является вариант с более высоким рейтингом. При проведении парного анализа возможно нахождение среднего арифметического строк матрицы парных сравнений и вычисление весовых коэффициентов альтернативных вариантов, характеризующих предпочтительность каждого варианта.

Наивысший ранг имеет вариант исполнения корпуса в виде подкреплённой оболочки с рёбрами наружу. На выбор данного варианта в парном анализе оказала влияние относительная технологическая простота изготовления и возможность реализации квазиизотропной схемы армирования композита. Элементы этого решения вошли в состав патента [16].

Таблица 3 – Результаты парного анализа вариантов исполнения корпусной конструкции по критерию С

| Вариант исполнения | Трёхслойная конструкция | Подкреплённая оболочка (рёбра внутри) | Подкреплённая оболочка (рёбра снаружи) | Оболочка без рёбер жёсткости | Ферменная конструкция | Рейтинг |
|--|-------------------------|---------------------------------------|--|------------------------------|-----------------------|---------|
| Трёхслойная конструкция | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 4 |
| Подкреплённая оболочка (рёбра внутри) | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 6 |
| Подкреплённая оболочка (рёбра снаружи) | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 6 |
| Оболочка без рёбер жёсткости | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 2 |
| Ферменная конструкция | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 7 |

Результаты ранжирования вариантов конструктивного исполнения по критериям А, В, С сведены в итоговую таблицу 4.

Таблица 4 – Ранжирование вариантов конструктивного исполнения корпусной несущей конструкции

| Вариант исполнения | Рейтинг по критериям | | | Суммарный рейтинг | Ранг |
|--|----------------------|---|---|-------------------|------|
| | А | В | С | | |
| Трёхслойная конструкция | 6 | 6 | 4 | 16 | 2 |
| Подкреплённая оболочка (рёбра внутри) | 2 | 7 | 6 | 15 | 3 |
| Подкреплённая оболочка (рёбра снаружи) | 7 | 7 | 6 | 20 | 1 |
| Оболочка без рёбер жёсткости | 6 | 2 | 2 | 10 | 5 |
| Ферменная конструкция | 4 | 3 | 7 | 14 | 4 |

Выбор наружного оребрения крупногабаритной корпусной конструкции является обоснованным и в связи с тем, что конструкция корпуса, находясь на различных этапах эксплуатации в сложном напряженно-деформированном состоянии, нагружена значительными осевыми сжимающими усилиями. При таком нагружении потеря устойчивости подкреплённой оболочки сопровождается образованием выпучин квадратной формы и внешнее расположение рёбер является более эффективным с точки зрения верхних значений критической нагрузки [17]: критическая осевая нагрузка для эксцентрично подкреплённых оболочек с наружным расположением продольных рёбер (стрингеров) может в два раза превышать таковую при внутреннем оребрении [18].

Выбранная концепция конструкции с наружным каркасом фактически порождает дискретное пространство структурных проектных переменных – число рёбер в окружном направлении и число рёбер по образующей (шпангоутов и стрингеров соответственно). Некоторые возможные варианты каркаса показаны на рисунке 3.

На основе анализа силовой работы «клетки» тонкой оболочки, ограниченной шпангоутами и стрингерами, для дальнейшей проработки выбран вариант 3 на рисунке 3.

Результаты выбора силовой схемы конструкции на этапе II передаются на этап III, в котором для назначения размеров элементов в качестве проектных переменных могут использоваться толщины оболочки и рёбер. Эта задача параметрической оптимизации осложняется дискретностью толщин элементов конструкции вследствие применения квазиизотропной схемы армирования полимерного композиционного материала.

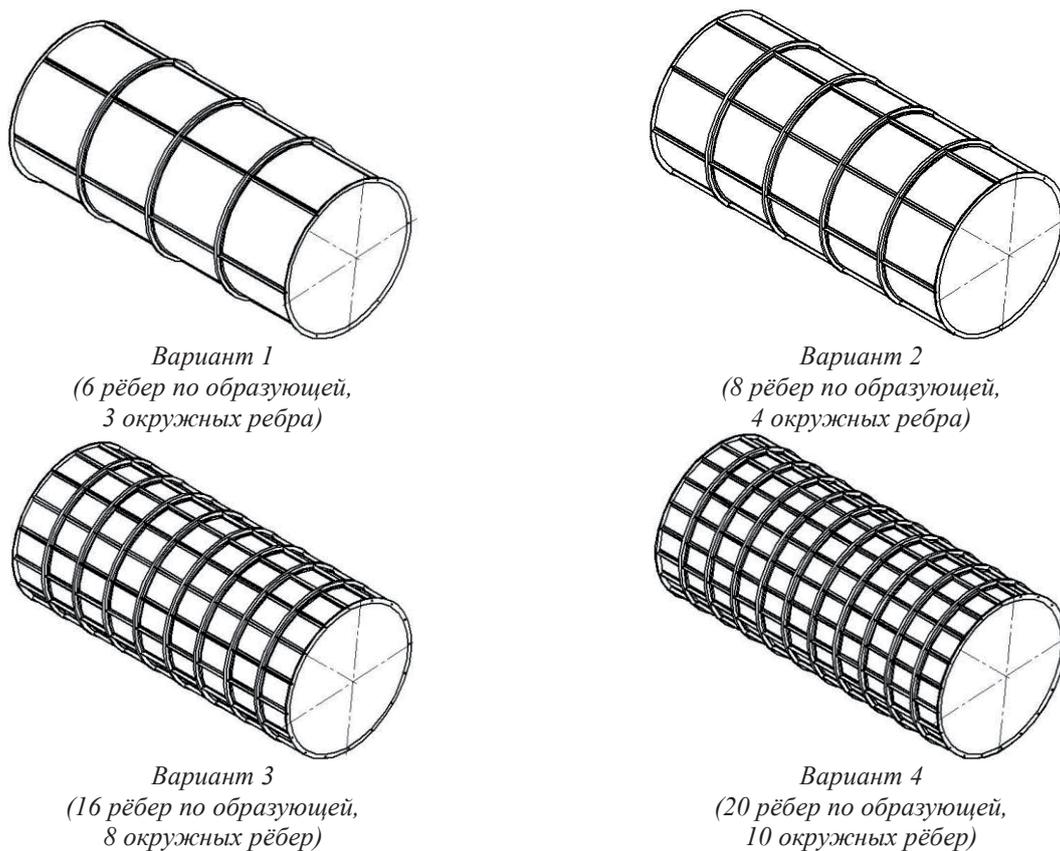


Рисунок 3– Варианты силовой схемы корпусной конструкции

Дальнейшая разработка конструкции проводится с использованием парадигмы *точного проектирования* [19, 20], суть которой состоит в использовании моделей высокого уровня на ранних стадиях проектирования. В таком подходе формируется проектная среда, позволяющая исключить грубые ошибки и трудоёмкие доработки.

4 Выбор технологического процесса

Выбор технологии изготовления композитных изделий является многофакторным процессом и зависит от конструкции изделия, условий его эксплуатации, объёма изготавливаемых изделий, а также производственных ресурсов предприятия [21]. Конструкции из ПКМ в виде подкреплённых оболочек вращения могут быть изготовлены с использованием ряда технологий. В их числе наиболее простое по аппаратному обеспечению является контактное формование: вакуумное формование, автоклавное формование, безавтоклавный метод инъекции смолы в закрытую форму *Resin Transfer Moulding (RTM)*, метод намотки, комбинированный метод термокомпрессионного и автоклавно-вакуумного формования.

Для выбора технологии изготовления конструкции использован метод парных сравнений. Технологии сравниваются и оцениваются с позиций применимости при изготовлении крупногабаритной цилиндрической несущей композитной конструкции космического телескопа в виде оболочки с наружным оребрением.

Контактное формование, основным преимуществом которого является простота и невысокая стоимость оснастки, не всегда позволяет получить изделия со стабильными физико-механическими характеристиками.

Вакуумное формование – метод, который позволяет получить более высокое качество изделий, чем при контактном формовании, и широко применяется при изготовлении стеклопластиковых изделий и трёхслойных конструкций. Однако применение данного метода при изготовлении подкреплённых конструкций не гарантирует необходимых свойств композита, особенно в силовых рёбрах, в связи с возможным появлением пустот в композите и, как следствие, высокой пористости материала.

Автоклавное и вакуумно-автоклавное формование хорошо зарекомендовали себя при изготовлении силовых высоконагруженных конструкций из ПКМ. Однако, при изготовлении оболочечных конструкций с системой подкрепляющих рёбер использование автоклавного формования не позволяет обеспечить равномерное распределение давления на поверхности оболочки и подкрепляющих рёбер, что может сказаться на качестве конструкции в целом.

Метод намотки пропитанного препрега на форму (оправку) применяется при изготовлении тел вращения. При создании цилиндрической несущей конструкции возможно применение данного метода для изготовления оболочки. Рёбра подкрепления должны быть изготовлены другим методом и установлены на оболочку через клеевой слой (возможно с дополнительной механической фиксацией). Многостадийность данного процесса влечёт за собой дополнительные технологические сложности и погрешности изготовленного изделия.

Метод инъекции смолы в закрытую форму с уложенным сухим наполнителем (трансферное формование по технологии RTM) может быть применён для изготовления подкреплённых оболочечных конструкций. Применение данного метода требует использования специальных связующих с низкой вязкостью и значительных финансовых затрат в связи со стоимостью инъекционного оборудования и необходимостью использования двухсторонней оснастки (матрица и пуансон) для изготовления подкреплённой оболочечной конструкции, а также не позволяет изготовить крупногабаритные конструкции.

Вакуумно-автоклавный метод в комбинации с термокомпрессионным формованием используется для изготовления силовых конструкций. Вакуумно-автоклавное формование в сочетании с термокомпрессионным формованием имеет пооперационно-раздельную структуру, что позволяет одновременно выполнять различные операции (например, выкладка препрегов, сборка элементов на форме и пр.) в разных производственных помещениях и использовать для этого универсальное оборудование, а также гибкую структуру технологического процесса, позволяющую корректировать свойства ПКМ без изменения технологической оснастки. Основное преимущество данного метода – одностадийность изготовления подкреплённой конструкции, в результате чего сокращаются временные затраты на сборку и уменьшается себестоимость изделий.

Методом парных сравнений рассмотренных технологий изготовления несущей конструкции телескопа получена матрица ранжирования (таблица 5).

Результаты ранжирования технологий изготовления композитных конструкций показывают преимущество комбинированного вакуумно-автоклавного метода в сочетании с термокомпрессионным формованием. Данный метод формования с оборудованием для изготовления конструкций, комплектом эластичных формующих элементов (ЭФЭ), а также оборудованием для изготовления ЭФЭ и специальной оснастки для формования в практической реализации составляют единый технологический комплекс. Он легко адаптируется к опытному производству и позволяет изготавливать широкий спектр композитных изделий, в том числе особо ответственных размеростабильных корпусных конструкций. Результаты применения данного комплекса нашли отражение при изготовлении конструкций [22, 23].

Результаты выбора технологического процесса позволяют перейти к этапу определения его параметров (этап V в разделе 2).

Таблица 5 – Результаты парных сравнений технологий изготовления конструкции корпуса телескопа

| Технология изготовления изделий из ПКМ | Контактное формование | Вакуумное формование | Автоклавное формование | Вакуумно-автоклавное формование в сочетании с термокомпрессионным формованием | Намотка | RTM | Рейтинг | Ранг |
|---|-----------------------|----------------------|------------------------|---|---------|-----|---------|------|
| Контактное формование | 1 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 4 | 4 |
| Вакуумное формование | 2 | 1 | 0 | 0 | 2 | 2 | 7 | 3 |
| Автоклавное формование | 2 | 2 | 1 | 0 | 2 | 1 | 8 | 2 |
| Вакуумно-автоклавное формование в сочетании с термокомпрессионным формованием | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 10 | 1 |
| Намотка | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 2 | 6 |
| RTM | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 3 | 5 |

Заключение

Структурные решения, принятые на начальных этапах проектирования с использованием системного анализа, далее совместно с методами параметрического анализа и цифровым проектированием, позволили сконструировать и успешно изготовить ряд ответственных терморазмеростабильных изделий из композиционных материалов. Примерами таких изделий являются корпусные части ОЭК высокого разрешения (рисунок 4), разработанные и изготовленные специалистами ООО «СКТБ «Пластик» в кооперации с АО РКЦ «Прогресс» с применением технологических приёмов комбинированного вакуумно-автоклавного метода изготовления композитных конструкций в сочетании с термокомпрессионным формованием.



а

б

Рисунок 4 – Размеростабильные цилиндрическая (а) и коническая (б) несущие корпусные конструкции космического телескопа оптико-электронного комплекса высокого разрешения

Данные конструкции прошли комплексные испытания и удовлетворяют предъявляемым требованиям.

Благодарности

Автор выражает признательность и благодарность за помощь в подготовке публикации профессору Самарского университета, д.т.н. Комарову Валерию Андреевичу.

Список источников

- [1] Федеральная космическая программа России на 2016 – 2025 годы, утвержденная постановлением Правительства РФ от 23 марта 2016 г. № 230.- <https://www.goscosmos.ru/22347/>.
- [2] **Кириченко, Д.В.** Крупногабаритные оптические космические телескопы / Кириченко Д.В., Клейменов В.В., Новикова Е.В. // Известия вузов. Приборостроение. – 2017. – Т. 60, №7. – С.589-602.
- [3] **Ефанов, В.В.** Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований / В.В. Ефанов, И.Л. Шевалев; Под. ред. В.В. Ефанова, К.М. Пичхадзе: В 2-х т. Т. 1 – М.: Издательство МАИ, 2012. – 526 с.
- [4] **Потюпкин, А.Ю.** Кластеры малоразмерных космических аппаратов как новый тип космических объектов / А.Ю. Потюпкин, Н.С. Данилин, А.С. Селиванов // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. – 2017. – Том 4, выпуск 4. – С.45-56.
- [5] **Комаров, В.А.** Учёт масштабного фактора при проектировании крупногабаритных размеростабильных конструкций космических аппаратов / В.А. Комаров, О.Г. Жидкова // Полет. – 2019. – № 6. – С.16-22.
- [6] **Биткин, В.Е.** Выбор материалов для изготовления размеростабильных несущих конструкций / В.Е. Биткин, О.Г. Жидкова, В.А. Комаров // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. – 2018. – Т. 17, № 1. – С.100-117.
- [7] **Мартынов, Д.Я.** Курс практической астрофизики / Д.Я. Мартынов. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1977. – 544 с.
- [8] **Есипов, Б.А.** Методы оптимизации и исследование операций / Б.А. Есипов. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 180 с.
- [9] **Васильев, В.В.** Проектирование конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов. В кн.: Теоретические основы авиа- и ракетостроения. – М.: Дрофа, 2005. – 484 с.; С.625-669.
- [10] **Вейсхаар, Т.А.** Человеческий фактор в проектировании авиационных конструкций / Т.А. Вейсхаар, В.А. Комаров // Полет. – 1998. № 1. - С.17-23.
- [11] **Ларичев, О.И.** Качественные методы принятия решений. Вербальный анализ решений / О.И. Ларичев, Е.М. Мошкович. – М.: Наука. Физматлит, 1996. – 208 с.
- [12] **Саати Т.** Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.
- [13] **Пиявский, С.А.** Формулы для вычисления универсальных коэффициентов при принятии многокритериальных решений / С.А. Пиявский // Онтология проектирования. – 2019. – Т. 9, №2(32). - С.282-298. – DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-2-282-298.
- [14] **Пиявский, С.А.** Как «нумеризовать» понятие «важнее» / С.А. Пиявский // Онтология проектирования. – 2016. – Т.6, №4(22). – С.414-435. – DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-4-414-435.
- [15] **Комаров, В.А.** Проектирование силовых схем авиационных конструкций //Актуальные проблемы авиационной науки и техники. - М.: Машиностроение, 1984. – С.114-129.
- [16] Патент 2486101RU, МПК, В64С, В64G, В64В. Подкрепленная оболочка вращения из полимерных композиционных материалов / О.В. Биткина, А.В. Денисов, А.М. Митюшкин, С.А. Еремин, А.В. Родионов, Н.М. Мелехина, Д.В. Митюшкина, О.Г.Жидкова, С.А. Гордеев. Патентообладатель: ОАО «Пластик». Заявлено 24.08.2011; опубликовано 27.06.2013 // Бюл. № 18.
- [17] **Вольмир, А.С.** Устойчивость деформируемых систем / А.С. Вольмир. – М: Наука, 1967. – 984 с.
- [18] **Кан, С.Н.** Устойчивость оболочек. / С.Н. Кан. – Харьков: Изд-во Харьковского университета, 1970. – 156 с.
- [19] **Комаров, В.А.** Точное проектирование / В.А. Комаров // Онтология проектирования. – 2012. № 3. – С.8-23.
- [20] **Komarov, V.A.** New Approach to Improving the Aircraft Structural Design Process / V.A. Komarov // Journal of Aircraft. – 2002. – Volume 39, Number 2. – P.227-233.
- [21] **Биткин, В.Е.** Технологический комплекс для изготовления силовых и высокоточных размеростабильных элементов конструкций интегрального типа из волоконистых композиционных материалов / В.Е. Биткин, А.В. Денисов, О.Г. Жидкова, О.В. Биткина // Конструкции из композиционных материалов. – 2014. – № 1. – С.18-23.
- [22] Патент 2483927RU, МПК, В32В, F02К. Адаптер в виде подкрепленной оболочки вращения конической формы из полимерных композиционных материалов / В.Е. Биткин, О.В. Биткина, А.В. Денисов, А.М. Митюшкин, С.А. Еремин, А.А. Воронин О.Г., Жидкова, О.Н. Сухих, Д.А. Солдатов, Н.М. Мелехина. Патентообладатель: ОАО «Пластик». Заявлено 27.05.2011; опубликовано 10.06.2013 // Бюл. № 16.

- [23] Патент 2674205RU, МПК, В32В, В29С. Конструкция размеростабильной платформы из слоистого полимерного композиционного материала / В.Е. Биткин, А.В. Денисов, В.В. Агапов, В.Г. Чертов, О.Г. Жидкова, В.Е. Назаров, М.А. Денисова. Патентообладатель: ООО «Специальное Конструкторско-технологическое бюро «Пластик». Заявлено 09.01.2018; опубликовано 05.12.2018 // Бюл. № 34.

APPLICATION OF THE PAIRWISE COMPARISON METHOD IN THE DESIGNING OF COMPOSITE FRAMEWORK OF SPACE TELESCOPES

O.G. Zhidkova

*LLC Special Development and Technology Bureau «Plastik», Syzran, Russia
ol_zhidkova@yahoo.com*

Abstract

The problem of designing precision large-sized composite framework constructions is considered in the article. The prospects of using composite materials in large-sized supporting constructions of space telescopes are noted. The design task of creating a cylindrical construction of the telescope body of the optoelectronic complex is formulated at the verbal level and in standard form in terms of non-linear mathematical programming. The decomposition of the problem into a number of structural and parametric subtasks is proposed. The ways of solving the difficultly formalized problems of choosing structural solutions are discussed using the example of a composite framework construction of a space telescope. The choice of the concept of the framework telescope power scheme and the directive technology for its manufacture is considered in detail. To make a choice of design options and manufacturing techniques for designing the case, the method of pairwise comparisons from the system analysis was applied, taking into account the heterogeneous requirements for the product. New technical solutions are given: a shell with an external set of reinforcing ribs and the technology of its molding using elastic forming elements, confirmed by patents. Examples of framework structures from composite materials designed and manufactured using the presented methods are shown. The effectiveness of the applied methods in the design of composite framework in conditions of product requirements validity is confirmed by the parameters of the manufactured products.

Key words: *space telescopes, thermal stability, composites, method of pairwise comparisons, carbon-reinforced plastics, designing, technology.*

Citation: *Zhidkova O.G. Application of the pairwise comparison method in the designing of composite framework of space telescopes [In Russian]. *Ontology of designing*. 2019; 9(4): 536-548. – DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-4-536-548.*

References

- [1] The Federal Space Program of Russia for 2016 - 2025, approved by Decree of the Government of the Russian Federation of March 23, 2016 No. 230. - <https://www.roscosmos.ru/22347>.
- [2] **Kirichenko DV, Kleimenov VV, Novikova EV.** Large-sized optical space telescopes [In Russian]. *News of universities. Instrument making*. – 2017; 60(7): 589-602.
- [3] **Efanov VV, Shevalyov IL.** Design of automatic spacecraft for basic scientific research [In Russian]. Ed. V.V. Efanova, K.M. Pichkhadze: In 2 vols. Vol. 1. - M.: MAI Publishing House, 2012. - 526 p.
- [4] **Potyupkin AU, Danilin NS, Selivanov AS.** Clusters of small-sized spacecraft as a new type of space objects [In Russian]. *Rocket and space instrument engineering and information systems*. – 2017; 4(4): 45-56.
- [5] **Komarov VA, Zhidkova OG.** Consideration of a large-scale factor in the design of large-sized dimensionally stable structures of spacecraft [In Russian]. *Russian scientific and technical journal "Flight"*. – 2019; 6: 16-22.
- [6] **Bitkin VE, Zhidkova OG, Komarov VA.** The choice of materials for the manufacture of dimensionally stable load-bearing structures [In Russian]. *Bulletin of Samara University. Aerospace engineering, technology and engineering*. – 2018; 17(1): 100-117.

- [7] **Martynov DYa.** Practical Astrophysics Course [In Russian]. - M.: Science. The main edition of the physical and mathematical literature, 1977. - 544 p.
- [8] **Esipov BA.** Optimization methods and operations research [In Russian]. - Samara: Publishing house Samar. state aerospace. University, 2007.- 180 p.
- [9] **Vasiliev VV.** Design of aircraft structures made of composite materials [In Russian]. In: Theoretical Foundations of Aircraft and Rocket Engineering. - M.: Drofa, 2005. - 484 p.; P.625-669.
- [10] **Weishaar TA, Komarov VA.** The human factor in the design of aircraft structures [In Russian]. Russian scientific and technical journal "Flight". - 1998; 1: 17-23.
- [11] **Larichev OI, Moshkovich EM.** Qualitative decision-making methods. Verbal decision analysis [In Russian]. - M.: Science. Fizmatlit, 1996.- 208 p.
- [12] **Saati T.** Decision Making. Hierarchy Analysis Method [In Russian]. - M.: Radio and Communications, 1993. - 320 p.
- [13] **Piyavsky SA.** Forms for calculation of universal coefficients when adopting multiple critical decisions [In Russian]. *Ontology of designing*. 2019; 9(2): 282-298. - DOI: 10.18287/2223-9537-2019-9-2-282-298.
- [14] **Piyavsky SA.** How do we digitize the concept of «more important» [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2016; 6(4): 414-435. - DOI: 10.18287/2223-9537-2016-6-4-414-435.
- [15] **Komarov VA.** Design of power circuits of aircraft structures [In Russian]. Actual problems of aviation science and technology. - M.: Mechanical Engineering, 1984. - P.114-129.
- [16] Patent 2486101RU, IPC, B64C, B64G, B64B. The reinforced shell of rotation from polymer composite materials [In Russian]. O.V. Bitkina, A.V. Denisov A.M. Mityushkin, S.A. Eremin, A.V. Rodionov, N.M. Melekhina, D.V. Mityushkina, O.G. Zhidkova, S.A. Gordeev. Patent holder: Open Joint-Stock Company Plastic. Stated August 24, 2011; published on June 27, 2013 // Bull. Number 18.
- [17] **Volmir AS.** Stability of deformable systems [In Russian]. - M: Nauka, 1967. - 984 p.
- [18] **Kahn SN.** Shell stability [In Russian]. - Kharkov: Kharkov University Press, 1970. - 156 p.
- [19] **Komarov VA.** Concurrent design [In Russian]. *Ontology of Designing*. 2012; 3: 8-23.
- [20] **Komarov VA.** New Approach to Improving the Aircraft Structural Design Process / Journal of Aircraft. - 2002; 39(2): 227-233.
- [21] **Bitkin VE, Denisov AV, Zhidkova OG, Bitkin OV.** Technological complex for the manufacture of power and high-precision dimensionally stable structural elements of the integral type of fiber composite materials [In Russian]. *Designs from composite materials*. - 2014; 1: 18-23.
- [22] Patent 2483927RU, IPC, B32B, F02K. An adapter in the form of a reinforced shell of conical shape rotation made of polymer composite materials [In Russian]. V.E. Bitkin, O.V. Bitkina, A.V. Denisov, A.M. Mityushkin, S.A. Eremin, A.A. Voronin, O.G. Zhidkova, O.N. Sukhikh, D.A. Soldatov, N.M. Melekhin. Patent holder: Open Joint-Stock Company Plastic. Stated May 27, 2011; published 06/10/2013 // Bull. Number 16.
- [23] Patent 2674205RU, IPC, B32B, B29C. The design of a dimensionally stable platform from a layered polymeric composite material [In Russian]. V.E. Bitkin, A.V. Denisov, V.V. Agapov, V.G. Devil, O.G. Zhidkova, V.E. Nazarov, M.A. Denisova. Patent holder: Limited Liability Company "Special Design and Technology Bureau "Plastic". Stated January 9, 2018; published on December 5, 2018 // Bull. Number 34.
-

Сведения об авторе



Жидкова Ольга Геннадьевна, 1973 г. рождения. Окончила Самарский государственный университет в 1995 году. Заместитель генерального конструктора по научной работе ООО «СКТБ «Пластик». В списке научных трудов 8 работ в области создания размеростабильных конструкций из полимерных композиционных материалов, соавтор трёх патентов.

Olga Gennadevna Zhidkova (b. 1973) graduated from the Samara State University (Samara-city) in 1995. Olga currently is the Deputy General Designer of Science in LLC «SDTB «Plas-tik». She is the co-author of 8 scientific articles and abstracts in the field of dimensionally stable constructions from polymeric composite material, and co-author of 3 patents.