

Смердов Алексей Андреевич

**АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ И ОПТИМАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ  
МНОГОСЕКЦИОННЫХ СТЕРЖНЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ  
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-  
КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

Специальность 05.07.03 – «Прочность и тепловые режимы летательных  
аппаратов»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2020

Работа выполнена в ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королева».

Научный руководитель: **Зимин Владимир Николаевич**  
доктор технических наук, с.н.с

Официальные  
оппоненты: **Лопатин Александр Витальевич**  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой компьютерного  
моделирования Сибирского государственного  
университета науки и технологий имени  
академика М.Ф. Решетнева

Официальные  
оппоненты: **Архипов Михаил Юрьевич**  
кандидат технических наук, старший  
научный сотрудник Астрокосмического  
центра ФИАН им.П.Н. Лебедева

Ведущая организация: АО "Информационные спутниковые  
системы" имени академика М.Ф. Решетнева

Защита диссертации состоится «10» декабря 2020 года в 14:30 на заседании диссертационного совета Д 212.141.22, при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Госпитальный переулок, дом 10, факультет Специального машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана, аудитория. 407м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана <http://www.bmstu.ru>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 года.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская улица, дом 5, стр.1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.141.22.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.141.22,  
к.т.н., доцент



А.Ю. Луценко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Стержневые конструкции являются одним из основных типов конструктивно-силовых схем, используемых в ракетно-космической технике. Поэтому методам расчета напряженно-деформированного состояния и динамических характеристик таких конструкций, в том числе и с применением метода конечных элементов (МКЭ), посвящена обширная литература. При этом работ, посвященных анализу прочности и оптимальному проектированию многосекционных стержневых конструкций, состоящих из многослойных стержней, практически нет. Поэтому построение новых и уточнение уже существующих алгоритмов расчета характеристик оптимальных многосекционных стержневых композитных конструкций остается актуальной задачей, что также обусловлено возрастающими требованиями к космическим аппаратам различного назначения и к прочностным характеристикам и массовой эффективности таких аппаратов.

В связи с этим тема диссертационной работы, связанная с разработкой методики расчета прочностных и динамических характеристик многосекционных стержневых конструкций из композиционных материалов, является актуальной.

**Целью работы** является разработка методики расчета и анализа прочностных характеристик многосекционных композитных стержневых конструкций в обеспечение массовой эффективности, неразрушения и нормального функционирования изделий ракетно-космической техники.

Исходя из этого, в диссертации рассмотрены следующие задачи:

1. Разработка методики расчета, численных алгоритмов по обеспечению прочности многосекционных композитных стержневых конструкций различных конфигураций для изделий ракетно-космической техники под воздействием статических, динамических и термических нагрузок.

2. Исследование применения различных типов конечных элементов при моделировании статического и динамического нагружения многосекционных стержневых конструкций в рамках проведения проектных расчетов и обеспечения их несущей способности.

3. Разработка численного алгоритма определения предельных возможностей многосекционных стержневых конструкций, подвергающихся одностороннему нагреву, по критериям размеростабильности, динамических характеристик и массовой эффективности.

4. Разработка конструкции разборного соединительного узла для многосекционных стержневых конструкций из композиционных материалов по критериям прочности и весовой отдачи.

**Объектом исследования** являются многосекционные стержневые конструкции из композитных материалов для изделий ракетно-космической техники.

**Предметом исследования** являются методика анализа прочности и оптимального проектирования многосекционных стержневых конструкций из композитных материалов, а также конструкция разборного соединительного узла из композитных материалов.

**Научная новизна диссертационной работы:**

1. На основе разработанной методики впервые проведен прочностной анализ и оптимальное проектирование негерметичного отсека научно-энергетического модуля международной космической станции, конструкции крепления электрореактивной двигательной установки на транспортно-энергетическом модуле и конструкции крепления системы облучателей на крупногабаритном космическом рефлекторе, а также каркаса космической солнечной электростанции.

2. Впервые построены границы предельных возможностей размеростабильных конструкций, подвергающихся неравномерному температурному воздействию, с ограничением по продольным перемещениям и первой собственной частоте.

3. Разработана облегченная конструкция разборного композитного соединительного узла для улучшения весового совершенства многосекционных стержневых конструкций.

**Степень достоверности полученных научных положений, результатов и выводов, приведенных в диссертации,** обеспечивается строгим математическим обоснованием предлагаемых методов и подходов, сопоставлением с соответствующими экспериментальными данными, а также применением апробированного расчетного комплекса.

**Практическая значимость** работы определяется возможностью использования ее результатов при проектировании многосекционных стержневых конструкций из композитных материалов для изделий ракетно-космической техники.

**На защиту выносятся:**

1. Методика расчета и анализа прочности многосекционных композитных стержневых конструкций из композиционных материалов с использованием метода конечных элементов. Обоснование применения различных типов конечных элементов при разработке и создании многосекционных стержневых конструкций для изделий ракетно-космической техники.

2. Рекомендации по применению различных типов конечных элементов для проведения проектных расчетов и обеспечения несущей способности многосекционных стержневых конструкций космического аппарата при статическом, динамическом и температурном нагружении.

3. Алгоритм выбора рациональной схемы армирования многосекционной композитной размеростабильной стержневой конструкции космического аппарата, подвергающейся одностороннему нагреву.

4. Результаты расчета прочностных характеристик разрабатываемых и созданных систем: негерметичного отсека космического аппарата, крупногабаритной стержневой конструкции крепления двигательной установки на транспортно-энергетическом модуле, каркаса крупногабаритных солнечных батарей и размеростабильных конструкций, подвергающихся неравномерному температурному воздействию.

5. Облегченная конструкция разборного композитного соединительного узла стержневой конструкции космического аппарата.

**Внедрение результатов.** Результаты работы внедрены в НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана и могут быть рекомендованы для использования при оптимальном проектировании многосекционных стержневых конструкций.

**Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации.** Разработка методики, создание программно-алгоритмического обеспечения расчётов, проведение проектных расчётов многосекционных стержневых конструкций, их анализ и обобщение. Разработка конструкции соединительного узла, экспериментальный и численный анализ его прочности.

**Апробация основных результатов работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: XXXVI Всероссийской конференции по проблемам науки и технологий (Миасс, 2016), Международной научно-практической конференции «Решетневские чтения 2016» (Красноярск, 2016), IX Общероссийской молодежной научно-технической конференции «Молодежь. Техника. Космос» (Санкт-Петербург, 2017г.), V Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («V Козловские чтения») (Самара, 2017), XXI Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов (Королев, 2017), Международной научно-практической конференции «Решетневские чтения 2017» (Красноярск, 2017).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 11 научных работ. Основное содержание диссертационного исследования отражено в 4 научных статьях, опубликованных в рецензируемых ВАК Минобрнауки РФ журналах, и в 7 докладах и их аннотациях, опубликованных в сборниках трудов научных конференций.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем составляет 174

страницы (с приложениями 192 страницы), 128 рисунков и 14 таблиц. Список литературы содержит 139 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, определяется объект и предмет исследования, формулируются цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, приводятся описание ее структуры и содержания.

В **первой главе** приводится обзор многосекционных стержневых конструкций современных и перспективных изделий ракетно-космической техники, а также методов их расчета. Примеры таких конструкций приведены на Рисунке 1.

С учетом возрастающих требований к таким аппаратам, и, как следствие, возрастающим габаритам и нагрузкам, отмечается актуальность разработки методики оптимального проектирования несущих стержневых конструкций.

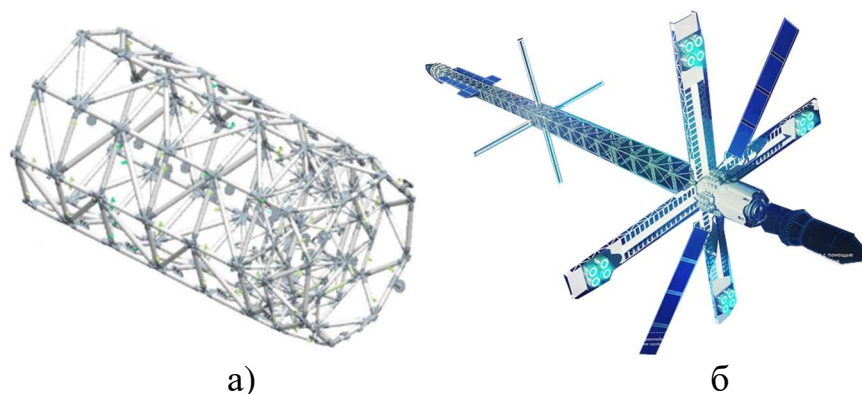


Рисунок 1. а) Несущая стержневая конструкция научно-энергетического модуля МКС, б) транспортно-энергетический модуль

**Вторая глава** посвящена описанию разработанной методики анализа прочности и оптимального проектирования (ОП) многосекционных стержневых космических конструкций из композитных материалов.

В главе обосновывается применение МКЭ в разработанной методике для расчета конструкций на статические и динамические воздействия.

Проведение оптимального проектирования с использованием МКЭ требует значительного машинного времени, поэтому крайне важным является поиск возможностей уменьшения затрачиваемого времени на определение оптимального проекта. В работе используются две из них.

Первой возможностью является упрощение расчетной модели с целью уменьшения количества времени, затрачиваемого на расчет одного проекта. Рекомендации по данной возможности состоят в рациональном применении типов конечных элементов – балочного, балочного с функциями оболочечного и оболочечного. Обосновывается применение балочного элемента для задач поиска собственных частот

многосекционных стержневых конструкций, балочного элемента с функциями оболочечного для определения и визуализации распределения напряжений по слоям, и оболочечного для определения запасов устойчивости и анализа несущей способности стержневых конструкций.

Тип применяемого конечного элемента определяется постановкой решаемой задачи и материалом стержня – металлический сплав или композиционный материал. Предлагаемая классификация задач оптимального проектирования многосекционных стержневых конструкций приведена в Таблице 1. Используемые здесь векторы  $\{X\}$ ,  $\{Y\}$ ,  $\{K\}$  содержат варьируемые параметры, описывающие геометрию конструкции, характеристики сечения стержня и структурные параметры многослойной структуры стержня соответственно. Рассчитываемые характеристики:  $u$  - перемещения,  $f$  - значения собственных частот,  $\eta^{(общ)}$  и  $\eta^{(м)}$  - коэффициенты запаса общей и местной устойчивости,  $\{\sigma\}$  – вектор напряжений в слоях.

Таблица 1.

Варьируемые параметры и рассчитываемые характеристики при различных постановках задачи ОП

Постановка задачи ОП	Рассчитываемые характеристики (Выходные)	Композитные стержни	Металлические стержни
		Варьируемые параметры (Входные)	Варьируемые параметры (Входные)
Варьирование характеристик стержней	$u, f, \eta^{(общ)}$	$\{Y\}, \{K\}$ (балочная модель)	$\{Y\}$ (балочная модель)
	$u, f, \eta^{(общ)}, \{\sigma\}, \eta^{(м)}$	$\{Y\}, \{K\}$ (оболочечная модель)	
Варьирование характеристик стержней и геометрических параметров	$u, f, \eta^{(общ)}$	$\{Y\}, \{K\}, \{X\}$ (балочная модель)	$\{Y\}, \{X\}$ (балочная модель)
	$u, f, \eta^{(общ)}, \{\sigma\}, \eta^{(м)}$	$\{Y\}, \{K\}, \{X\}$ (оболочечная модель)	

Второй возможностью уменьшения машинного времени при поиске оптимального проекта является снижение количества рассматриваемых проектов, что становится возможным при рациональном применении методов оптимизации и ускорения поиска.

При проведении оптимизации могут быть использованы различные методы. В данной работе применялся метод глобального перебора. Помимо ряда преимуществ, он имеет и значительный недостаток - его применение приводит к необходимости анализировать значительное количество проектов. В рассматриваемых задачах появляется необходимость анализа около  $10^6$  проектов, на что требуются сотни часов. В связи с этим предлагается применение метода ускорения поиска – метода сгущения сетки. Суть метода состоит в итерационном поиске



оптимального проекта на грубой сетке с уменьшением шага варьирования и сужением области поиска возле субоптимального проекта, то есть лучшего проекта на текущей итерации (Рисунок 2). Применение этого метода позволяет уменьшить количество рассматриваемых проектов и машинное время на несколько порядков.

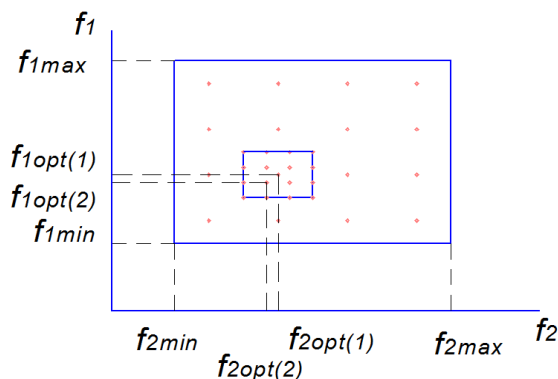


Рисунок 2. Метод сгущения сетки поиска в двумерном пространстве

Блок-схема разработанной методики представлена на Рисунке 3.

Суть методики состоит в проведении оптимизации стержневых конструкций с варьированием геометрических характеристик (количество секций, радиус описанной окружности основания конструкции), характеристик сечения стержней (диаметр, толщина стенки), структурных параметров многослойного пакета (относительная толщина продольного слоя, угол армирования перекрестных слоев). Для каждого набора значений параметров создаются геометрическая и конечно-элементная модели, проводится расчет и запись результатов – прочностных и динамических характеристик. После проведения данной процедуры для одной итерации анализируется полученный массив и определяется лучший проект, после чего уменьшается шаг варьирования параметров и корректируется область поиска для следующей итерации. Таким образом, за несколько итераций, в каждой из которых проводится расчет от сотен до нескольких тысяч проектов, определяется оптимальный.

Для корректной постановки, а также облегчения анализа результатов задачи оптимизации, как правило, проводится параметрический анализ. В **третьей главе** приводятся результаты параметрического анализа рассматриваемых конструкций. Конечно-элементные модели исследуемых конструкций представлены на Рисунке 4.

*Параметрический анализ негерметичного корпуса НЭМ.* Зависимость первой собственной частоты и запаса устойчивости от структурных параметров приведена на Рисунке 5. На Рисунке 5, б отмечены характерные проекты 1 и 2 – проекты с балочной и оболочечной формами потери устойчивости – деформированный вид которых показан на Рисунках 6, а и 6, б соответственно.



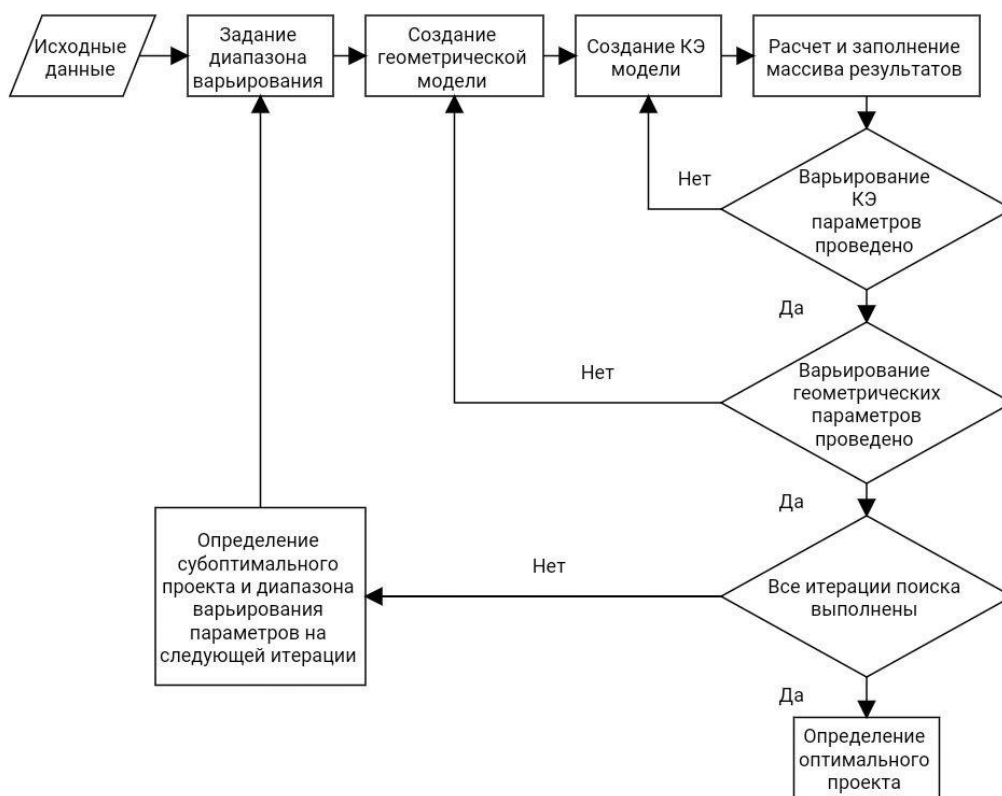


Рисунок 3. Блок-схема разработанной методики оптимального проектирования многосекционных стержневых конструкций

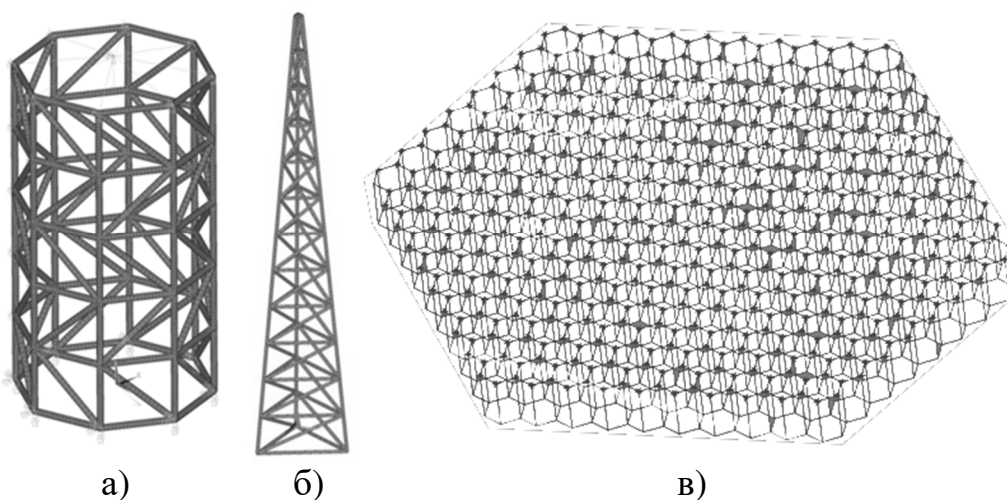


Рисунок 4. Геометрические модели а) корпуса НЭМ, б) штанги рефлектора и штанги крепления электрореактивной двигательной установки на транспортно-энергетическом модуле, в) каркаса космической солнечной электростанции

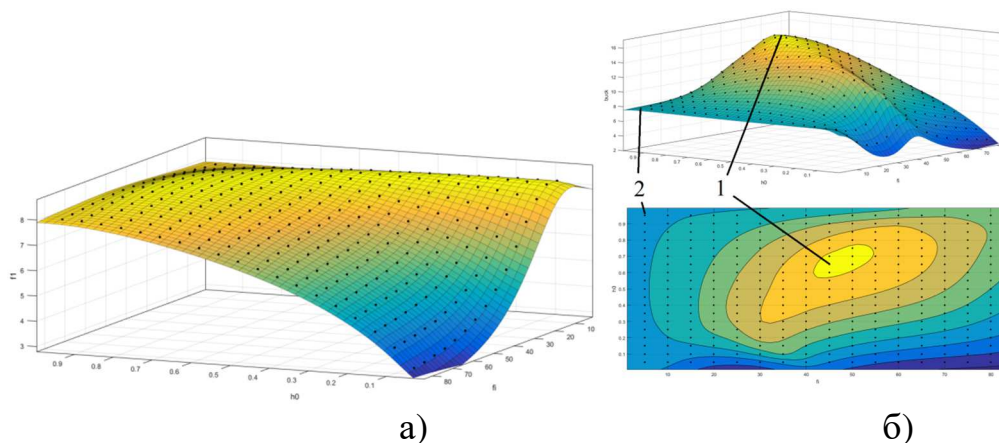


Рисунок 5. Зависимость первой собственной частоты и запаса устойчивости от структурных параметров многослойного стержня

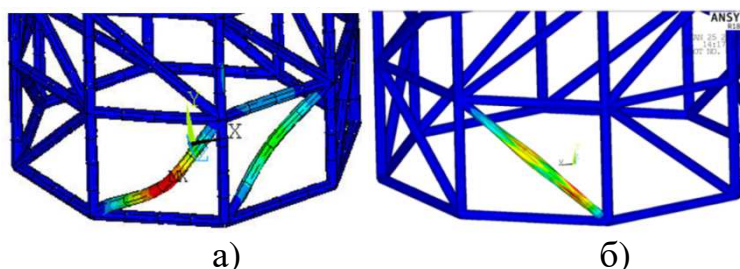


Рисунок 6. Деформированный вид проектов с а) балочной и б) оболочечной формами потери устойчивости

*Параметрический анализ штанги космического рефлектора.*

В рамках параметрического анализа штанги рефлектора анализировалась зависимости полных перемещений ее вершины при неравномерном температурном воздействии и первой собственной частоты от варьируемых параметров.

Зависимость продольного КЛТР материала стержней от структурных параметров представлена на Рисунке 7. Интерес представляет область значений КЛТР, близких к нулю, отмеченная красной линией на Рисунке 7, б.

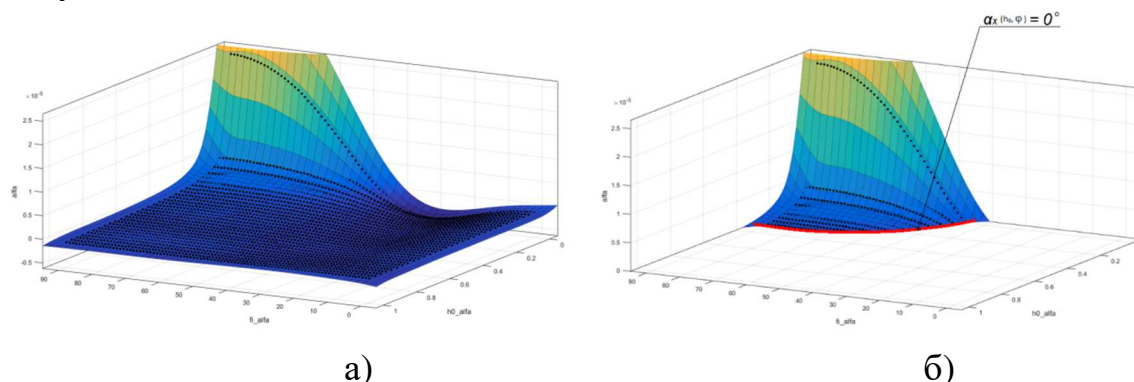


Рисунок 7. а) Зависимость продольного КЛТР от структурных параметров, б) пересечение зависимости КЛТР материала стержней с нулевым значением.

Зависимости первой собственной частоты и полных перемещений вершины штанги от структурных параметров показаны на Рисунках 8, а и 8, б соответственно. На Рисунке 8, б приводятся соответствующие зависимости КЛТР и перемещений.

Результаты проведенного параметрического анализа при варьировании значений структурных параметров при одностороннем температурном воздействии показали, что характер зависимости максимальных полных перемещений от варьируемых параметров полностью соответствует зависимости абсолютных значений продольного КЛТР от этих параметров. Минимум перемещений соответствует структурам, при которых продольный КЛТР равен нулю.

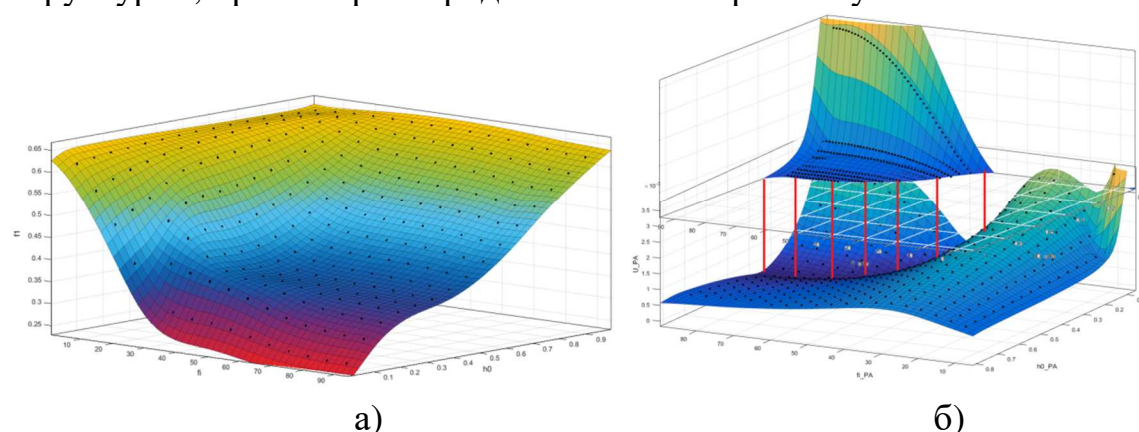


Рисунок 8. Зависимость а) первой собственной частоты от структурных параметров, Гц и б) зависимость продольного КЛТР и зависимость максимальных полных перемещений при нагреве от относительной толщины продольных слоев  $\bar{h}_0$  и угла армирования перекрестных слоев  $\varphi$

*Параметрический анализ каркаса космической солнечной электростанции.*

Анализировалась зависимость первой собственной частоты конструкции от геометрических параметров (длина и высота секции) и параметров многослойной структуры (относительная толщина продольного слоя и угол армирования перекрестного слоя). Зависимости приведены на Рисунке 9.

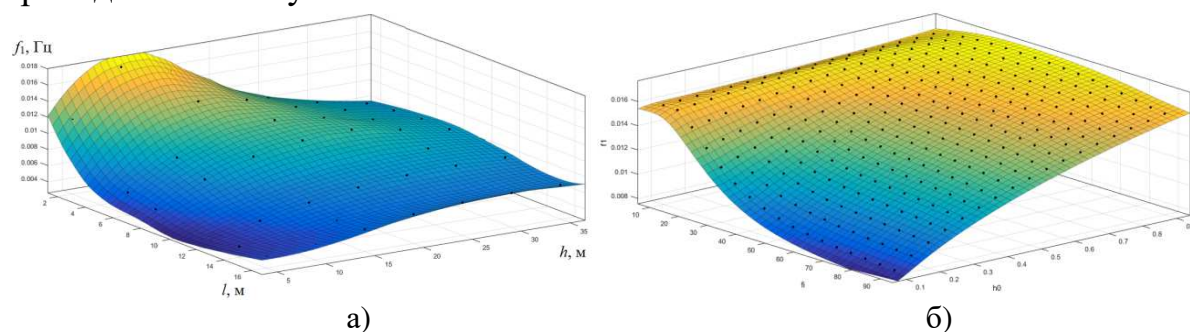


Рисунок 9. Зависимость первой собственной частоты от а) геометрических параметров и б) параметров многослойной структуры

В случае варьирования геометрических параметров видно, что имеется такое соотношение между ними, при котором значение первой собственной частоты максимально. При анализе зависимости первой собственной частоты от структурных параметров многослойных стержней видно, что максимум соответствует структурам с максимальным количеством продольных слоев и минимальными углами перекрестных слоев.

В четвертой главе изложены результаты проведения оптимального проектирования рассматриваемых конструкций. Для решения всех задач использовался метод глобального перебора с двумя итерациями сгущения сетки поиска.

*Оптимальное проектирование негерметичного корпуса научно-энергетического модуля.*

К конструкции предъявлялись требования к первой собственной частоте  $f_1$  и запасу несущей способности, определяемому как запасом прочности, так и запасом устойчивости  $k_{уст}$ . Запас прочности определялся максимальными нормальными положительными и отрицательными напряжениями вдоль и поперек волокон, а также касательными напряжениями в продольных и перекрестных слоях  $\sigma_{1+прод}$ ,  $\sigma_{1-прод}$ ,  $\sigma_{2+прод}$ ,  $\sigma_{2-прод}$ ,  $\tau_{прод}$ ,  $\sigma_{1+пер}$ ,  $\sigma_{1-пер}$ ,  $\sigma_{2+пер}$ ,  $\sigma_{2-пер}$ ,  $\tau_{пер}$ . Оптимальное проектирование проводилось в два шага – на первом шаге проводилось определение оптимального проекта с одинаковыми стержнями, описываемыми варьируемыми параметрами: диаметром  $d$ , толщиной продольных  $h_0$  и перекрестных слоев  $h_\phi$ , углом армирования перекрестных слоев  $\phi$ .

Целью второго шага ОП было определение оптимальных типоразмеров стержней в секциях конструкции. На втором шаге использовались характеристики оптимального проекта первого шага. Варьировались значения диаметров стержней в секциях –  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ ,  $d_4$ ,  $d_5$ . Некоторые значения проанализированных проектов представлены в Таблицах 2-5. Субоптимальный проект первого шага и оптимальный проект второго шага выделены жирным шрифтом.

Таблица 2.

Результаты расчета проектов со стержнями из высокопрочного углепластика Т800/Ероху для первого шага решения задачи ОП

Номер итерации	Номер проекта	$d$ , мм	$h$ , мм	$h_0$ , мм	$h_\phi$ , мм	$\phi$ , °	$m$ , кг	$f_1$ , Гц	$\eta$
1	1	60	2,6	1,4	1,2	23	122	7,15	4,89
	2	60	2,8	1,2	1,6	23	131	7,19	5,09
2	3	<b>50</b>	<b>2,8</b>	<b>1,2</b>	<b>1,6</b>	<b>11</b>	<b>109</b>	<b>7,18</b>	<b>2,75</b>
	4	50	2,8	0,8	2	11	109	7,10	2,87

Таблица 3.

Рассчитанные значения напряжений в проектах со стержнями из высокопрочного углепластика Т800/Ероху для первого шага решения задачи ОП

Номер итерации	Номер проекта	$\sigma_{1\text{ прод}}^+$ МПа	$\sigma_{1\text{ прод}}^-$ МПа	$\sigma_{2\text{ прод}}^+$ МПа	$\sigma_{2\text{ прод}}^-$ МПа	$\sigma_{1\text{ пер}}^+$ МПа	$\sigma_{1\text{ пер}}^-$ МПа	$\sigma_{2\text{ пер}}^+$ МПа	$\sigma_{2\text{ пер}}^-$ МПа	$\tau_{\text{ прод}}^{\text{ прод}}$ МПа	$\tau_{\text{ пер}}^{\text{ пер}}$ МПа
1	1	386	-634	22	-30	454	-714	19	-26	23	17
	2	334	-545	21	-27	387	-608	17	-25	21	15
2	3	<b>410</b>	<b>-580</b>	<b>24</b>	<b>-26</b>	<b>437</b>	<b>-712</b>	<b>20</b>	<b>-26</b>	<b>39</b>	<b>35</b>
	4	400	-551	22	-24	418	-685	18	-26	38	33

Таблица 4.

Результаты расчета проектов со стержнями из высокопрочного углепластика Т800/Ероху для второго шага решения задачи ОП

Номер итерации	Номер проекта	d <sub>1</sub> , мм	d <sub>2</sub> , мм	d <sub>3</sub> , мм	d <sub>4</sub> , мм	d <sub>5</sub> , мм	m, кг	f <sub>1</sub> , Гц	η
1	1	43	43	43	43	57	102	7,08	2,57
	2	43	43	43	57	57	107	7,33	3,50
2	3	<b>37</b>	<b>37</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>100</b>	<b>7,05</b>	<b>3,20</b>
	4	37	37	37	50	63	102	7,13	2,22

Таблица 5.

Рассчитанные значения напряжений в проектах со стержнями из высокопрочного углепластика Т800/Ероху для второго шага решения задачи ОП

Номер итерации	Номер проекта	$\sigma_{1\text{ прод}}^+$ МПа	$\sigma_{1\text{ прод}}^-$ МПа	$\sigma_{2\text{ прод}}^+$ МПа	$\sigma_{2\text{ прод}}^-$ МПа	$\sigma_{1\text{ пер}}^+$ МПа	$\sigma_{1\text{ пер}}^-$ МПа	$\sigma_{2\text{ пер}}^+$ МПа	$\sigma_{2\text{ пер}}^-$ МПа	$\tau_{\text{ прод}}^{\text{ прод}}$ МПа	$\tau_{\text{ пер}}^{\text{ пер}}$ МПа
1	1	396	-612	398	-637	23	-31	20	-36	48	46
	2	397	-612	397	-637	22	-31	20	-36	48	46
2	3	<b>406</b>	<b>-584</b>	<b>421</b>	<b>-676</b>	<b>24</b>	<b>-29</b>	<b>19</b>	<b>-27</b>	<b>40</b>	<b>36</b>
	4	372	-573	375	-603	22	-33	22	-39	45	46

*Оптимальное проектирование штанги космического рефлектора.*

Задача ОП решалась в два этапа – на первом этапе в балочной постановке решалась скалярная задача определения проекта конструкции минимальной массы с собственной частотой не менее 1,0 Гц. Варьировались все шесть параметров – два геометрических параметра (количество секций и радиус основания конструкции), два параметра сечения стержня (диаметр стержня и толщина стенки) и два параметра многослойного пакета (относительная толщина продольного слоя и угол армирования перекрестных слоев).

Характеристики полученного проекта использовались для проведения второго шага ОП – векторной задачи оптимизации с минимизацией перемещений и максимизацией первой собственной частоты. При этом варьировались только параметры многослойной структуры – относительная толщина продольного слоя и угол армирования перекрестных слоев.

Характеристики рассчитанных проектов представлены на Рисунке 10. На нем также отмечены красной линией Парето-оптимальные проекты.

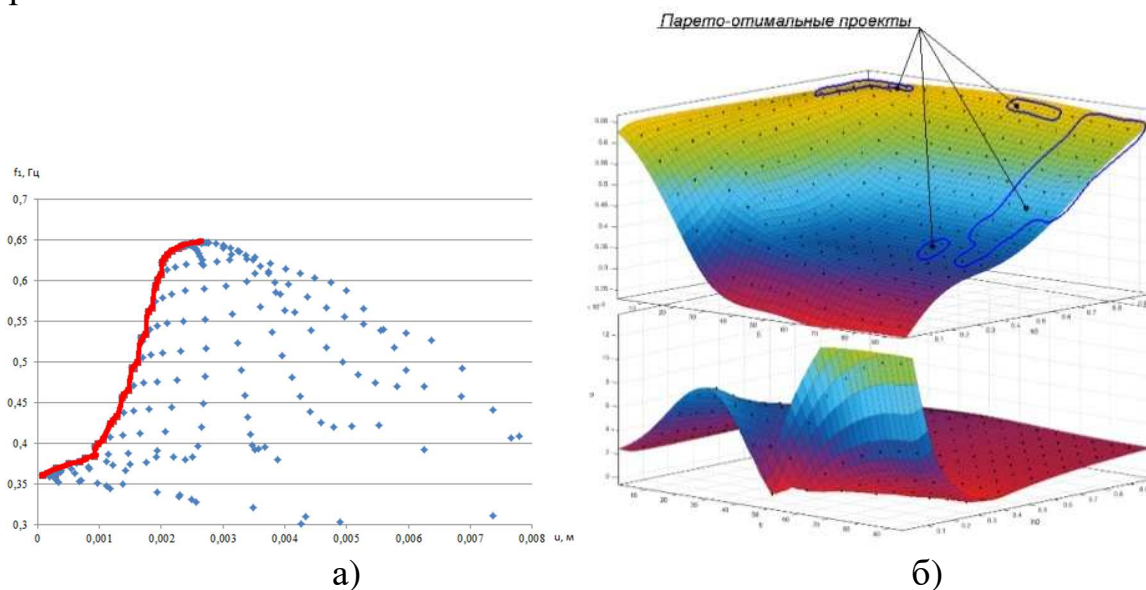


Рисунок 10. а) Парето-оптимальные проекты штанги космического рефлектора, б) зависимость первой собственной частоты и перемещений от структурных параметров

*Оптимальное проектирование каркаса космической солнечной электростанции.*

В качестве варьируемых параметров принимались:  $H_{сек}$  – высота секции,  $l$  – длина стержня в секции,  $d$  – диаметр стержней,  $h$  – толщина стержней,  $\bar{h}_0$  – относительная толщина продольного слоя,  $\varphi$  – угол армирования перекрестных слоев. Данные параметры варьировались в следующих диапазонах:  $5\text{ м} \leq H_{сек} \leq 50\text{ м}$ ,  $4\text{ м} \leq l \leq 16\text{ м}$ ,  $20\text{ мм} \leq d \leq 60\text{ мм}$ ,  $0,4\text{ мм} \leq h \leq 2,0\text{ мм}$ ,  $0,1 \leq \bar{h}_0 \leq 0,9$ ,  $0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ .

Таблица 6.

Результаты оптимального проектирования

Номер итерации	Номер проекта	$H_{сек}$ , м	$l$ , м	$d$ , мм	$h$ , мм	$h_0$ , мм	$h_\varphi$ , мм	$\varphi$ , °	$m$ , кг	$f_1$ , Гц
1	1	28	7	85	1,2	0,8	0,4	23	8178	0,051
	2	39	7	85	1,2	0,8	0,4	23	10140	0,051
2	3	<b>28</b>	<b>7</b>	<b>93</b>	<b>1</b>	<b>0,6</b>	<b>0,4</b>	<b>23</b>	<b>7083</b>	<b>0,051</b>
	4	22	6	93	0,8	0,4	0,4	11	7123	0,053



Критериями качества в данной задаче являются значение массы конструкции  $m$  и первой собственной частоты  $f_1$ . В данной задаче требовалось определить характеристики конструкции минимальной массы, обеспечивающие выполнение условия  $f_1 \geq 0,05$  Гц. Характеристики некоторых проектов представлены в Таблице 6. Форма колебаний оптимального проекта показана на Рисунке 11.

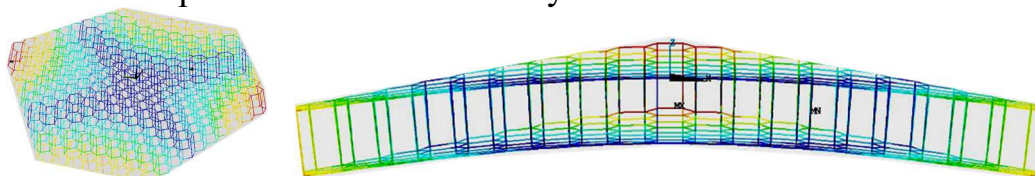
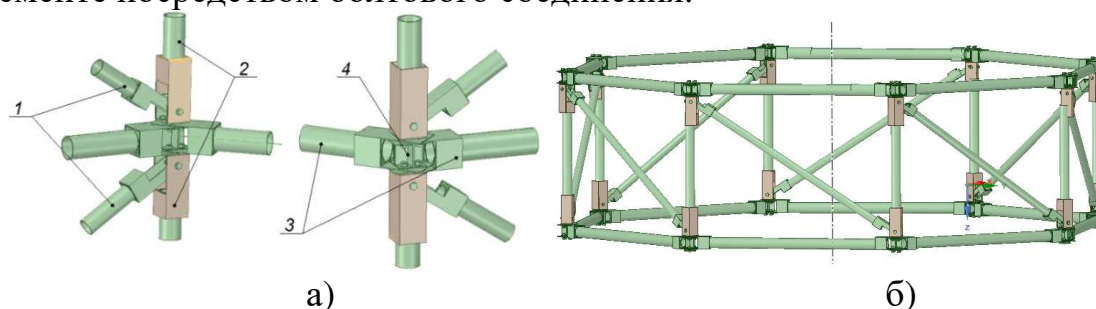


Рисунок 11. Форма колебаний оптимального проекта крупногабаритного каркаса космических солнечных батарей

В **пятой главе** представлен обзор применяемых в многосекционных стержневых конструкциях соединительных узлов. Рассмотрены их положительные и отрицательные стороны. Показано, что все имеющиеся типы узлов выполнены из металлических сплавов и имеют значительную массу. Помимо этого большинство из них является неразборными, что также является недостатком.

Предлагается конструкция разборного соединительного узла состоящего в основном из композитных материалов (Рисунок 12) с некоторыми элементами из металлических сплавов.

Все стержни имеют на конце металлические или композитные законцовки с втулками. Сборка происходит на композитном центральном элементе посредством болтового соединения.



1 – Диагональные стержни, 2 – вертикальные стержни, 3 – горизонтальные стержни, 4 – центральный элемент

Рисунок 12. а) Модель предлагаемого соединительного узла, б) Модель секции, собранной с использованием предлагаемого соединительного узла

С целью анализа прочности соединительного узла проводилось экспериментальное и численное исследование. Механическим испытаниям подвергался элемент соединительного узла. Экспериментальные и численные значения нагрузки потери устойчивости стенки элемента составляют 27 и 26 кН соответственно.

Характер потери устойчивости при испытаниях и моделировании показан на Рисунке 13.



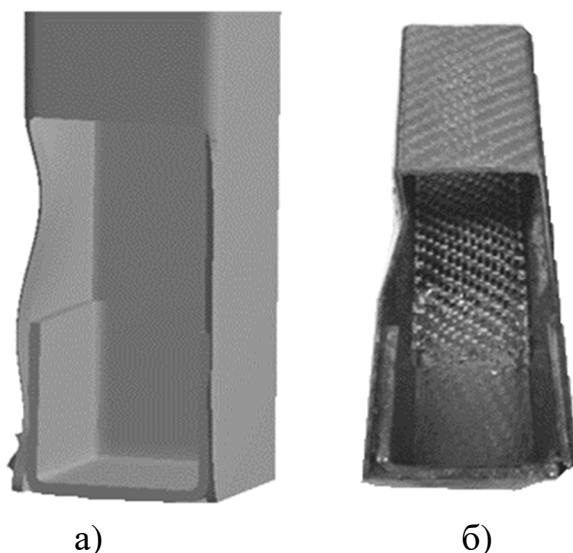


Рисунок 13. Характер потери устойчивости а) при КЭ моделировании, б) при испытаниях

Хорошее соответствие результатов говорит о том, что метод конечных элементов может быть эффективно использован при проектировании композитных соединительных узлов предложенной конфигурации с различными типоразмерами под различные значения нагрузок.

Напряженно-деформированное состояние соединительного узла приведено на Рисунке 14.

В заключении сформулированы основные полученные в работе результаты.

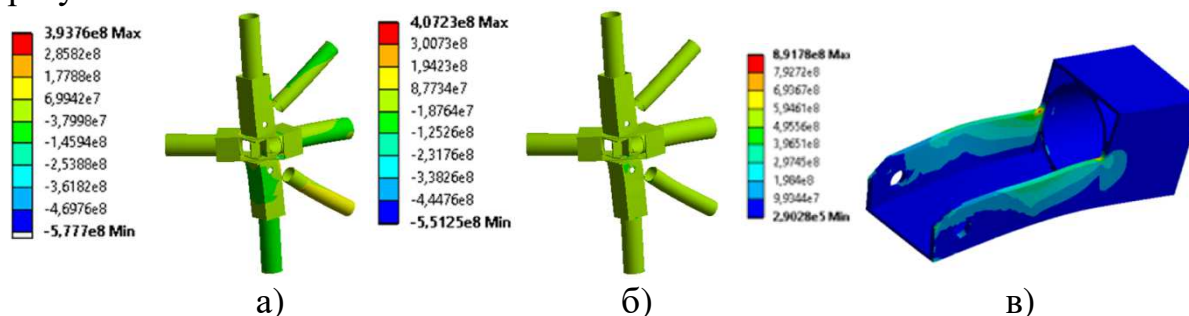


Рисунок 14. Нормальные напряжения в элементах соединительного узла а) в продольном направлении, б) в перпендикулярном направлении, в) эквивалентные напряжения в металлической законцовке, Па

## ОБЩИЕ ВЫВОодЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработана методика расчета и анализа прочности многосекционных стержневых конструкций из композиционных материалов для изделий ракетно-космической техники. Разработанная методика применена для улучшения массовых и прочностных характеристик при проектировании стержневых конструкций космических аппаратов нескольких классов.

2. Разработан алгоритм расчета прочностных и динамических характеристик оптимальных многосекционных композитных стержневых конструкций методом конечных элементов. Разработанный алгоритм может быть применен в любом пакете конечноэлементного анализа. Обосновано применение МКЭ при разработке и создании многосекционных стержневых конструкций. Предложены подходы к решению задач о статическом, динамическом и неравномерном температурном нагружении многосекционных стержневых космических конструкций.

3. Проведен анализ применения различных типов конечных элементов для решения задачи о статическом, динамическом и термическом нагружении многосекционных стержневых космических конструкций и сформулированы рекомендации о применении типов конечных элементов для решения этих задач.

4. Разработан алгоритм выбора оптимальной схемы армирования многосекционной композитной размеростабильной стержневой конструкции космического аппарата, подвергающейся одностороннему нагреву. Впервые построены границы предельных возможностей размеростабильных конструкций, подвергающихся неравномерному температурному воздействию, с ограничением по продольным перемещениям и первой собственной частоте.

5. Предложена облегченная конструкция разборного композитного соединительного узла стержневой конструкции космического аппарата. Проведены экспериментальное исследование прочности элемента узла и верификация конечно-элементной модели узла для прочностных расчетов различных типоразмеров соединительных узлов.

6. Полученные научные результаты внедрены в МГТУ им. Н.Э. Баумана при проектировании конструкции штанги крепления облучателей крупногабаритного рефлектора.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Зимин В. Н., Смердов А. А. Решетневские чтения: материалы XX Юбилейной междунар. науч.-практ. конф., посвящ. памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева (09–12 нояб. 2016, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2016. Ч. 1. С. 119-121. (0,13 п.л. / 0,07 п.л.).

2. Смердов А.А. Анализ возможностей оптимизации крупногабаритных ферменных конструкций. Наука и технологии. Том 1. Материалы XXXVI Всероссийской конференции, посвященной памяти референта МСНТ Н.Н. Ершовой. –М.: РАН, 2016. С. 35-45. (0,69 п.л.).

3. Зимин В.Н., Смердов А.А. Проектирование композитных соединительных узлов в задачах оптимизации многосекционных композитных космических ферменных конструкций. Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18. №1. С.123-131. (0,50 п.л. / 0,25 п.л.).

4. Синявский В.В., Смердов А.А., Лаврищев С.С. Исследование влияния параметров ферменной секции на напряженно-деформированное состояние и динамические характеристики каркаса космических солнечных батарей // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2017. №4. С. 76-81. (0,38 п.л. / 0,28 п.л.).

5. Зимин В.Н., Смердов А.А. Исследование влияния параметров крупногабаритной фермы излучателя космической антенны на динамические и прочностные характеристики. Решетневские чтения. 2017. Т. 1. № 21. С. 123-124. (0,13 п.л. / 0,07 п.л.).

6. Смердов А.А. Исследование динамических и прочностных характеристик многосекционной композитной ферменной конструкции. Решетневские чтения. 2017. Т. 1. № 21. С. 176-178. (0,19 п.л.).

7. Смердов А.А., Лаврищев С.С. Исследование напряженно-деформированного состояния и динамических характеристик крупногабаритного каркаса космических солнечных батарей. Молодежь. Техника. Космос: статьи и доклады IX Общероссийской молодежной науч.-техн. конф./Балт. гос. техн. ун-т.-СПб.; 2017. С. 111. (0,06 п.л. / 0,05 п.л.)

8. Смердов А.А. Исследование влияния параметров ферменной секции на динамические и прочностные характеристики фермы двигательной установки малой тяги межорбитального буксира. Тезисы докладов XXI Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. 2017. Т.2. С 50-51. (0,13 п.л.).

9. Смердов А.А. Анализ прочностных характеристик элемента композитного соединительного узла для ферменной конструкции. Тезисы докладов XXI Научно-технической конференции молодых ученых и специалистов. 2017. Т.2. С. 53-54. (0,13 п.л.).

10. Синявский В.В., Смердов А.А. Динамические характеристики стержневой конструкции крепления электрического ракетного двигателя на межорбитальном буксире // Космическая техника и технологии. №4(23)/2018. С.93-100. (0,5 п.л. / 0,4 п.л.).

11. Смердов Ал. А. Оптимальное проектирование композитного стержневого отсека космического аппарата. // Механика композиционных материалов и конструкций. 2019. №4. С.25-29. (0,31 п.л.).