

Комплексный подход к оптимизации проектных параметров несущих отсеков головного блока ракеты-носителя при одновременном силовом и тепловом нагружении

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»

Предложен комплексный подход к оптимальному проектированию несущих отсеков головного блока ракеты-носителя различных конструктивно-силовых схем, отличительной чертой которого является возможность многофакторной оптимизации параметров агрегатов рассматриваемого класса при обеспечении регламентированной несущей способности при одновременном силовом и тепловом нагружении с учетом технологических, эксплуатационных, экономических и экологических ограничений, соответствующих существующему уровню их производства. Реализация подхода к синтезу рациональных параметров головного обтекателя и межступенного отсека ракеты-носителя «Циклон-4» показала его высокую эффективность.

Ключевые слова: концепция, оптимизация, композит, теплозащита, тепловое и силовое воздействие, конструктивно-силовая схема, головной обтекатель, межступенной отсек.

Существующие на сегодняшний день жесткие условия рынка космических запусков имеют строго определенную тенденцию к увеличению массы и габаритных размеров выводимого на орбиту полезного груза (ПГ), что, в свою очередь, инициирует повышение требований к несущим отсекам головных блоков ракет-носителей (РН) [1]. Поиск эффективных путей снижения массы агрегатов рассматриваемого класса, особенно в последние два десятилетия, привел к постоянно нарастающей тенденции использования в них полимерных композиционных материалов (ПКМ) [2, 3]. Проведенный анализ несущих отсеков головных блоков эксплуатируемых РН [4, 5] показал, что в настоящее время используются несколько основных конструктивно-силовых схем (КСС), отличающихся как особенностями силового нагружения, так и технологиями изготовления. Чаще всего применяют сэндвичевые конструкции с углепластиковыми несущими обшивками и легким сотовым наполнителем (СЗ). Высокая эффективность такой КСС изначально предопределена ее природой и достоверно доказана теоретически и экспериментально [6, 7]. Во многих случаях с сэндвичевыми агрегатами могут успешно конкурировать сетчатые (изогридные, анизогридные) композитные конструкции [8], представляющие собой систему спирально-кольцевых ребер, которая может быть дополнена внешней обшивкой. Однако наибольший эффект для такой КСС может быть достигнут лишь там, где не требуется сплошной поверхности конструкции: во внутренних конструктивных элементах РН, адаптерах космических аппаратов и т.п. Возможной альтернативой этим двум основным КСС для крупногабаритных оболочечных композитных агрегатов РН могут быть так называемые многостеночные структуры [9]. Как и сэндвичевые, они содержат две композитные несущие обшивки, разнесенные на значительное расстояние для обеспечения требуемой высокой изгибной жесткости, а пространство между ними заполнено не легким наполнителем, а набором тонких композитных стенок, образующих призматические полости. Сравнительно новой КСС для рассматриваемого класса конструкций представляют собой оболочки, выполненные из интегральных стрингерных (или стрингерно-шпангоутных) композитных панелей [10]. Однако опыт использования

последних двух КСС в крупногабаритных оболочечных агрегатах РН практически отсутствует и необходимы доказательства того, что они способны отвечать высоким требованиям, предъявляемым к конструкциям рассматриваемого класса [9 – 11].

Таким образом, для ракетно-космической техники хорошо отработаны КСС, связанные с применяемыми крупногабаритными композитными несущими отсеками головного блока РН. В этих условиях особую актуальность приобретают вопросы научного обеспечения реализации потенциальных возможностей повышения массовой эффективности применяемых КСС при регламентированной несущей способности с учетом практически всего спектра внешних воздействий.

В подавляющем большинстве существующих работ по оптимальному проектированию рассматриваемого класса конструкций, подверженных одновременному силовому и тепловому воздействиям, рассмотрен типовой подход, предусматривающий, как правило, деление задачи на ряд подзадач по получению рациональных параметров для каждого типа воздействия. В итоге даже математически оптимальные порознь решения полученных подзадач не обеспечивают интегральной оптимальности конструкции. Кроме того, при оптимальном проектировании несущих отсеков головного блока, подверженных интенсивному тепловому воздействию, необходимо обеспечить не только их несущую способность с учетом повышенных температур, но и допустимые для эксплуатации диапазоны температур их наружной и внутренней поверхностей [1]. При этом величину температуры наружной поверхности композитных агрегатов РН обычно стараются обеспечить такой, при которой не происходят структурные превращения в используемых ПКМ и не нарушаются адгезионные свойства применяемых клеев. Для обеспечения допустимого диапазона температур применяют всевозможные теплозащитные покрытия (ТЗП), масса которых может быть соизмеримой, а в некоторых случаях даже больше, чем собственно масса силовой конструкции. Допустимый диапазон температур для внутренней поверхности несущих отсеков головного блока определяется существующими жесткими требованиями к внутреннему пространству РН [1]. Так, например, для ПГ, находящегося внутри ГО, тепловой поток от конструкции обтекателя может быть недопустимым по условиям его эксплуатации, что вызывает необходимость применения теплоизоляции, существенным образом уменьшающей массу и объем ПГ, выводимого РН на орбиту. Однако допустимую для эксплуатации температуру внутреннего пространства несущих отсеков головного блока РН можно обеспечить не только наружным ТЗП и внутренней теплоизоляцией, но и учетом при оптимальном проектировании теплоизолирующих свойств применяемых материалов, а также особенностей используемых КСС. Например, в ряде работ [6, 7] указывается, что применение СЗ в конструкциях, подверженных тепловому воздействию, позволяет существенно снизить массу необходимой теплоизоляции. Таким образом, использование теплоизоляционных свойств применяемых материалов и особенностей КСС может позволить повысить массовое совершенство, а соответственно и экономическую эффективность используемых несущих отсеков головного блока РН.

Целенаправленный анализ отечественного и зарубежного опыта оптимального проектирования агрегатов рассматриваемого класса, а также современный уровень развития интегрированных компьютерных технологий проектирования дал возможность подойти к решению описанной выше проблемы путем разработки комплексного подхода к оптимизации проектных параметров

несущих отсеков головного блока различной КСС при одновременном тепловом и силовом воздействиях в рамках предложенной ранее в [12] концепции. На рис. 1 показана принципиальная блок-схема предложенного подхода, отличительной чертой которого является возможность многофакторной оптимизации параметров агрегатов рассматриваемого класса при обеспечении регламентированной несущей способности при одновременном силовом и тепловом нагружении с учетом технологических, эксплуатационных, экономических и экологических ограничений, соответствующих существующему уровню их производства.

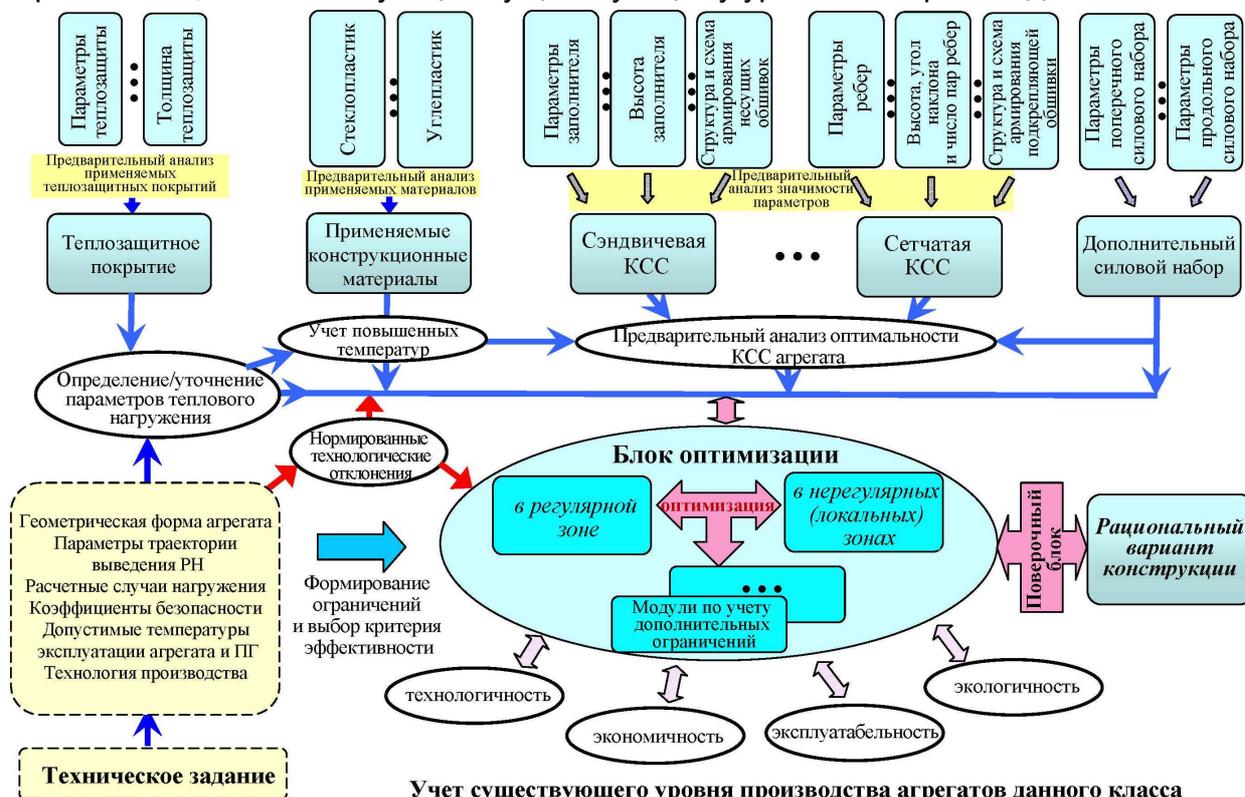


Рис. 1. Принципиальная блок-схема комплексного подхода к оптимальному проектированию несущих отсеков головного блока ракет-носителей при одновременном тепловом и силовом воздействиях с учетом существующего уровня их производства

Как известно, постановка задачи оптимального проектирования заключается в задании переменных проектирования, формулировке ограничений оптимизации и выборе критерия эффективности. Варьируемые параметры рассматриваемого класса конструкций различаются для различных КСС. Так, у конструкций, имеющих многослойные несущие обшивки, к числу варьируемых параметров относятся толщины и углы армирования монослоев, образующих эти обшивки. Для сэндвичевых агрегатов помимо параметров несущих обшивок важнейшей конструктивной переменной является высота заполнителя. Для дополнительного снижения массы сотовых конструкций могут варьироваться параметры СЗ. Наконец, для сетчатых конструкций варьируемые параметры – высота, ширина, углы наклона и число ребер, а для агрегатов на основе интегральных стрингерных панелей – число ребер (или шаг их расположения), а

также параметры, определяющие размеры поперечного сечения и структуру ребра [11].

К числу переменных проектирования могут относиться тип КСС и вид конструкционного материала, однако организация оптимизации с такими варьируемыми параметрами весьма затруднительна. В этом случае, как указывается в ряде работ, например [11], гораздо эффективнее провести серию оптимизационных расчетов с фиксированными значениями этих параметров и выбрать наилучший из полученных результатов.

Наличие большого количества переменных проектирования при оптимизации каждого типа КСС существенным образом влияет на возможность учета тех или иных особенностей рассматриваемого класса конструкции. При варьировании одновременно всех переменных процесс поиска лишен наглядности, а анализ полученных результатов затруднителен [11]. Поэтому для сокращения пространств поиска путем минимизации числа варьируемых параметров или раздела их оптимизации на этапы в предлагаемой блок-схеме предусмотрена возможность предварительного анализа значимости варьируемых параметров каждой КСС. Разумеется, возможности современных ЭВМ и алгоритмов оптимизации позволяют решать задачи математического программирования с достаточно большим числом переменных проектирования. Однако при небольшой размерности пространства поиска становится возможным не только найти численное решение конкретной задачи, но и добиться большей наглядности, а также выявить закономерности, которым подчиняются рассматриваемые КСС. Это особенно важно при многофакторной оптимизации, когда наряду с несущей способностью необходимо учитывать также другие ограничения, например, допустимые температуры, параметры технологичности, экономичности и т.п. Поэтому в зависимости от уровня значимости при реализации предложенного подхода конструктивные переменные КСС поступают в оптимизационный блок не одновременно, а поэтапно. Сначала поступают параметры, определяющим образом влияющие на выбранный критерий качества, например, на массу, несущую способность и т.п. К ним относятся толщины и углы ориентации слоев несущих обшивок, структуры и схемы армирования, размеры и число ребер сетчатых КСС, а также высота заполнителя для сэндвичевых конструкций. После выбора таких параметров в оптимизационный блок поступают типичные переменные, образующие пространство поиска для дополнительного улучшения результата. К этой группе, например, могут относиться параметры, определяющие местную прочность и устойчивость элементов рассматриваемых КСС. Типичными из них являются параметры заполнителей. Так, путем варьирования угла раскрытия ячейки β неправильной шестигранной формы и коэффициента ее формы K можно оптимизировать структуру СЗ, тем самым дополнительно повысив эффективность сэндвичевых конструкций на его основе [13]. Наряду с уменьшением размерности пространства поиска в рамках предложенного подхода можно проводить анализ эффективности армирования несущих обшивок за счет возможности уменьшения числа типов различных монослоев [11]. Подобный подход изложен, например, в работах [13, 14], где приведены примеры численного решения задач оптимизации для однородных и неоднородных по толщине композитных оболочек с различными схемами армирования.

Рационализация постановки задачи оптимального проектирования рассматриваемого класса конструкций предусматривает определение областей

эффективного применения каждой из рассматриваемых КСС. Для этой цели предусмотрен блок предварительного анализа рациональности КСС агрегата, в котором сопоставляются предельные возможности различных КСС и даются рекомендации по их оптимальному проектированию, касающиеся каждой конкретной задачи.

К числу переменных проектирования могут также относиться параметры дополнительного силового набора, когда наряду с основной КСС имеется небольшое число мощных продольных и (или) поперечных элементов. Во многих случаях характеристики дополнительного силового набора задаются заранее и не могут быть изменены на этапе выбора параметров несущих отсеков, однако возможность решения задачи их одновременного оптимального проектирования позволяет существенно повысить эффективность рассматриваемых агрегатов.

В рамках предложенного подхода предусмотрена возможность оценки влияния на рациональные параметры агрегата характерных для его производства технологических отклонений в пределах регламентированных допусков на них, определенных техническим заданием. Система нормирования полей допусков на возможные отклонения, возникающих в процессе производства конструкций рассматриваемого класса, а также конкретный алгоритм учета их влияния [15] поступают в блок предварительного анализа оптимальности КСС и напрямую попадают в оптимизационный блок, где проводится их учет.

Как уже отмечалось выше, рационализация постановки задачи оптимального проектирования подверженных интенсивному тепловому воздействию несущих отсеков головного блока РН, в особенности ГО, предусматривает необходимость одновременной оптимизации параметров их КСС и ТЗП. В качестве конструктивных переменных ТЗП в рамках предложенного подхода используют его параметры и толщину в различных зонах конструкции. В блоке проводится предварительный анализ применяемых ТЗП, разрабатываются возможные рекомендации для последующей оптимизации параметров ТЗП, определяются наиболее рациональные его виды применительно к рассматриваемому агрегату, находятся значения оптимальных ФМХ, а также рациональные диапазоны изменения и начальное значение толщины ТЗП для различных участков конструкции. Исходными данными для оптимизации параметров ТЗП выступают аэродинамический тепловой поток, определяемый параметрами траектории РН, и максимально допустимые значения температур конструкции несущих отсеков головного блока.

Температурное воздействие на агрегаты рассматриваемого класса вызывает в применяемых конструкционных материалах также нелинейные физико-химические явления, которые часто ведут к снижению ФМХ применяемых ПКМ, оценка влияния которого в рамках предложенного подхода осуществляется в соответствующем блоке.

Все переменные проектирования поэтапно поступают в оптимизационный блок, в котором решается задача выбора рационального соотношения необходимой толщины теплозащиты $\delta_{ТЗП}$, конструктивных параметров КСС и дополнительного силового набора при одновременном обеспечении допустимых диапазонов температур наружной и внутренней поверхностей рассматриваемого агрегата, несущей способности его рационального варианта во всех критичных зонах с учетом ухудшений ФМХ применяемых материалов от теплового воздействия и выполнении дополнительных функциональных ограничений, связанных с технологическими, экономическими, экологическими и другими

факторами. При этом оптимизация проводится для всех регламентированных расчетных случаях нагружения при учете возможных механизмов разрушения и потери устойчивости конструктивных элементов. В результате чего полученные рациональные параметры конструкции не являются оптимальными в каждом из отдельных случаев нагружения, но рациональны по отношению к их совокупности.

Учет дополнительных функциональных ограничений сводится к обеспечению конструктивно-технологической выполнимости проекта в условиях существующего уровня производства агрегатов данного класса. Выявление взаимодействия конкретных факторов и их совместное влияние на конечные характеристики композитных элементов, построение соответствующих алгоритмов выполняется на основе уже существующих методик, например [15 – 17 и др.], и реализуется в оптимизационном блоке в виде отдельных модулей.

В блоке оптимизации сначала решается задача поиска рациональных параметров конструкции в ее регулярной зоне. Последующие этапы ее проведения предполагают определение рациональных параметров в локальных зонах, к которым относятся зоны усиления всевозможных технологических и эксплуатационных люков, стыков и т.п. Для этого могут использоваться различные расчетные схемы, учитывающие специфику их нагружения [18 и др.]. Невозможность реализации оптимизации объекта, представленного во всех тонкостях его конструктивных элементов, делает наличие отдельных модулей оптимизации регулярной и локальных зон обязательным условием эффективного решения оптимизационной задачи.

При оптимизации в качестве целевой функции может выступать выбранный в соответствии с техническим заданием критерий эффективности, который для объектов рассматриваемого класса обычно трансформируется в минимум массы.

После определения оптимальных параметров конструкции полученные данные поступают в поверочный блок оптимизации, где могут проводиться всевозможные расчеты и оценки. Необходимость наличия данного блока является обязательным условием и вызвана тем фактом, что технически невозможно реализовать оптимизацию объекта, представленного во всех тонкостях его параметров.

Ниже приведены основные результаты реализации предложенного комплексного подхода к оптимальному проектированию несущих отсеков головного блока отечественной РН «Циклон-4» разработки ГП «Конструкторское бюро «Южное», представляющие собой обобщение ряда исследований, проведенных автором или при его активном участии [13, 19 – 25]*.

В качестве объектов исследования рассмотрены ГО и межступенной отсек (МСО), входящие в головной блок РН «Циклон-4». Хотя время эксплуатации этих агрегатов в полете составляет всего несколько минут, их конструкция при минимальной массе должна обеспечить целостность, работоспособность и защиту от разогрева ПГ при прохождении РН плотных слоев атмосферы.

ГО представляет собой цилиндро-биконический (включает в себя конус 25° и конус 15°) отсек длиной 8590/9590 мм диаметром 4000 мм, имеющий сферический наконечник радиусом 720 мм (рис. 2, а). Корпус ГО состоит из двух

* В большинстве указанных работ, выполнявшихся в широкой кооперации, сфера деятельности автора заключалась в анализе напряженно-деформированного состояния (НДС) рассматриваемых композитных несущих отсеков и проведении оптимизации их параметров на базе постепенно развиваемого им комплексного подхода с последующей реализацией полученных результатов на ГП «КБ «Южное».

полуоболочек сэндвичевой КСС, которые крепятся между собой механическими замками системы разделения продольного стыка ГО. Все секции ГО соединены между собой с помощью металлических шпангоутов. Кроме того, на первой конической секции установлен промежуточный шпангоут.

МСО выполнен в виде усеченного конуса высотой 4014 мм с диаметром нижнего основания 3000 мм, а верхнего – 3980 мм (рис. 2, б). Отсек имеет сэндвичевую КСС и состоит из корпуса, верхнего и нижнего стыковочных шпангоутов. Сэндвичевый корпус состоит из углепластиковых несущих и СЗ из полимерной бумаги «Nomex».

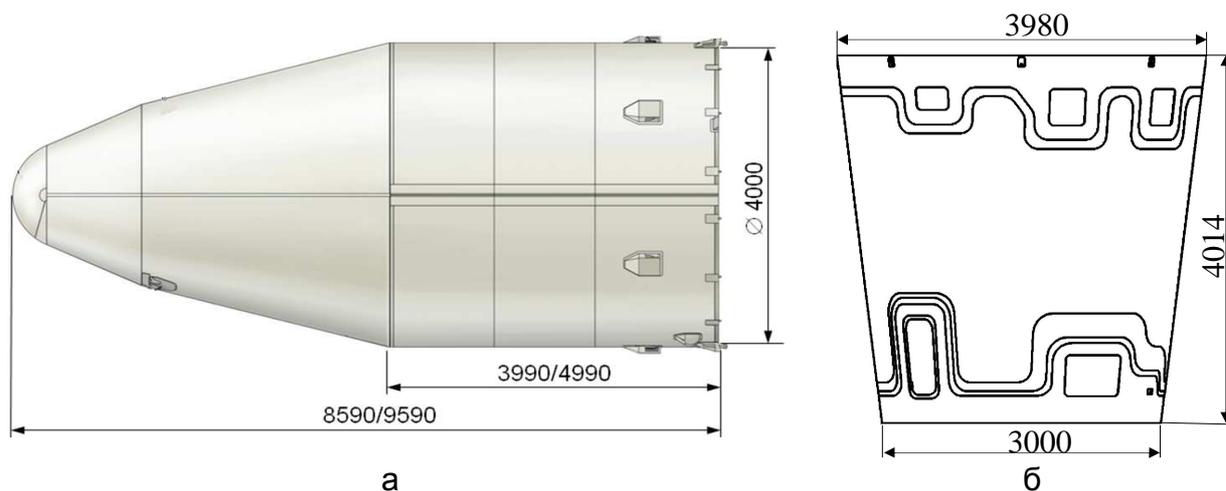


Рис. 2. Общий вид исследуемых композитных несущих отсеков ракеты-носителя «Циклон-4»:

а – головной обтекатель, б – межступенной отсек

Типовыми исходными данными при проектировании ГО и МСО РН являлись: основные технические требования, предъявляемые к проекту; ограничения по габаритным размерам; эксплуатационные условия; основные расчетные случаи, величины эксплуатационных нагрузок, коэффициенты безопасности; применяемые материалы и их ФМХ.

Синтез рациональных параметров композитного ГО и МСО сопровождался исследованием НДС их конструктивных элементов с помощью программных комплексов конечно-элементного анализа, получивших в последнее десятилетие интенсивное развитие [13, 26, 27], и реализации предложенного комплексного подхода к оптимальному проектированию рассматриваемого класса конструкций.

На рис. 3 показан пример сгенерированных конечно-элементных моделей рассматриваемых несущих отсеков головного блока.

Нагрузки рассмотрены для следующих расчетных случаев нагружения, соответствующих полету РН при выведении ПГ массой 650 кг на отлетную траекторию:

- нагружение элементов конструкции поверхностным давлением при числе Маха $M = M_{кр}$ (54 с);
- максимум аэродинамических коэффициентов (57 с);
- максимум силы лобового сопротивления (63 с);
- зона максимума скоростного напора (69 с, 71 с).

Некоторые результаты анализа НДС показаны на рис. 4 – 7.

Результаты расчетов нормированных тепловых режимов ГО с ТЗП рациональной толщины приведены в табл. 1.

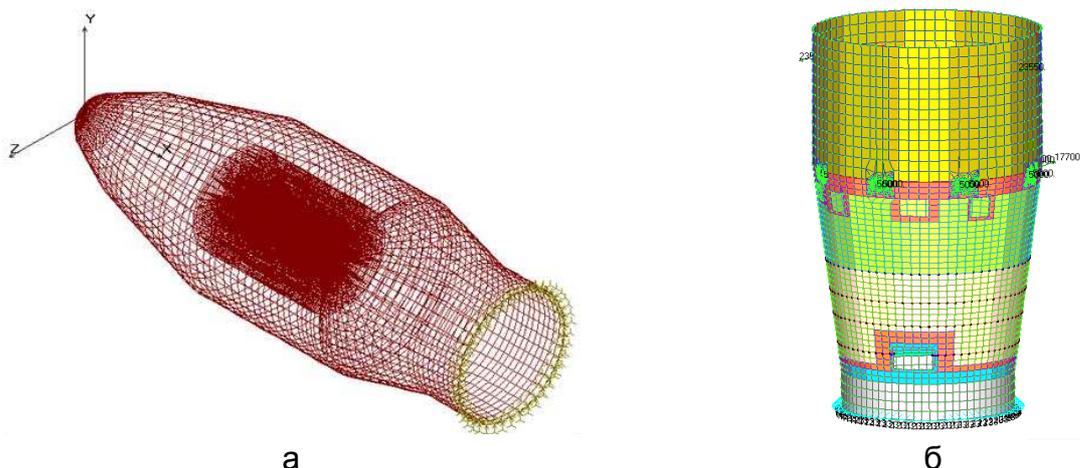


Рис. 3. Пример сгенерированных конечно-элементных моделей рассматриваемых несущих отсеков:

а – ГО в составе головного блока; б – МСО со смежным отсеком

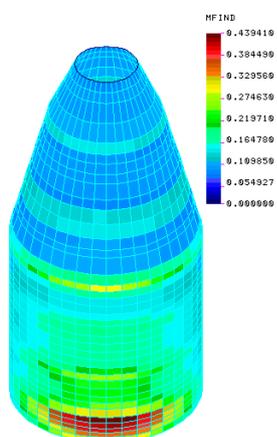


Рис. 4. Картина распределения максимального значения критерия Мизеса-Хилла в несущих обшивках головного обтекателя

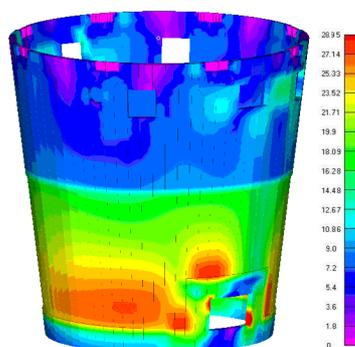


Рис. 5. Картина распределения касательных напряжений в несущих обшивках межступенного отсека

Таблица 1

Результаты расчетов температурных режимов ГО

Наименование расчетного сечения	Рациональная толщина ТЗП, мм	Максимальная температура наружной поверхности ГО, °С	Максимальная температура внутренней поверхности ГО, °С
Коническая часть ГО (угол конусности 25°)	9,3	100	56
Коническая часть ГО (угол конусности 15°)	8,1	100	56
Цилиндрическая часть ГО	4,8	100	60

В табл. 2 приведены результаты оптимизации параметров сэндвичевой КСС ГО.

Таблица 2

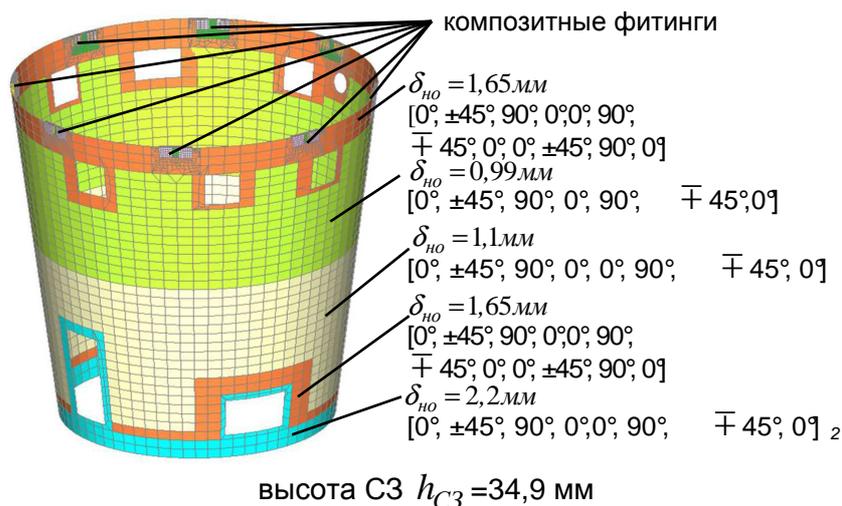
Результаты оптимизации параметров сэндвичевой КСС ГО

Показатель	Расчетные случаи нагружения				
	t=54с	t=57с	t=63с	t=69с	t=71с
Максимальное результирующее линейное перемещение u , м	0,14	0,16	0,173	0,18	0,189
Максимальное значение критерия Мизеса-Хилла для слоев, образующих несущие обшивки со схемой армирования $[0, \pm 45, 90]$, толщины которых по отсекам: $\delta_{но1} = 0,9$ мм; $\delta_{но2} = 0,4$ мм; $\delta_{но3} = 0,9$ мм; $\delta_{но4} = 0,8$ мм	0,62	0,9	0,95	0,97	0,98
Максимальные касательные напряжения в С3 Ширина стороны ячейки С3 по отсекам: $a_{c1} = 6,6$ мм; $a_{c2} = 7,2$ мм; $a_{c3} = 4,8$ мм; $a_{c4} = 7,2$ мм Коэффициент формы ячейки по отсекам $K_1=1,3$; $K_2=K_3=K_4=1$ Угол раскрытия ячейки по отсекам: $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta_4 = 60^\circ$ Высота С3 по отсекам: $h_{C31} = 15$ мм; $h_{C32} = 25$ мм; $h_{C33} = 18$ мм; $h_{C34} = 19$ мм $\tau_{xz, max}$, МПа $\tau_{yz, max}$, МПа	0,078 0,009	0,099 0,011	0,101 0,033	0,12 0,037	0,15 0,037
Максимальные приведенные напряжения в шпангоутах σ_{np} , МПа	93,2	118,7	122,5	178,8	179,2
Запас устойчивости ГО $k_{уст}$	1,55	1,2	1,15	1,13	1,1

Результатом первого этапа оптимизации параметров сэндвичевой КСС ГО явилось снижение его массы по сравнению с первоначальным вариантом на 16% (53,3 кг). Результат заключительного этапа оптимизации – дополнительное снижение массы ГО по сравнению с вариантом, в котором С3 имел ячейку правильной шестигранной формы с $a_c = 5$ мм на 5,63% (15,7 кг), а по сравнению с первоначальным вариантом – на 21% (69 кг).

На рис. 7 показаны результаты синтеза рациональных параметров рассматриваемого МСО РН «Циклон-4» в его регулярной зоне и в местах усиления эксплуатационных и технологических люков.

Одними из наиболее высоконагруженных и ответственных элементов рассматриваемого класса конструкций являются всевозможные соединительные элементы, предназначенные для передачи сосредоточенных усилий на регулярную зону несущих отсеков [28]. В настоящее время проблема расширения диапазона применения ПКМ для этих элементов, открывающих новые широкие возможности повышения их эффективности, весьма актуальна во всем мире [29].



шпангоуты: верхний – толщиной 6 мм, нижний – толщиной 8 мм, зоны усиления люков и накладка толщиной 3 мм имеют схему армирования $[0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ]_n$.

Рис. 7. Полученные рациональные параметры рассматриваемого МСО РН «Циклон-4»

Ниже представлен пример реализации предложенного комплексного подхода к синтезу рациональных параметров углепластикового фитинга, впервые разработанного при участии автора на ГП «КБ «Южное» [24, 25].

Существующий опыт по успешному внедрению ПКМ показывает, что наиболее эффективным является путь, при котором учитываются особенности соединений проектируемых композитных агрегатов. Максимальный эффект при этом достигается не только заменой металла на композит, но и за счет решения задачи синтеза рациональных КТР узлов, деталей и соединений для предварительно выбранных оптимальных параметров КСС несущих отсеков. Принципиальная блок-схема дифференциации этого сектора оптимизации в рамках предложенного подхода, реализованная ниже, показана на рис. 8.

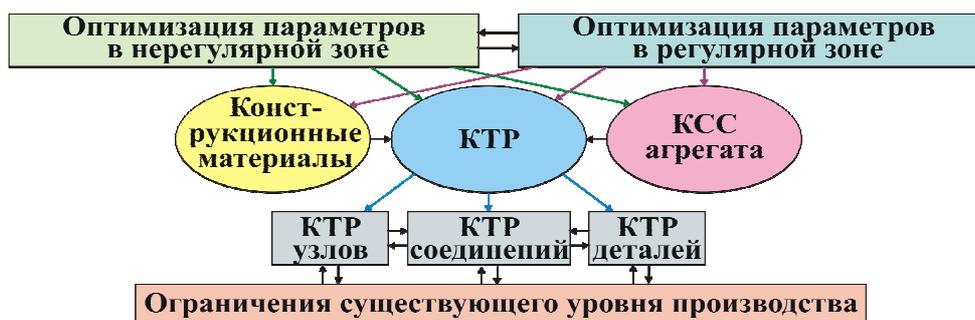


Рис. 8. Принципиальная блок-схема дифференциации принятия проектных решений при оптимизации параметров соединительных элементов несущих отсеков

Рассматриваемый фитинг предназначен для передачи сосредоточенного усилия от разрывного болта на регулярную зону несущих отсеков при их разделении или при транспортировке РН. Для эффективной работы фитинга необходимо учесть направления и интенсивность потоков усилий в его конструктивных элементах, а также выделить наиболее оптимальные формы их взаимодействия. Сложность поставленной задачи усугубляется также тем, что

одновременно с выбором рационального КТР для фитинга проектируется и создается сам ПКМ в этой зоне, обладающий в общем случае неограниченным количеством структур и схем армирования. Для решения этой задачи в комплексе программ конечно-элементного анализа проведены масштабные исследования локального НДС рассматриваемого фрагмента и реализован синтез рациональных параметров композитного фитинга. С учетом того, что жесткость шпангоута оказывает существенное влияние на искомые рациональные параметры КТР фитинга, исследовался фрагмент стыка несущего отсека, состоящий из части шпангоута и приклеенного к нему фитинга.

На рис. 9 указаны зоны с различными схемами и порядком укладки слоев фрагмента стыка шпангоута и фитинга.

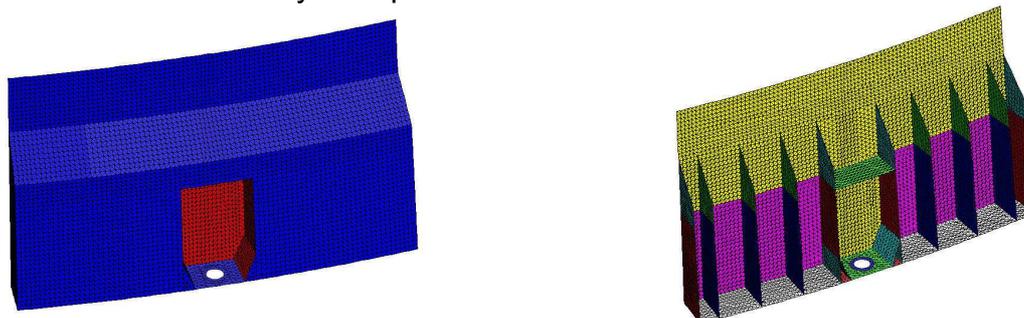


Рис. 9. Зоны с различными схемами и порядком укладки слоев на сгенерированной конечно-элементной модели фрагмента стыка несущего отсека, состоящего из части шпангоута и приклеенного к нему фитинга

На рис. 10 показан пример распределения максимальных величин принятого индекса разрушения для различных зон фрагмента стыка фитинга и шпангоута несущего отсека.

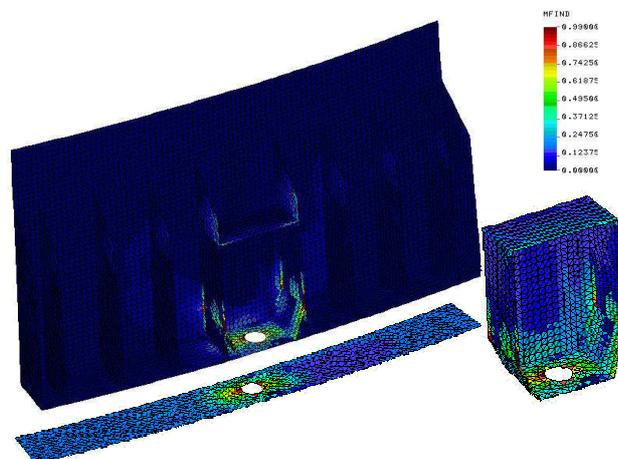


Рис. 10. Картина распределения индекса разрушения Цзя-Ву во фрагменте стыка фитинга и шпангоута, в кармане под пироболт в фитинге и по плоскости их стыка

Проведенные исследования позволили синтезировать рациональное КТР для фитинга и определить соответствующие ему параметры. Полученная конструкция фитинга и схема его членения показана на рис. 11.

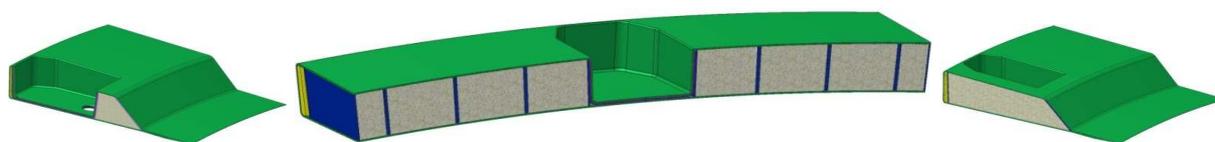


Рис. 11. Полученное рациональное КТР композитного фитинга

Фитинг представлен двумя наружными слоями препрега, изгибы противоположных краев которых образуют две перпендикулярные пары ребер. В замкнутое пространство устанавливается вставка-заполнитель из пенопласта. Сливаясь, стыки наружных слоев образуют полки, прилегающие к внутренней поверхности шпангоута отсека. Посадочное место разрывного болта в окне имеет форму, повторяющую форму вставки. При этом контур окна образуется стенками, которые перпендикулярны наружным слоям.

Для проведения натурных испытаний была изготовлена серия фитингов [25]. Результаты натурных испытаний МСО с установленными фитингами подтвердили правильность принятых для них рациональных КТР [30].

Выводы

Предложен и реализован комплексный подход к оптимальному проектированию несущих отсеков головного блока различной конструктивно-силовой схемы, отличительной чертой которого является возможность многофакторной оптимизации параметров агрегатов рассматриваемого класса при обеспечении регламентированной несущей способности при одновременном силовом и тепловом нагружении с учетом технологических, эксплуатационных, экономических и экологических ограничений, соответствующих существующему уровню их производства.

Список литературы

1. Сердюк, В. К. Проектирование средств выведения космических аппаратов [Текст] / В. К. Сердюк. – М.: Машиностроение, 2009. – 504 с.
2. Коваленко, В. А. Применение полимерных композиционных материалов в изделиях ракетно-космической техники как резерв повышения ее массовой и функциональной эффективности [Текст] / В. А. Коваленко, А. В. Кондратьев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – № 5(82). – С. 14 – 20.
3. Кондратьев, А. В. Обзор и анализ мировых тенденций и проблем расширения применения в агрегатах ракетно-космической техники полимерных композиционных материалов [Текст] / А. В. Кондратьев, В. А. Коваленко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3(67).– Х., 2011. – С. 7 – 18.
4. Анализ номенклатуры типовых композитных агрегатов ракет космического назначения и применяемых для них конструктивно-силовых схем [Текст] / А. В. Кондратьев, А. Г. Дмитренко, К. Д. Стэнилэ, А. А. Царицынский // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 3 (79). – Х., 2014.– С. 19 – 30.
5. Потапов, А. М. Сравнение головных обтекателей существующих и перспективных отечественных ракет-носителей и их зарубежных аналогов [Текст] / А. М. Потапов, В. А. Коваленко, А. В. Кондратьев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 1(114) (в печати).
6. Панин, В. Ф. Конструкции с заполнителем [Текст]: справ. / В. Ф. Панин, Ю. А. Гладков. – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.
7. Сотовые заполнители и панельные конструкции космического назначения: моногр.: в 2 т. – Т.1. Технологические несовершенства сотовых

заполнителей и конструкций [Текст] / А. В. Гайдачук, О. А. Карпикова, А. В. Кондратьев и др.; под ред. А. В. Гайдачука. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т», 2012. – 279 с.

8. Композитные сетчатые конструкции: обзор [Текст] / В. А. Барынин, В. А. Бунаков, В. В. Васильев и др. // Вопросы оборонной техники. Сер. 15. – 2001. – № 1–2. – С. 9 – 16.

9. Расчетно-экспериментальный анализ двух типов структур из углепластика для крупногабаритных ракетно-космических конструкций [Электронный ресурс] / А. А. Смердов, Л. П. Таирова, К. П. Баслык и др. // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2013. – Вып.7. – Режим доступа: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/859.html>.

10. Образцов, И. Ф. Интегральные конструкции из композиционных материалов и перспективы их применения [Текст] / И. Ф. Образцов, О. С. Сироткин, В. Б. Литвинов // Конструкции из композиционных материалов. – 2000. – № 2. – С. 78 – 84.

11. Смердов, А. А. Разработка методов проектирования композитных материалов и конструкций ракетно-космической техники: дис. ... д-ра техн. наук: 05.07.02, 05.02.01 [Текст] / Смердов Андрей Анатольевич. – М., 2007. – 410 с.

12. Кондратьев, А. В. Концепция оптимизации основных параметров конструкций авиакосмической техники из полимерных композиционных материалов [Текст] / А. В. Кондратьев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – Вып. 5(72). – С.13 – 18.

13. Оптимальное проектирование композитных сотовых конструкций авиакосмической техники [Текст]: моногр. / В. Е. Гайдачук, А. В. Кондратьев, В. В. Кириченко, В. И. Сливинский. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2011. – 172 с.

14. Баничук, Н. В. Оптимизация элементов конструкций из композиционных материалов [Текст] / Н. В. Баничук, В. В. Кобелев, Р. Б. Рикардс. – М.: Машиностроение, 1988. – 224 с.

15. Коваленко, В. А. Научные основы технологии производства агрегатов ракетно-космической техники регламентированного качества из полимерных композиционных материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.07.02; защищена 31.10.2014 / Коваленко Виктор Александрович. – Х., 2014. – 414 с.

16. Гайдачук, А. В. Научные основы безопасной технологии производства конструкций летательных аппаратов из полимерных композиционных материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.07.04 / Гайдачук Александр Витальевич. – Х., 2002. – 386 с.

17. Гайдачук, А. В. Концепция оптимизации конструкций из композиционных материалов с учетом экономической эффективности [Текст] / А. В. Гайдачук, А. В. Чесноков // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – № 9. – С. 93 – 98.

18. Карпов, Я. С. Соединения деталей и агрегатов из композиционных материалов [Текст]: моногр. / Я. С. Карпов; Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». – Х., 2006. – 359 с.

19. Оптимизация проектных параметров головного обтекателя ракеты-носителя «Циклон-4» [Текст] / В. Е. Гайдачук, В. И. Сливинский, А. В. Кондратьев, А. П. Кушнарв // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники: сб. материалов III междунар. науч.-практ. конф., Днепропетровск 27-29 мая 2009 г. / Укр. НИИ технологий машиностроения. – Дп., 2009. – С. 88 – 95.

20. Расчет головного блока ракеты-носителя «Циклон-4» при различных случаях нагружения [Текст] / В. Е. Гайдачук, В. В. Кириченко, А. В. Кондратьев и др. // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники: сб. материалов IV междунар. науч.-практ. конф., Днепропетровск 01 – 03 июня 2011 г. / Укр. НИИ технологий машиностроения. – Дп., 2011. – С. 91 – 97.

21. Кондратьев, А. В. Проектирование головных обтекателей ракет-носителей из полимерных композиционных материалов при одновременном тепловом и силовом воздействиях [Текст] / А. В. Кондратьев // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 64(4). – Х., 2010. – С. 11 – 22.

22. Basic parameters' optimization concept for composite nose fairings of launchers (Conference Paper) [Text] / V. Slyvyns'kyu, V. Gajdachuk, V. Kirichenko, A Kondratiev // 62nd International Astronautical Congress, IAC 2011. Cape Town, 3 - 7 October 2011. – Red Hook, NY: Curran, 2012. – Vol. 9. – P. 5701 – 5710.

23. Конструктивно-технологическое решение и несущая способность межступенного отсека ракеты-носителя «Циклон-4» из полимерных композиционных материалов [Текст] / А. М. Зиновьев, А. П. Кушнарев, А. В. Кондратьев и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 3(100). – С. 46 – 53.

24. Оценка несущей способности композитного фитинга системы разделения отсеков ракет-носителей [Текст] / А. В. Дегтярев, А. П. Кушнарев, А. В. Кондратьев и др. // Космическая техника. Ракетное вооружение: науч.-техн. сб. ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля». – Вып. 1(103). – Дп.: 2013. – С. 18 – 21.

25. Композитный фитинг системы разделения отсеков ракеты-носителя [Текст] / В. В. Гаврилко, А. В. Кондратьев, А. М. Потапов В. А. Коваленко // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники: сб. материалов V междунар. науч.-практ. конф., Днепропетровск 5-7 июня 2013 г. – Дп., 2013. – С. 71 – 76.

26. Применение виртуального проектирования при поэтапном снижении массы крупногабаритного головного обтекателя РН из композиционных материалов [Электронный ресурс] / С. А. Петроковский, А. Г. Бахтин, В. П. Полиновский и др. // сб. материалов XIII Российской конф. пользоват. компьютер. систем инженер. анализа MSC. Software. Москва, 20 – 21 октября 2010 г. – Режим доступа: <http://www.mscsoftware.ru> — 17.06.2014.

27. Пересыпкин, В. П. Проектирование конструкции головного блока ракеты-носителя с применением численной оптимизации MSC/Nastran [Электронный ресурс] / В. П. Пересыпкин, Е. А. Иванова, К. В. Пересыпкин // Труды Российской конференции пользователей систем MSC 2004 г. – Режим доступа: http://www.mscsoftware.ru/conf/conf_ru2004_4.

28. Конструктивно-технологические решения создания соединений головного обтекателя трехслойной сотовой конструкции из полимерных композиционных материалов / А. М. Потапов, В. А. Коваленко, В. К. Москалец и др. // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники : сб. материалов II междунар. науч.-практ. конф. / Укр. НИИ технологий машиностроения. – Дп., 2007. – С. 151 – 153.

29. Пат. 2399018 Российская Федерация. Фитинг и способ его изготовления / Буканова О. А., Самойленко Н. В., Гаврюшкин А. Ю. и др.; Заявитель и

патентообладатель ФГУП «ГКНПЦ им. М.В. Хруничева». – № 2009109597/11; заявл. 18.03.2009; опубл. 10.09.2010, Бюл. № 23. – 11 с.

30. Статические испытания опытного межступенного отсека ракеты-носителя «Циклон-4» из углепластика [Текст] / А. М. Зиновьев, А. П. Кушнарев, А. В. Кондратьев и др. // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 4(101). – С. 28 – 35.

Поступила в редакцию 12.02.15.

Комплексний підхід до оптимізації проектних параметрів несучих відсіків головного блока ракети-носія при одночасному силовому і тепловому навантаженні

Запропоновано комплексний підхід до оптимального проектування несучих відсіків головного блока ракети-носія різних конструктивно-силових схем, відмітною рисою якого є можливість багатофакторної оптимізації параметрів агрегатів розглянутого класу при забезпеченні регламентованої несучої здатності при одночасному силовому і тепловому навантаженні з урахуванням технологічних, експлуатаційних, економічних та екологічних обмежень, що відповідають існуючому рівню їх виробництва. Реалізація підходу до синтезу раціональних параметрів головного обтічника і міжступеневого відсіку ракети-носія «Циклон-4» показала його високу ефективність.

Ключові слова: концепція, оптимізація, композит, теплозахист, теплове і силове навантаження, конструктивно-силова схема, головний обтічник, міжступеневий відсік.

An integrated approach to the optimization of design parameters for bearing modules of launch vehicle fairing under the force and thermal loading

An integrated approach to optimal design of bearing modules of launch vehicle fairing with different structures. The main feature of this approach is the ability of multiple-factor optimization of parameters of considered class aggregates. The approach provided restricted load-carrying capability under force and thermal loading, taking into account technological, operational, economic and environmental limitations for existed level of its manufacture. Implementation of the approach for the synthesis of rational parameters of fairing and inter-stage modules of launch vehicle «Cyclone-4» has shown its high efficiency.

Keywords: concept, optimization, composite, thermal insulation, thermal and force loading, structure, fairing, inter-stage modules