

УДК 629.7.002.3: 624.016(043)

Канд. техн. наук А. М. Потапов, д-р техн. наук В. А. Коваленко,
д-р техн. наук А. В. Кондратьев, д-р техн. наук В. Е. Гайдачук

НАУЧНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ РАЗРАБОТКИ КОМПОЗИТНЫХ НЕСУЩИХ ОТСЕКОВ ГОЛОВНЫХ БЛОКОВ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ

Представлены некоторые основные результаты научного сопровождения разработки композитных несущих отсеков головного блока ракет-носителей. Предложена методология разработки данных агрегатов. На примере головного обтекателя и межступенного отсека ракеты-носителя «Циклон-4» показана высокая эффективность реализации предложенной методологии при выборе их рациональных конструктивно-технологических параметров.

Подано деякі основні результати наукового супроводу розроблення композитних несучих відсіків головного блока ракет-носіїв. Запропоновано методологію розроблення даних агрегатів. На прикладі головного обтічника і міжступеневого відсіку ракети-носія «Циклон-4» показано високу ефективність реалізації запропонованої методології за вибору їх раціональних конструктивно-технологічних параметрів.

Some main results of scientific support of development of launch vehicle head module composite load-bearing bays are presented. The methodology is proposed for developing these units. By the example of payload fairing and interstage bay of Cyclone-4 launch vehicle, high efficiency is shown of proposed methodology implementation when selecting their rational design and technological parameters.

Введение

Как известно, мировой рынок космических услуг, куда входит и Украина, имеет устойчивую тенденцию к ограничению числа государств, обладающих научно-техническим потенциалом для создания и развития ракетно-космических технологий [1]. В современных условиях все возрастающей конкуренции одной из основных тенденций развития ракетно-космической отрасли является повышение эффективности производимой ракетно-космической техники (РКТ). Высокая стоимость полетной массы РКТ обусловила приоритет снижения этого параметра в оценке совершенства ее объектов.

Поиск путей эффективного снижения массы изделий рассматриваемого класса техники особенно в последние два десятилетия привел к постоянно нарастающей тенденции использования в ответственных ее агрегатах полимерных композиционных материалов (ПКМ), имеющих ряд уникальных характеристик [2].

Аналитический обзор номенклатуры типовых крупногабаритных оболочечных композитных агрегатов ракет-носителей

(РН), а также исследование накопленного отечественного и зарубежного опыта их эксплуатации [3, 4] показали, что в подавляющем большинстве они применяются в головных обтекателях (ГО) и межступенных отсеках (МСО). При этом для них достаточно хорошо отработаны конструктивно-силовые схемы (КСС) и соответствующие им конструктивно-технологические решения (КТР).

В настоящее время одной из основных тенденций развития агрегатов РКТ является стремление корпораций, разрабатывающих перспективные РН, к существенному увеличению размеров ГО, что в итоге позволяет размещать в нем крупногабаритный полезный груз, а также обеспечение одновременного группового выведения нескольких космических аппаратов [4]. Это, в свою очередь, обуславливает рост размеров и степени нагруженности не только ГО, но и всех связанных с ним несущих отсеков головного блока РН.

Поэтому особую актуальность приобретают вопросы научного обеспечения реализации потенциальных возможностей повышения массовой эффективности применяе-

мых КСС и КТР при регламентированной несущей способности с учетом всего разнородного спектра внешних воздействий.

Изложение основного материала

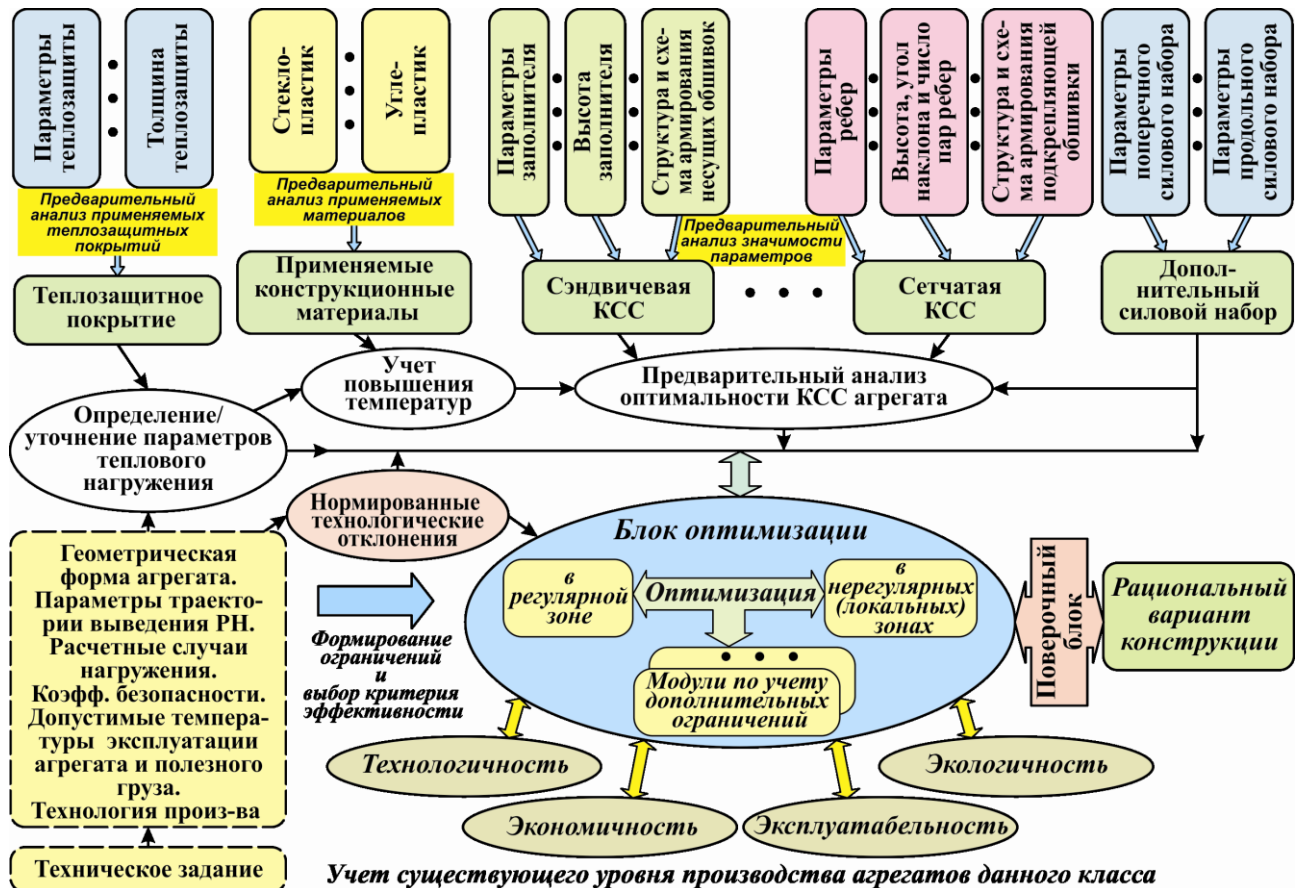
Целенаправленный анализ отечественного и зарубежного опыта оптимального проектирования композитных несущих отсеков головного блока РН и современный уровень развития интегрированных компьютерных технологий позволили подойти к решению проблемы повышения эффективности конструкций агрегатов рассматриваемого класса путем разработки комплексного подхода к их проектированию в рамках общей концепции оптимизации параметров авиакосмической техники [5, 6].

На рис. 1 представлена принципиальная блок-схема предложенного подхода, отличительной чертой которого является возможность структурно-параметрического синтеза рациональных конструкций несущих отсеков головного блока РН при одновременном силовом и тепловом нагружении с учетом технологических, эксплуата-

ционных, экономических и экологических ограничений, соответствующих существующему уровню их производства.

Варьируемые параметры отличаются для различных КСС. Так, у композитных 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 сотового заполнителя. Так, путем варьирования угла раскрытия ячейки сотов неправильной шестигранной формы и коэффициента ее формы можно оптимизировать структуру заполнителя, тем самым дополнительно повысив эффективность сэндвичевых конструкций на его основе [5, 6].



Учет существующего уровня производства агрегатов данного класса

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

Наконец, для сетчатых (изогридных, анизогридных) конструкций варьируемые параметры – высота, ширина, углы наклона и число ребер, а для агрегатов на основе интегральных стрингерных панелей – число ребер (или шаг их расположения) и параметры, определяющие размеры поперечного сечения и структуру ребра.

К числу переменных проектирования могут относиться и тип КСС, и вид конструкционного материала. Однако организация оптимизации с такими варьируемыми параметрами весьма затруднительна. В этом случае гораздо эффективнее провести серию оптимизационных расчетов с фиксированными значениями этих параметров и выбрать наилучший из полученных результатов. В работе [7] такой подход называется поливариантной моделью оптимизации, а зафиксированные тип КСС и вид материала называются анализируемыми параметрами.

Для сокращения пространств поиска путем минимизации числа варьируемых параметров или разделения их оптимизации на этапы в предлагаемой блок-схеме предусмотрена возможность предварительного анализа значимости параметров каждой КСС. Наряду с уменьшением пространства поиска можно также проводить анализ эффективности армирования несущих обшивок за счет возможности уменьшения числа типов различных монослоев. Подобный подход изложен, например, в нашей работе [8], в которой представлены некоторые результаты исследований эффективности схем армирования цилиндрической оболочки из ПКМ, позволившие существенно упростить выбор ее оптимальных параметров.

Задача оптимального проектирования предусматривает прежде всего определение областей эффективного применения каждой из рассматриваемых КСС. Для этой цели предусмотрен блок предварительного анализа оптимальности КСС агрегата, в котором сопоставляются предельные возможности различных КСС и даются рекомендации, наиболее подходящие для каж-

дой конкретной задачи. Иллюстрацией к сказанному могут служить полученные в [7] результаты сравнительного анализа оптимальных сэндвичевых и сетчатых КСС несущих отсеков РН, свидетельствующие о том, что эти КСС достаточно близки по своей массовой эффективности и постоянное совершенствование технологии (уменьшение массы клея, повышение характеристик материала ребер) способно приводить к временному преимуществу той или иной схемы.

В рамках предложенного подхода к числу переменных проектирования могут также относиться параметры продольного и (или) поперечного силового набора.

Такая ситуация может иметь место, например, при рассмотрении несущих отсеков РН, когда разделение ступеней проводится с помощью пироболтов. Примерами поперечного силового набора могут служить силовые и стыковые шпангоуты. 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 агрегатов рассматриваемого класса.

Также 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, возникающие в процессе производства конструкций рассматриваемого класса, и конкретный алгоритм учета их влияния [6] включены в блок предварительного анализа оптимальности КСС и напрямую в оптимизационный блок.

Учитывая, что несущие отсеки головного блока РН подвержены интенсивному тепловому воздействию, при оптимальном проектировании необходимо обеспечить не

только несущую способность их конструкций с учетом наличия повышенных температур, но и допустимые для эксплуатации диапазоны температур их наружной и внутренней поверхностей. Поэтому постановка задачи оптимального проектирования рассматриваемого класса конструкций, в особенности ГО, предусматривает необходимость одновременной оптимизации параметров их КСС и теплозащитного покрытия (ТЗП). В качестве варьируемых параметров в рамках предложенного подхода используются толщина ТЗП в различных зонах конструкции и другие его параметры.

Температурное воздействие на агрегаты рассматриваемого класса вызывает в применяемых конструкционных материалах также нелинейные физико-химические явления, которые часто ведут к снижению физико-механических характеристик (ФМХ) ПКМ, оценка влияния которого в рамках предложенного подхода осуществляется в соответствующем блоке на основе существующих методик [5, 6].

Все переменные проектирования поэтапно поступают в оптимизационный блок, в котором решается задача выбора рационального соотношения необходимой толщины теплозащиты, 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 при соблюдении дополнительных функциональных ограничений, связанных с технологическими, экономическими, экологическими и другими факторами. При этом оптимизация проводится для всех регламентированных расчетных случаев нагружения с учетом возможных механизмов разрушения и потери устойчивости конструктивных элементов. В результате полученные рациональные параметры конструкции не являются оптималь-

ными 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, построения соответствующих алгоритмов выполняются на основе уже существующих методик [5, 6] и реализуются в оптимизационном блоке в виде отдельных модулей.

В блоке оптимизации последовательно сначала решается задача поиска рациональных параметров конструкции в ее регулярной зоне. Последующие этапы ее решения 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 термического и силового нагружения люков, стыков и т.п.

При оптимизации в качестве целевой функции может выступать выбранный в соответствии с техническим заданием критерий эффективности. Одним из важнейших критериев эффективности конструкций летательных аппаратов, всесторонне характеризующим их совершенство, как считает ряд авторов, является экономическая эффективность, которая для объектов аэрокосмической отрасли обычно трансформируется в критерий минимума массы [5, 6].

После определения рациональных параметров конструкции, полученные данные поступают в поверочный блок оптимизации, где могут проводиться всевозможные расчеты. Наличие данного блока является обязательным условием, так как технически невозможно реализовать оптимизацию параметров объекта, представленного во

всех тонкостях его конструктивных параметров.

Весь комплекс исследований и их основных результатов представлен в виде анализа типовых отечественных объектов РКТ, созданных на Государственном пред-

приятии «Конструкторское бюро «Южное» [5, 6, 8 – 10].

В качестве объектов исследования рассмотрены ГО и МСО, входящие в головной блок РН «Циклон-4» (рис. 2).

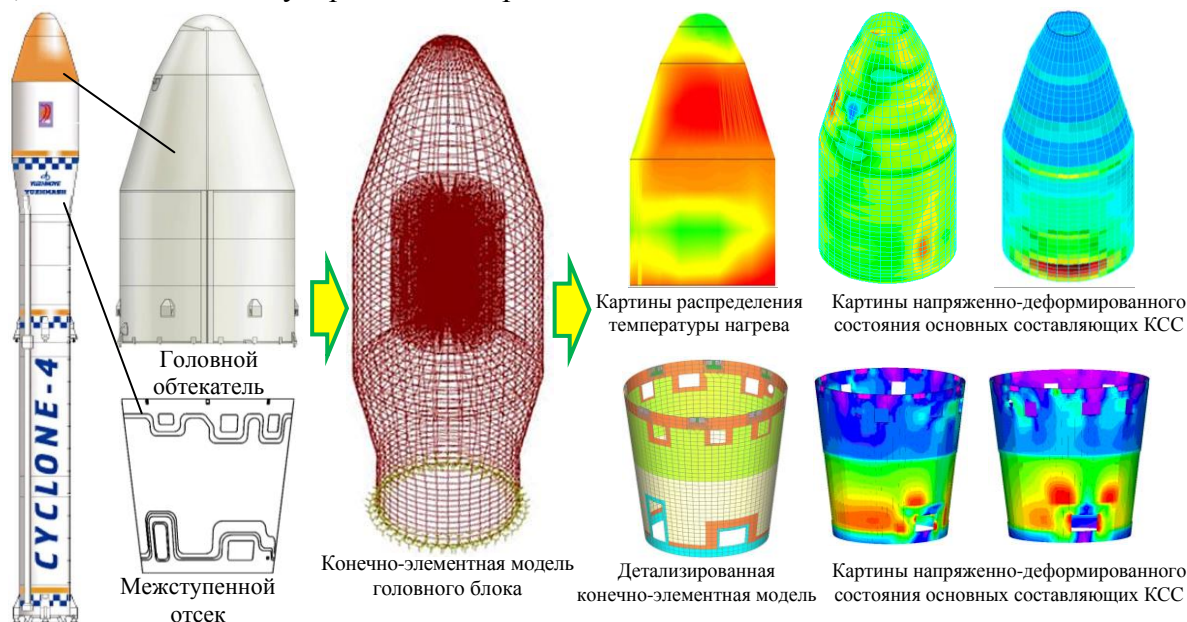


Рис. 2. Несущие композитные отсеки РН «Циклон-4», применительно к которым был реализован предложенный проектный комплекс оптимизации конструктивно-технологических параметров

Результаты исследований

Типовыми исходными данными при проектировании ГО и МСО РН являлись: основные технические требования, предъявляемые к проекту; ограничения по габаритам; эксплуатационные условия; основные расчетные случаи, значения эксплуатационных нагрузок, коэффициенты безопасности; применяемые материалы и их ФМХ. Так, ГО представляет собой цилиндробиконический (включает конусы 25° и 15°) отсек длиной 8590 (9590) мм диаметром 4000 мм, имеющий сферический наконечник радиусом 720 мм.

Корпус ГО состоит из двух полуоболочек сэндвичевой КСС, которые крепятся между собой механическими замками системы разделения продольного стыка ГО. Все секции ГО соединены между собой при помощи 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. Отсек имеет сэндвичевую КСС и состоит из корпуса, верхнего и нижнего стыковочных шпангоутов. Сэндвичевый корпус состоит из углепластиковых несущих обшивок и сотового наполнителя из полимерной бумаги Nomex.

Нагрузки рассмотрены для следующих расчетных случаев нагружения, соответствующих транспортировке РН и ее полету на активном участке траектории (АУТ) при выведении полезного груза 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 (69,71 с).

Синтез рациональных параметров композитных ГО и МСО сопровождался исследованием напряженно-деформированного состояния (НДС) их конструктивных элементов с помощью программных комплексов конечно-элементного анализа, получивших в последнее десятилетие интенсив-

ное развитие [5, 6], и реализацией предложенного комплексного подхода к оптимальному проектированию рассматриваемого класса конструкций.

В таблице приведены результаты оптимизации параметров сэндвичевой КСС ГО.

Результаты оптимизации параметров сэндвичевой КСС ГО

Показатель	Расчетные случаи нагружения				
	t=54 с	t=57 с	t=63 с	t=69 с	t=71 с
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	0,62	0,9	0,95	0,97	0,98
Максимальные касательные напряжения в сотах,* МПа:					
τ_{xz}	0,078	0,099	0,101	0,12	0,15
τ_{yz}	0,009	0,011	0,033	0,037	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

*Толщины несущих обшивок по отсекам $\delta_{но1}=0,9$ мм, $\delta_{но2}=0,4$ мм, $\delta_{но3}=0,9$ мм, $\delta_{но4}=0,8$ мм; ширина стороны ячейки сотов по отсекам $a_{с1}=6,6$ мм, $a_{с2}=7,2$ мм, $a_{с3}=4,8$ мм, $a_{с4}=7,2$ мм; коэффициент формы – $K_1=1,3$; $K_2=K_3=K_4=1$; угол раскрытия ячейки во всех отсеках $\beta=60^\circ$; высота сотового заполнителя по отсекам $h_{сз1}=15$ мм, $h_{сз2}=25$ мм, $h_{сз3}=18$ мм, $h_{сз4}=19$ мм.

В качестве ограничений при оптимизации, касающихся несущей способности конструктивных элементов, рассматриваемой КСС ГО, для слоев, образующих несущие обшивки, был использован послойный анализ по критерию Мизеса-Хилла. При определении потребных запасов прочности сотового заполнителя использовались прочностные характеристики приведенного ортотропного заполнителя. Для изотропных материалов был использован критерий Мизеса. В качестве активных ограничений в блоке выступали также запасы устойчивости моделируемого объекта в целом $k_{уст}$ и возможные формы местных потерь устойчивости конструктивных элементов.

При определении ограничений, обеспечивающих допустимые диапазоны температур сэндвичевых несущих отсеков с сотовым заполнителем, были использованы результаты наших исследований, посвященные определению эффективного коэффициента теплопроводности сотов [5].

Результатом первого этапа оптимизации параметров ГО явилось снижение его массы по сравнению с базовым вариантом на 16% (53,3 кг), а заключительного – дополнительное снижение массы ГО по сравнению с вариантом, в котором соты имели ячейку правильной шестигранной формы, на 5,63% (15,7 кг), а по сравнению с базовым вариантом – на 21 % (69 кг).

Примером реализации блоков оптимизации для определения рациональных параметров в локальных зонах рассматриваемого класса конструкций могут служить результаты синтеза рациональных параметров МСО РН «Циклон-4» в местах усиления эксплуатационных и технологических люков (рис. 3) [5, 10]: высота сотового заполнителя 34,9 мм; шпангоуты: верхний – толщиной 6 мм; нижний – толщиной 8 мм; зоны усиления люков и накладка толщиной 3 мм, имеющие схему армирования $[0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ]_n$.

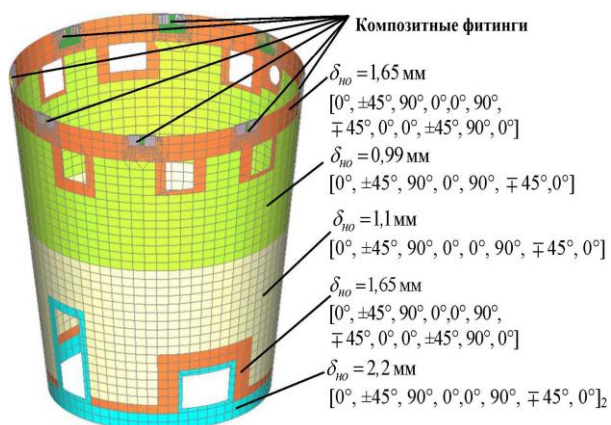


Рис. 3. МСО РН «Циклон-4»

Одними из наиболее высоконагруженных и ответственных элементов являются всевозможные соединительные элементы, предназначенные для передачи сосредоточенных усилий на регулярную зону несущих отсеков. Успешное внедрение ПКМ, как показывает существующий опыт, осуществляется при учете особенностей соединений проектируемых композитных агрегатов [11, 12]. 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 [5, 6].

Иллюстрацией к сказанному может служить синтез рациональных конструктивно-технологических параметров впервые разработанного композитного фитинга системы разделения несущих отсеков РН.

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. Для решения этой задачи были проведены масштабные исследования локального НДС фрагмента стыка фитинга и шпангоута несущего отсека и реализован синтез рациональных параметров композитного фитинга [13]. Исследования позволили разработать для фитинга конструкцию (рис. 4) и способ его изготовления, которые защищены патентом [14].

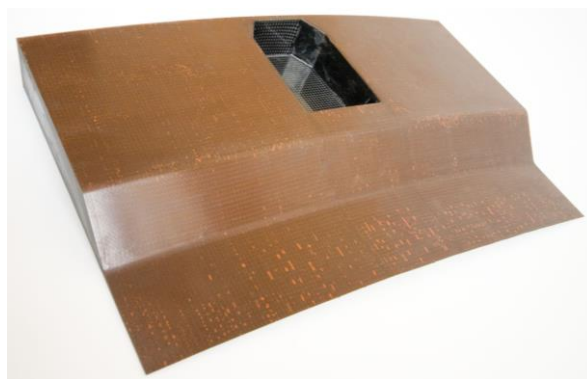


Рис. 4. Композитный фитинг разделения несущих отсеков РН

Как отмечалось выше, на Государственном предприятии «Конструкторское бюро «Южное» постоянно расширяется диапазон эффективных КТР агрегатов РКТ из ПКМ. Примером такой разработки может служить опытный МСО РН «Циклон-4» из углепластика (рис. 5).

В ряде работ [5, 10, 15] подробно описаны КТР этого агрегата и технологический процесс его изготовления, а также приведены результаты неразрушающего контроля.

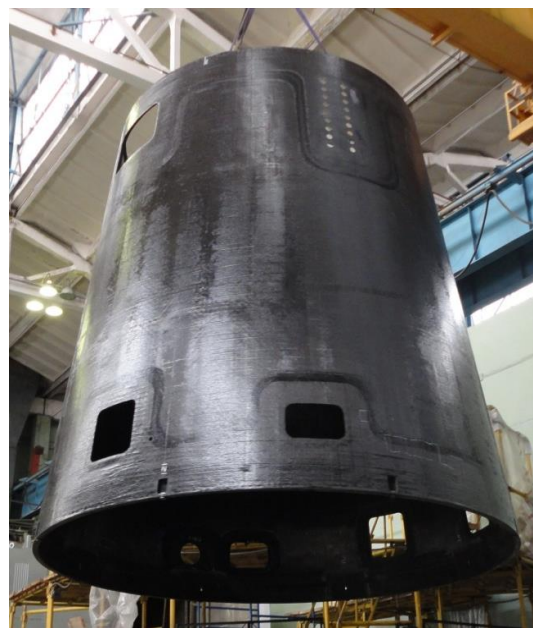


Рис. 5. Композитный МСО РН «Циклон-4»

По результатам анализа технологии изготовления [10] и статических испытаний композитного МСО на Государственном предприятии «Конструкторское бюро «Южное» проведены следующие мероприятия [16]:

– подтверждена эффективность синтезированных рациональных конструктивно-

технологических параметров композитного МСО;

– выполнена программа прочностных испытаний МСО из ПКМ в полном объеме. Установлено, что на внутренней поверхности корпуса в районе нижнего шпангоута и окантовок люков имеются одиночные продольные трещины в гелькоуте, зоны его выкрашивания между плоскостями, а также обнаружены отдельные раковины в связующем с оголением углепластика на радиусе перехода законцовки верхнего шпангоута на внутреннюю поверхность оболочки. Остальные элементы конструкции корпуса видимых изменений не имели;

– показано постоянство суммарной площади дефектов (непроклея) в конструкции МСО из ПКМ в результате статических испытаний.

Выводы

1. Предложен комплексный подход к оптимальному проектированию несущих отсеков головного блока РН различных КСС, 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.

2. Реализация предложенного подхода при минимизации массы сэндвичевой КСС ГО РН «Циклон-4» при одновременном тепловом и силовом воздействиях позволила определить рациональное соотношение толщины теплозащиты, наружной и внутренней несущих обшивок, высоты сотового заполнителя и параметров его ячейки в каждом из отсеков. Результатом оптимизации параметров ГО явилось снижение его массы по сравнению с базовым вариантом более чем на 20%.

3. На примере МСО РН «Циклон-4» показана реализация предложенного подхода при выборе его рациональных конструктивно-технологических параметров в регулярной и локальных зонах усиления.

4. На примере композитного фитинга системы разделения несущих отсеков РН показана реализация принципа дифференци-

ции сектора оптимизации в рамках предложенного подхода, позволившая синтезировать его рациональные конструктивно-технологические параметры.

5. Оценка несущей способности и натурные испытания подтвердили рациональность принятых для композитного фитинга и МСО конструктивно-технологических решений.

6. Полученные результаты в комплексе формируют собой научные основы рационального проектирования композитных несущих отсеков головного блока РН при одновременном силовом и тепловом нагружении с учетом технологических, эксплуатационных, экономических и экологических ограничений, соответствующих существующему уровню их производства, и могут быть использованы при проектировании других несущих оболочечных агрегатов.

Список использованной литературы

1. Дегтярев А. В. Ракетная техника. Проблемы и перспективы. Избранные научно-технические публикации. – Днепропетровск: АРТ-ПРЕСС, 2014. – 420 с.

2. Коваленко В. А., Кондратьев А. В. Применение полимерных композиционных материалов в изделиях ракетно-космической техники как резерв повышения ее массовой и функциональной эффективности // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2011. – №5(82). – С. 14 – 20.

3. Кондратьев А. В. и др. Анализ номенклатуры типовых композитных агрегатов ракет космического назначения и применяемых для них конструктивно-силовых схем / А. В. Кондратьев, А. Г. Дмитренко, К. Д. Стэнлиэ, 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). – Харьков, 2014. – С. 19 – 30.

4. Потапов А. М. и др. Сравнение головных обтекателей существующих и перспективных отечественных ракет-носителей и их зарубежных аналогов / А. М. Потапов, В. А. Коваленко, А. В. Кондратьев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2015. – № 1(118). – С. 35 – 43.

5. Гайдачук А. В. и др. Методология разработки эффективных конструктивно-технологических решений композитных

агрегатов ракетно-космической техники: Монография в 2-х т. Т. 2. Синтез параметров композитных агрегатов ракетно-космической техники при разнородном нагружении / А. В. Гайдачук, В. Е. Гайдачук, А. В. Кондратьев, В. А. Коваленко, В. В. Кириченко, А. М. Потапов / Под ред. А. В. Гайдачука. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2016. – 250 с.

6. Гайдачук А. В. и др. Методология разработки эффективных конструктивно-технологических решений композитных агрегатов ракетно-космической техники: Монография в 2-х т. Т. 1. Создание агрегатов ракетно-космической техники регламентированного качества из полимерных композиционных материалов / А. В. Гайдачук, В. Е. Гайдачук, А. В. Кондратьев, В. А. Коваленко, В. В. Кириченко, А. М. Потапов / Под ред. А. В. Гайдачука. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2016. – 263 с.

7. Смердов А. А. Разработка методов проектирования композитных материалов и конструкций ракетно-космической техники: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.07.02, 05.02.01. – М., 2007. – 410 с.

8. Slyvyns'kyu V. et al. Basic parameters' optimization concept for composite nose fairings of launchers / 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.

9. Гайдачук В. Е. и др. Оптимизация проектных параметров головного обтекателя ракеты-носителя «Циклон-4» / 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.-практич. конф., Днепропетровск, 27-29 мая 2009 г. – Днепропетровск, 2009. – С. 88 – 95.

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

11. Карпов Я. С. Соединения деталей и агрегатов из композиционных материалов: Монография. – Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2006. – 359 с.

12. Кондратьев А. В. Оптимизация по массе нерегулярных зон головного обтекателя ракеты-носителя // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 47(4). – Харьков, 2006. – С. 126 – 133.

13. Дегтярев А. В. и др. Оценка несущей способности композитного фитинга системы разделения отсеков ракет-носителей / А. В. Дегтярев, А. П. Кушнарв, В. В. Гаврилко, В. А. Коваленко, А. В. Кондратьев, А. М. Потапов // Космическая техника. Ракетное вооружение: Сб. науч.-техн. ст. – 2013. – Вып. 1. – Днепропетровск: ГП «КБ «Южное». – С. 18 – 21.

14. Пат. 81537 UA, МПК (2013.01) F42B 15/36 (2006.01) B64D 1/00 Фітинг тришарової оболонки ракети / О. М. Зінов'єв, О. П. Кузнецов, В. В. Гаврилко, О. М. Потапов, В. О. Коваленко та ін.; Заявитель и патентообладатель ТОВ НВФ «Дніпротехсервіс», ДП «Конструкторське бюро «Південне». – №и 2012 11210; Заявлено 27.09.2012; Опубл. 10.07.13, Бюл. 13. – 4 с.

15. Зиновьев А. М. и др. Технология изготовления корпуса опытного крупногабаритного межступенного отсека ракеты-носителя «Циклон-4» из углепластиков / А. М. Зиновьев, А. П. Кушнарв, А. В. Кондратьев, А. М. Потапов, А. П. Кузнецов, В. А. Коваленко // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: Сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 2 (74). – Харьков, 2013. – С. 7 – 17.

16. Зиновьев А. М. и др. Статические испытания опытного межступенного отсека ракеты-носителя «Циклон-4» из углепластика / А. М. Зиновьев, А. П. Кушнарв, А. В. Кондратьев, А. М. Потапов, А. П. Кузнецов, В. А. Коваленко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 4(101). – С. 28 – 35.

Статья поступила 16.06.2017