

Методика формирования конструктивно-силовой схемы адаптера космического аппарата для удовлетворения требований динамической совместимости методами топологической и параметрической оптимизации

© А.А. Боровиков¹, О.Н. Тушев²

¹АО «ВПК «НПО машиностроения», г. Реутов, Московская обл., 143966, Россия

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

В настоящее время разработчики ракет-носителей предъявляют требование динамической совместимости космического аппарата со средством выведения. Оно заключается в ограничении нижней границы первого поперечного и первого продольного основных тонов собственных колебаний космического аппарата с адаптером относительно жесткого основания. Одна из задач, которую необходимо решить для выполнения данного требования, — формирование конструктивно-силовой схемы адаптера космического аппарата. Традиционное проектирование адаптера заключается в разработке его конструкции на основе аналогов и проведении поверочных расчетов с последующей доработкой конструкции для удовлетворения прочностных и жесткостных требований. Однако при таком подходе затрачивается много времени и сложно учитывать постоянное изменение исходных данных на начальном этапе проектирования. В статье приведена методика, позволяющая оперативно формировать конструктивно-силовую схему адаптера, облик которой определяется в большей степени расчетным путем с помощью методов топологической и параметрической оптимизации. Применение предлагаемой методики показано на примере разработки адаптера перспективного космического аппарата. Получаемые результаты целесообразно использовать как исходные данные и рекомендации при конструировании адаптера, особенно на начальных этапах проектирования.

Ключевые слова: конструктивно-силовая схема, адаптер космического аппарата, топологическая оптимизация, параметрическая оптимизация, оптимизация конструкции

Введение. При проектировании автоматического космического аппарата (КА) одним из определяющих проектных требований, предъявляемых к его конструкции, является обеспечение динамической совместимости КА с ракетой-носителем (РН) [1]. Это необходимо для ограничения динамической связи КА с РН. Как правило, требуется задать нижнюю границу допустимых значений собственных частот в поперечном и в продольном направлении низших основных (фундаментальных) тонов колебаний КА, установленного на адаптер (блок космического аппарата — далее БКА), и закрепленного по штатным узлам крепления адаптера к разгонному блоку (или верхней ступени РН) относительно жесткого основания.

Требование динамической совместимости задает разработчик РН [2–5]. Для его выполнения нужно решить задачу формирования основных параметров конструктивно-силовой схемы (КСС) БКА. Как правило, на практике ее можно разделить на две отдельные (см. формулу Дункерли (Dunkerley) [1]) по определению параметров КСС:

- корпуса КА (характеристики силовых сотовых панелей, количество и положение межпанельных кронштейнов и т. д.) [6];
- адаптера (материал, конструкция шпангоутов, характеристики силового набора, толщина обечайки и т. д.) [7].

Рассмотрим решение задачи по формированию КСС адаптера.

Подробный обзор применяемых конструкций адаптеров представлен в статье [8], согласно которой адаптеры предлагается классифицировать по количеству запускаемых КА:

- адаптеры КА для одиночного запуска [2];
- адаптеры КА для группового запуска (диспенсеры) [9, 10].

Адаптеры КА для одиночного запуска обычно имеют два силовых шпангоута, один из них обеспечивает механический интерфейс со средством выведения, а другой служит механическим интерфейсом для крепления КА. Соединяющая шпангоуты конструкция может быть следующих типов:

- стержневая из металла (ферма) [11];
- металлическая обечайка (с подкрепляющим силовым набором, если будет необходимо) [2];
- углепластиковая обечайка (см. адаптеры PAS 937C, PAS 1194C [4], SpaceX payload attach fitting [5]);
- обечайка из «сэндвич-панелей» [12];
- сетчатая (изогридная) [13];
- монолитная (например, у адаптеров для РН Delta II [8]).

Рассматриваемая методика предназначена для формирования КСС адаптера одиночного запуска КА, состоящего из двух шпангоутов, соединенных металлической обечайкой, подкрепленной силовым набором. Конструкция такого типа обычно отличается меньшим массовым совершенством, чем, например, конструкции, изготавливаемые из углепластика или из сэндвич-панелей. Однако в случае выведения крупногабаритных КА малой массы, которые занимают практически весь полезный объем под обтекателем, массовое совершенство конструкции адаптера будет не столь важным. Это обусловлено тем, что для размещения попутной нагрузки остается очень мало места, а значит, резерв массы полезной нагрузки становится достаточно большим, чтобы использовать конструкции технологически более простые и дешевые, даже в ущерб общей массе БКА. Основными преимуществами конструкции адаптера выбранного типа являются простота изготовления, меньшая стоимость, чем конструкций других типов, а также высокая степень ремонтпригодности.

Традиционное проектирование адаптера заключается в разработке предварительного варианта (вариантов) конструкции по существующим аналогам и в последующей ее доработке с учетом результатов расчетов на собственные частоты, прочность и устойчивость.

Главным недостатком такого подхода является то, что КСС сначала разрабатывается, а уже затем проверяется расчетами, что приводит к последующим ее доработкам вплоть до полного изменения КСС. Как правило, доработка заключается во введении новых силовых элементов или увеличении толщин старых, например, обечайки или ребер. Такой процесс занимает продолжительное время, потому что необходимо понять, где вводить дополнительные силовые элементы, как и какие именно изменять толщины. Традиционный метод проектирования, как правило, является многоитерационным.

Предлагаемая методика позволяет расчетным путем сформировать КСС адаптера, удовлетворяющую требованиям динамической совместимости КА с РН. Благодаря этому исключается необходимость вводить какие-либо дополнительные изменения в конструкцию, связанные с заданными требованиями.

Описание методики формирования конструктивно-силовой схемы адаптера. Эта методика предназначена для оперативного формирования расчетным путем КСС металлического адаптера оболочечного типа с подкрепляющим силовым набором. Ее необходимо применять на начальных этапах проектирования КА в условиях неопределенности и изменчивости исходных данных. Полученную информацию о КСС целесообразно использовать для детального конструирования адаптера.

Главная особенность методики заключается в использовании метода SIMP топологической оптимизации [14, 15] для определения мест установки и типов элементов подкрепляющего продольного силового набора.

В оптимизационных расчетах с одной конечно-элементной моделью (КЭМ) применяются расчетные случаи разных типов: на собственные частоты, прочность и устойчивость. Однако на практике КЭМ для расчетов нагрузок, прочности, устойчивости, собственных частот и форм, как правило, различаются, а также могут различаться и описания граничных условий. Поскольку данная методика предназначена для удовлетворения требований динамической совместимости (требованиям по частотам собственных колебаний), КЭМ разрабатывается по принятым правилам моделирования для задач на собственные частоты и формы. В связи с этим результаты расчетов на прочность и устойчивость, получаемые в процессе оптимизации, могут отличаться от результатов, получаемых по КЭМ, предназначенным для определения собственных частот и форм. Но поскольку

в методике рассматривается общая схема конструкции без ее подробной детализации (описания клепочных соединений, сварки, фасок, скруглений и т. п.), использование одной КЭМ для расчета разных типов вполне допустимо.

Кроме того, граничные условия при наземном транспортировании учитываются только частично: рассматриваемая методика не позволяет учитывать второй пояс крепления БКА, расположенный на КА, поэтому БКА крепится консольно по нижнему шпангоуту, что приводит к завышенным нагрузкам. Однако на начальном этапе проектирования вследствие большого числа неопределенностей такое допущение позволительно принять.

Для применения методики необходимы следующие исходные данные (ИД):

- диаметры верхнего и нижнего шпангоутов, а также их минимальная строительная высота (определяется механическими интерфейсами средства выведения и КА, а также из условия прочности крепежных узлов);

- высота адаптера КА;

- предварительные места установки пироболтов, толкателей и крепежных элементов;

- массово-центровочные и инерционные характеристики (МЦИХ) КА;

- требования динамической совместимости КА с РН;

- нагрузки, действующие на БКА на всех этапах эксплуатации.

Формирование КСС адаптера состоит из нескольких последовательных этапов. Разделение процесса оптимизации на несколько этапов и выбор ее типа (топологическая, формы или параметрическая) — важная задача. Но, к сожалению, выбору последовательности этих этапов не уделяют должного внимания, а ограничиваются лишь общей схемой получения оптимальной конструкции [16]:

- 1) проведение топологической оптимизации с целью определения рациональной КСС;

- 2) выполнение инженерной интерпретации результатов топологической оптимизации;

- 3) использование оптимизации формы для уточнения границ конструкции;

- 4) осуществление параметрической оптимизации для детальной проработки конструкции: определение толщин, площадей поперечных сечений балок и т. п.

Следует, однако, заметить, что для рассматриваемой задачи использование такой схемы может приводить к созданию нерациональных конструкций. В связи с этим была предложена иная схема оптимизации (рис. 1).



Рис. 1. Этапы формирования КСС адаптера

Такое разделение процесса оптимизации обусловлено следующими основными причинами:

– одновременное использование топологической и параметрической оптимизации может приводить к нежелательным или даже к отрицательным результатам вследствие необходимости применения разных методов оптимизации (методы критериев оптимальности и методы нелинейного математического программирования);

– разбиение начального этапа топологической оптимизации на два позволяет значительно сократить время расчета;

– раздельное проведение топологической оптимизации для определения мест установки силового набора и оптимизации конструкции шпангоутов позволяет качественнее настраивать алгоритм, что приводит к лучшим результатам;

– определение предварительных толщин элементов КСС обеспечивает получение корректного результата топологической оптимизации шпангоутов.

Топологическую оптимизацию следует проводить с помощью метода SIMP, параметрическую — в соответствии с рекомендациями разработчика используемого конечно-элементного программного комплекса. Правильное построение начальной конечно-элементной модели (КЭМ-1) позволит оперативно получать модели следующих этапов путем ее незначительной корректировки.

Рассмотрим основные принципы построения начальной КЭМ, которая должна состоять из следующих составных частей:

- КЭМ шпангоутов (нижнего и верхнего);
- КЭМ обечайки;
- КЭМ проектной области (области возможного размещения силового набора);
- КЭМ КА.

Шпангоуты должны иметь сплошное прямоугольное сечение, размеры которого соответствуют ИД. При этом необходимо предусмотреть, какие области будут оптимизироваться, а какие останутся неизменными (рис. 2). Боковые стенки δ_1 и δ_3 необходимы для сохранения строительной высоты шпангоутов. Размеры δ_1 , δ_2 и δ_3 выбираются исходя из условий технологичности и прочности стенок, а также они могут быть выбраны из аналогичных изделий. Шпангоуты следует моделировать твердотельными конечными элементами (КЭ) типа HEX [17].

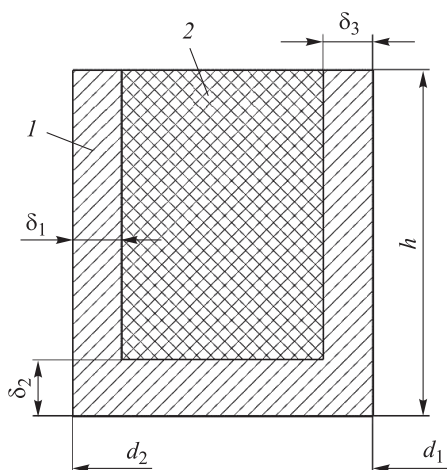


Рис. 2. Схема моделирования шпангоутов:

1 — неизменяемая область; 2 — оптимизируемая область; d_1 — внутренний диаметр шпангоута; d_2 — внешний диаметр шпангоута; h — высота шпангоута; $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ — толщины стенок шпангоута

Обечайка моделируется с помощью поверхности между шпангоутами КЭ типа QUAD [17]. Толщина выбирается из условий технологичности или принимается согласно аналогичным изделиям.

Проектная область моделируется твердотельными КЭ типа HEX, расположенными между двумя шпангоутами таким образом, чтобы КЭ сетка «сшилась». Следует заметить, что области расположения пироболтов, толкателей и крепежных элементов не заполняются.

Космический аппарат, моделирующийся точечным элементом в центре масс КА и массово-инерционными характеристиками, соответствующими ИД, соединяется с узлами крепления абсолютно жесткими связями.

На первом этапе определяются места установки силовых элементов путем топологической оптимизации проектной области. Целевой функцией является масса, которая минимизируется. Ограничениями выступают нижняя граница частоты первого тона собственных колебаний и верхняя граница напряжений конструкции. Используются расчетный случай на собственные частоты, а также расчетные случаи на статику, соответствующие наиболее критическим случаям нагружений на всех этапах эксплуатации.

На втором этапе уточняется начальная КЭМ по результатам топологической оптимизации: удаляются ненужные области (КЭ с малой плотностью материала), на оставшихся областях создается более подробная сетка. Далее проводится топологическая оптимизация новой проектной области для уточнения типа силовых элементов подкрепляющего набора и их количества. Целевой функцией является частота первого тона собственных колебаний, которая максимизируется. Ограничением выступает верхняя граница массовой доли проектной области, т. е. та масса проектной области, которая не удаляется. Здесь используется только один расчетный случай на собственные частоты.

На третьем этапе, основываясь на результатах предыдущего, вместо трехмерных элементов КЭМ проектной области применяются поверхностные элементы силового набора и осуществляется параметрическая оптимизация их толщин. Целевой функцией является масса конструкции адаптера, которая минимизируется. Ограничения устанавливаются на значения нижней границы частоты первого тона собственных колебаний, верхней границы по напряжениям и нижней границы по запасу устойчивости. Расчетные случаи такие же, как на первом этапе, с добавлением расчетных случаев на потерю устойчивости.

На четвертом этапе посредством топологической оптимизации удаляется лишний материал из оптимизируемой области шпангоутов. Целевая функция, ограничения и расчетные случаи аналогичны тем, что на втором этапе.

На пятом (заключительном) этапе проводится уточнение характеристик силового набора с помощью параметрической оптимизации, аналогичной той, которая выполняется на третьем этапе.

Формирование КСС адаптера перспективного КА. Рассмотрим применение методики на примере разработки КСС адаптера перспективного КА, в котором использовались следующие исходные данные.

1. Адаптер должен представлять собой конструкцию оболочечного типа с подкрепляющим набором. Нижний шпангоут должен обеспечивать механическую связь с разгонным блоком «Фрегат» (РБФ), внешний и внутренний диаметр которого составляют 2,1 м и 1,94 м соответственно, а верхний — механическую связь с КА, внешний и внутренний диаметр которого равны 2,2 м и 1,94 м соответственно. На верхнем шпангоуте должны быть предусмотрены места крепления для установки пироболтов и толкателей. Строительная высота нижнего шпангоута должна быть не менее 50 мм, верхнего — не менее 30 мм.

2. Высота адаптера составляет 600 мм.

3. На адаптере размещается КА с массово-центровочными и инерционными характеристиками, представленными ниже:

m , кг	2000,0
$X_{ц.м.}$, м	1,600
$Y_{ц.м.}$, м	-0,010
$Z_{ц.м.}$, м	-0,005
I_{xx} , кг·м ²	1000,0
I_{yy} , кг·м ²	4600,0
I_{zz} , кг·м ²	5000,0
I_{xy} , кг·м ²	200,0
I_{yz} , кг·м ²	15,0
I_{xz} , кг·м ²	40,0

4. Частота собственных колебаний абсолютно жесткого КА с упругим адаптером, закрепленном на абсолютно жестком основании в местах, соответствующих штатным местам крепления адаптера к РБФ, должна быть не ниже 20 Гц.

5. Квазистатические нагрузки должны соответствовать единым нормам внешних воздействующих факторов на КА.

Конечно-элементная модель КЭМ-1 изображена на рис. 3. Красным цветом показаны места установки крепежных элементов, толкателей и пироболтов (далее — внешние элементы), зеленым — КЭ проектной области, синим — КЭ, не участвующие в оптимизации.

На первом этапе был проведен ряд расчетов с различными значениями параметра штрафа (p) [17, 18], равного трем, пяти и десяти. Также для каждого значения параметра штрафа был выполнен дополнительный расчет с использованием ограничения экструзии по оси OX (EXT X) [17, 18]. Во всех расчетах были использованы следующие ограничения: частота первого тона собственных колебаний не ниже 20 Гц, максимальное напряжение в элементах не более 150 МПа, а также ограничения на симметрию относительно плоскостей XZ и XY . Основные результаты топологической оптимизации представлены на рис. 4.

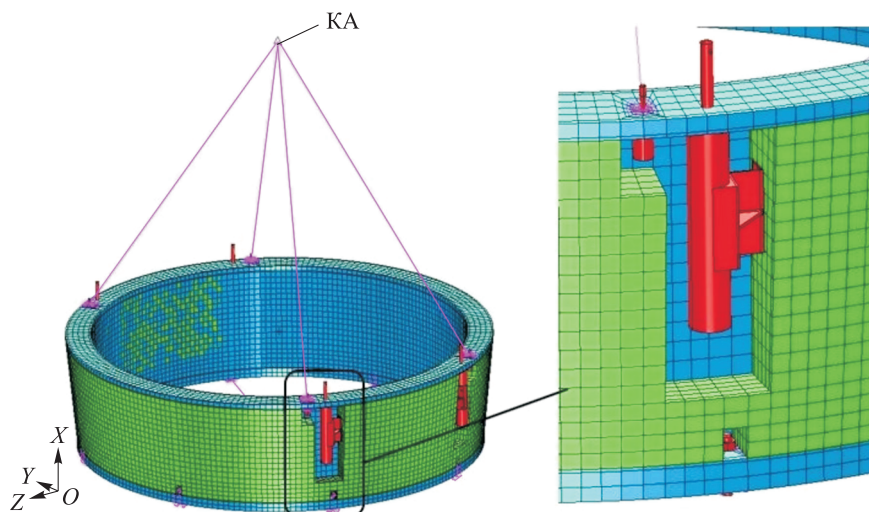


Рис. 3. КЭМ-1

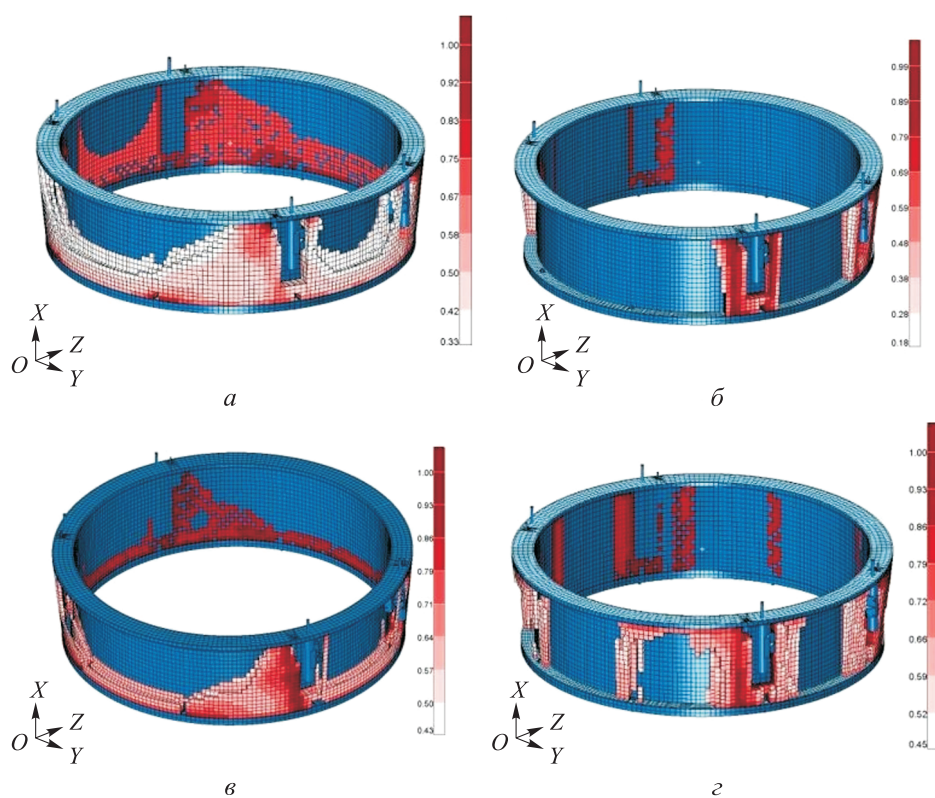


Рис. 4. Результаты топологической оптимизации КЭМ-1:
 $p = 5$ (а); $p = 5$, EXT X (б); $p = 10$ (в); $p = 10$, EXT X (г)

Для дальнейшей проработки КСС адаптера с точки зрения традиционного изготовления наиболее подходят варианты на рис. 4, б и г. Здесь ограничимся рассмотрением только конструкции, показанной

на рис. 4, б. На основании выбранного варианта была разработана КЭМ-2, представленная на рис. 5. Красным цветом обозначены внешние элементы, синим отмечена неоптимизируемая область, зеленым — оптимизируемая область.

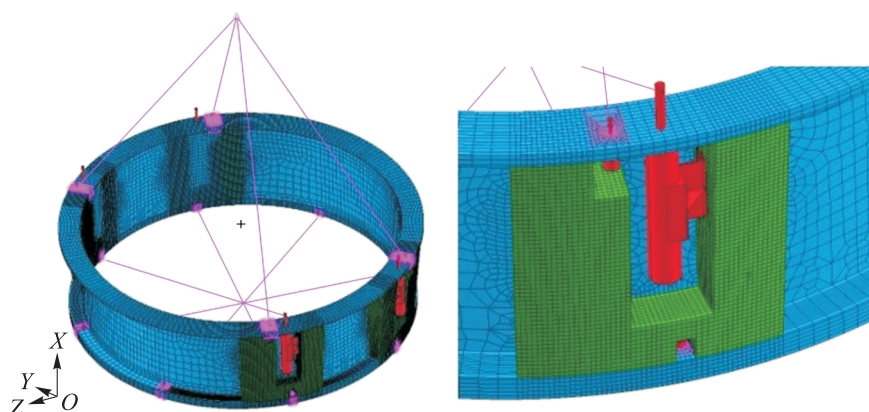


Рис. 5. КЭМ-2

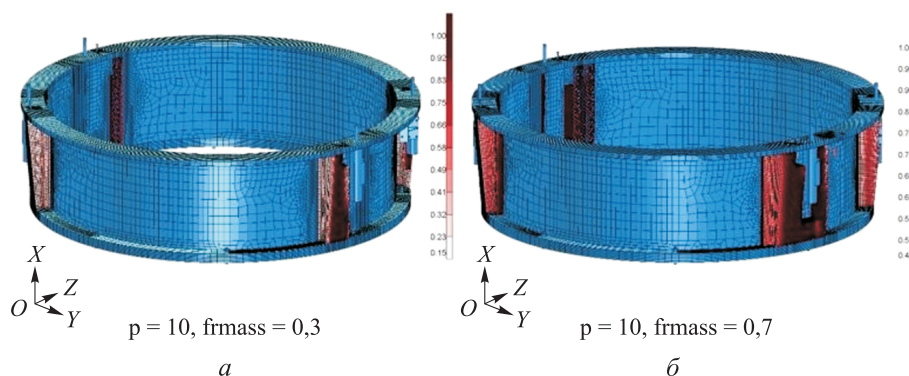


Рис. 6. Результаты топологической оптимизации КЭМ-2:
 $p = 10, f_{mass} = 0,3$ (а); $p = 10, f_{mass} = 0,7$ (б)

На втором этапе было проведено несколько расчетов с параметрами штрафа p , равными 5, 10 и ограничениями на массовую долю f_{mass} , равными 0,3, 0,5, 0,7, а также ограничениями на экструзию по оси OX . Наиболее значимые результаты представлены на рис. 6.

На основании полученных результатов была разработана КЭМ-3, которая представлена на рис. 7. В качестве переменных параметрической оптимизации использовались толщины обечайки, зашивки и ребер 1, 2 и 3. Результаты параметрической оптимизации представлены в табл. 1.

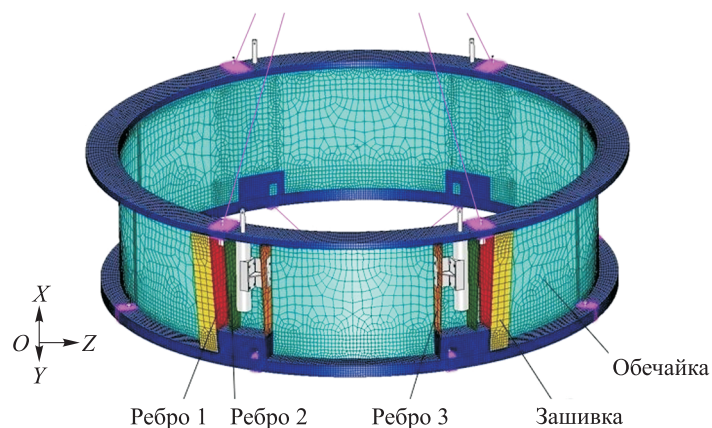


Рис. 7. КЭМ-3

Таблица 1

Результаты параметрической оптимизации

Наименование	Толщина, мм	
	по результатам расчета	принятая
Обечайка	1,2563	1,3
Зашивка	1,5694	1,6
Ребро 1	5,4476	5,5
Ребро 2	6,2391	6,2
Ребро 3	4,9119	5,0

Далее была проведена топологическая оптимизация шпангоутов. Схема оптимизации шпангоутов представлена на рис. 8: синими цветом показана неоптимизируемая область, зеленым — оптимизируемая. Результаты оптимизации шпангоутов изображены на рис. 9.

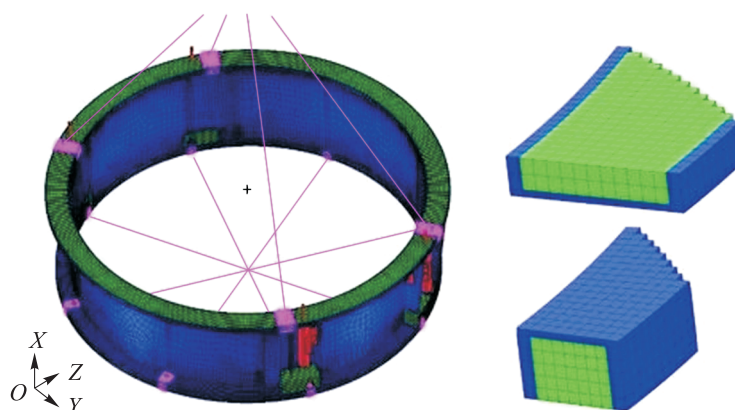


Рис. 8. Схема оптимизации шпангоутов

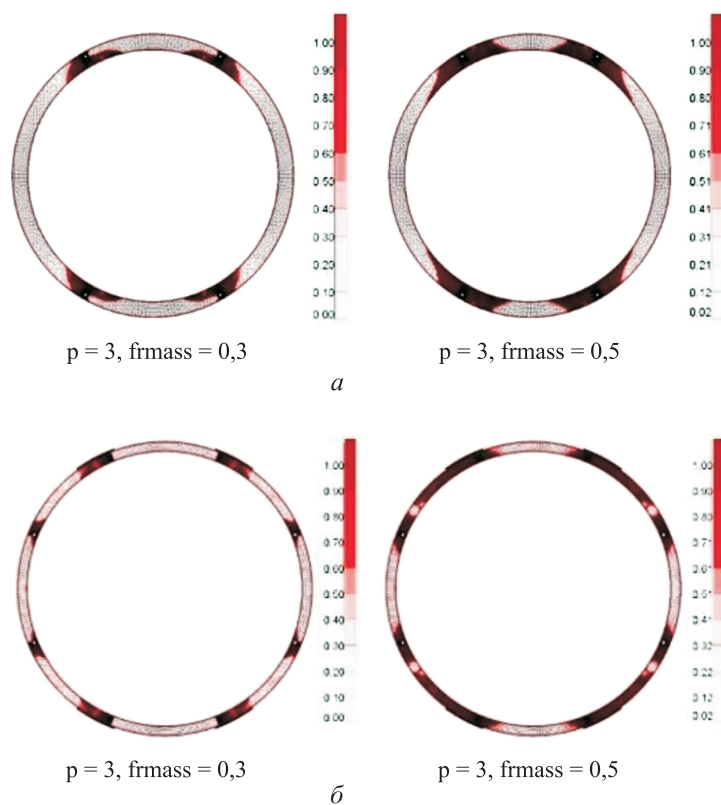


Рис. 9. Результаты оптимизации верхнего (а) и нижнего (б) шпангоутов

На последнем этапе была проведена параметрическая оптимизация для уточнения толщин элементов КСС, аналогичная выполняемой на этапе 3. В табл. 2 приведены результаты параметрической оптимизации.

Таблица 2

Результаты параметрической оптимизации

Наименование	Толщина, мм	
	по результатам расчета	принятая
Обечайка	1,4129	1,5
Зашивка	1,4953	1,5
Ребро 1	5,0211	5,0
Ребро 2	6,5396	6,6
Ребро 3	4,2806	4,3

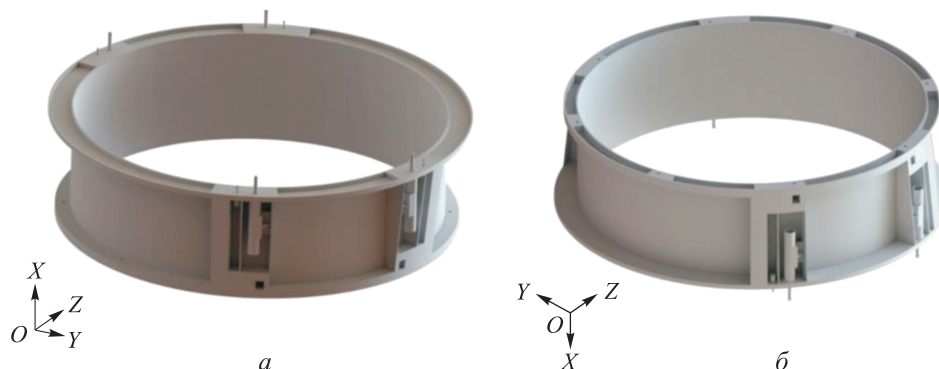


Рис. 10. CAD-модель полученной КСС адаптера:
а — вид сверху, б — вид снизу

На основе полученных результатов была разработана CAD-модель, изображенная на рис. 10.

Заключение. Анализируя представленные результаты, можно сделать вывод о необходимости проведения нескольких расчетов на тех этапах, где используется топологическая оптимизация. Эти расчеты должны проводиться с варьированием параметров алгоритма: параметра штрафа, технологических ограничений (экструзии), массовой доли и др. С одной стороны, необходимость проведения нескольких расчетов вместо одного увеличивают общее машинное время, необходимое для получения КСС адаптера. С другой — расчеты, проводимые на одном этапе, не зависят друг от друга, что позволяет проводить их параллельно, тем самым существенно сокращая время разработки. Стоит заметить, что большое количество получаемых результатов позволит лучше понять конструкцию и получить несколько ее возможных вариантов для дальнейшей проработки. Например, наряду с проработкой варианта на рис. 4, б можно параллельно проработать вариант на рис. 4, г и сформировать еще одну КСС, отличающуюся от полученной ранее.

Главное преимущество представленной методики в том, что КСС адаптера формируется в большей степени расчетным путем, благодаря чему минимизируется риск появления инженерной ошибки. Еще одно преимущество методики заключается в оперативности формирования КСС.

Недостатки данной методики обусловлены принятыми допущениями, указанными в пункте «Описание методики формирования конструктивно-силовой схемы адаптера». Эти допущения могут вводить искажения в результаты расчета на прочность и устойчивость, которые используются в ограничениях оптимизационной задачи, что может привести к повышению значений местных запасов прочности и устойчивости.

Следует отметить, что существует возможность добавить дополнительные ограничения на конструкцию, не представленные здесь, например, ограничения на радиальную жесткость шпангоута, максимальное перемещение какой-либо точки при действии статической, тепловой или динамической нагрузки.

Разработана методика оперативного формирования КСС адаптера для удовлетворения требований динамической совместимости КА с РН. С ее использованием получена КСС адаптера перспективного КА, удовлетворяющая заданным требованиям динамической совместимости КА с РН.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-08-01076А.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Wijker J.J. *Spacecraft Structures*. Springer Science & Business Media, 2008, 504 p.
- [2] *Soyuz CSG User's Manual*. Iss. 2.1. USA, Washington, DC, Arianespace Inc. Publ., May 2018.
- [3] *Delta IV Launch Services User's Guide*. June 2013. URL: http://www.ulalaunch.com/uploads/docs/Launch_Vehicles/Delta_IV_Users_Guide_June_2013.pdf
- [4] *Ariane 5 Users's Manual*. Iss. 5 Revision 3. USA, Washington, DC, Arianespace Inc. Publ., June 2020.
- [5] *Falcon User's Guide*. SpaceX Publ., August 2020.
- [6] Боровиков А.А., Леонов А.Г., Тушев О.Н. Методика определения расположения межпанельных кронштейнов корпуса космического аппарата с использованием топологической оптимизации. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2019, № 4, с. 4–19. DOI: 10.18698/0236-3941-2019-4-4-19
- [7] Baldzhiev R.S., Alekseyev A.A., Azarov A.V. Topology optimization of the lattice payload adapter for carrier rocket. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 683 (1), pp. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/683/1/012061
- [8] Хахленкова А.А., Лопатин А.В. Обзор конструкций адаптеров современных космических аппаратов. *Космические аппараты и технологии*, 2018, т. 2, № 3 (25), с. 134–146. DOI: 10.26732/2618-7957-2018-3-134-146
- [9] Sanford G. Development and Structural Qualification of the EELV Secondary Payload Adapter (ESPA). *43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2002, pp. 1–6. <https://doi.org/10.2514/6.2002-1698>
- [10] Хахленкова А.А. Двухконусный адаптер для запуска блока трех космических аппаратов. *Вестник СибГАУ*, 2016, т. 17, № 3, с. 748–759.
- [11] Беляев А.В., Зеленцов Вл.В., Щеглов Г.А. *Средства выведения космических летательных аппаратов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007, 56 с.
- [12] Schwingel D., Seeliger H., Vecchionacci C., Alwes D., Dittrich J. Aluminium foam sandwich structures for space applications. *Acta Astronautica*, 2007, vol. 61, pp. 326–330. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2007.01.022>

- [13] Замятин Д.А., Кольга В.В., Нестеров В.А. Проектирование адаптера космического аппарата информационного обеспечения. *Актуальные проблемы авиации и космонавтики*, 2018, т. 1, № 14, 2018, с. 99–101.
- [14] Bendsoe М.Р., Sigmund O. *Topology optimization. Theory, methods, and application*. Springer, 2004, 370 p.
- [15] Sigmund O., Maute K. Topology optimization approaches. A comparative review. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2013, vol. 48, pp. 1031–1055. DOI: 10.1007/s00158-013-0978-6
- [16] Сыроева В.В., Чедрик В.В. Алгоритмы оптимизации топологии силовых конструкций. *Ученые записки ЦАГИ*, 2011, т. 42, № 2, с. 91–102.
- [17] *Design sensitivity and optimization*. User's guide. MSC Nastran Publ., 2018.
- [18] *Quick reference guide*. MSC Nastran Publ., 2018.

Статья поступила в редакцию 29.11.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Боровиков А.А., Тушев О.Н. Методика формирования конструктивно-силовой схемы адаптера космического аппарата для удовлетворения требований динамической совместимости методами топологической и параметрической оптимизации. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 12.
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-12-2134>

Боровиков Александр Александрович — аспирант, инженер АО «ВПК «НПО машиностроения». e-mail: sigma@vpk.npomash.ru

Тушев Олег Николаевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Аэрокосмические системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: kafsm2@bmstu.ru

A method of forming a spacecraft adapter layout to meet the requirements of dynamic compatibility by topological and parametric optimization methods

© A.A. Borovikov¹, O.N. Tushev²

¹JSC “MIC “NPO Mashinostroyenia”, Reutov town, 143966, Russia

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

At present, the developers of launch vehicles impose a requirement for dynamic compatibility of the spacecraft with the launch vehicle, which consists in limiting the lower boundary of the first transverse and first longitudinal fundamental (primary) frequencies of the natural vibrations of the spacecraft fitted with an adapter of relatively rigid base. One of the tasks that must be solved in order to meet this requirement is the development of the spacecraft adapter layout. The traditional process of designing the adapter consists in developing its design on the basis of analogues and carrying out verification analysis with subsequent refinement of the design to meet the strength and stiffness requirements. However, this approach takes a lot of time and is not adaptable to constant changes in the input data at the initial design stage. The article presents a technique allowing the adapter layout to be quickly designed. The layout is determined to a greater extent by calculations using the topological and parametric optimization methods. The application of the developed technique is shown on the example of the development of an adapter for a promising spacecraft. It should be applied in the early stages of design. The results obtained by the method should be used as input data and recommendations for the design of the adapter.

Keywords: optimal layout, spacecraft adapter, topology optimization, parameter optimization, structural optimization

This work was supported by the RFBR grant No. 20-08-01076A.

REFERENCES

- [1] Wijker J.J. *Spacecraft Structures*. Springer Science & Business Media Publ., 2008, 504 p.
- [2] *Soyuz CSG User's Manual. Issue 2.1*. USA, Washington, DC, Arianespace Inc. Publ., May 2018.
- [3] *Delta IV Launch Services User's Guide, 2013*. Available at: http://www.ulalaunch.com/uploads/docs/Launch_Vehicles/Delta_IV_Users_Guide_June_2013.pdf
- [4] *Ariane 5 Users's Manual. Issue 5 Revision 3*. USA, Washington, DC, Arianespace Inc. Publ., June 2020.
- [5] *Falcon User's Guide*. SpaceX Publ., August 2020.
- [6] Borovikov A.A., Leonov A.G., Tushev O.N. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Mechanical Engineering*, 2019, no. 4, pp. 4–19. DOI: 10.18698/0236-3941-2019-4-4-19
- [7] Baldzhiev R.S., Alekseyev A.A., Azarov A.V. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 683 (1), pp. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/683/1/012061

- [8] Khakhlenkova A.A., Lopatin A.V. *Kosmicheskie apparaty i tehnologii — Spacecrafts and Technologies*, 2018, vol. 2, no. 3 (25), pp. 134–146. DOI: 10.26732/2618-7957-2018-3-134-146
- [9] Sanford G. Development and Structural Qualification of the EELV Secondary Payload Adapter (ESPA). *Proceedings of the 43rd Conference “AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials” 22–25 April 2002, Denver, Colorado*. 2002, pp. 1–6. <https://doi.org/10.2514/6.2002-1698>
- [10] Khakhlenkova A.A. *Vestnik Sibirskogo Gosudarstvennogo Aerokosmicheskogo Universiteta imeni akademika M.F. Reshetneva — Vestnik. Scientific Journal of Siberian State Aerospace University named after academician M.F. Reshetnev*, 2016, vol. 17, no. 3, pp. 748–759.
- [11] Belyaev A.V., Zelentsov V.V., Shcheglov G.A. *Sredstva vyvedeniya kosmicheskikh letatelnykh apparatov* [Spacecraft launch vehicles]. Moscow, BMSTU Publ., 2007, 56 p.
- [12] Schwingel D., Seeliger H., Vecchionacci C., Alwes D., Dittrich J. *Acta Astronautica*, 2007, vol. 61, pp. 326–330. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2007.01.022>
- [13] Zamyatin D.A., Kolga V.V., Nesterov V.A. Proektirovanie adaptera kosmicheskogo apparata informatsionnogo obespecheniya [The design of the adapter of the information support spacecraft]. *Materialy IV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii “Aktualnye problemy aviatsii i kosmonavtiki”* [Proceedings of the IV International scientific conference “Actual problems of aviation and astronautics”]. Krasnoyarsk, Sibirskiy Gosudarstvennyy Aerokosmicheskii Universitet imeni akademika M.F. Reshetneva Publ., 2018, vol 1, pp. 99–101.
- [14] Bendsoe M.P., Sigmund O. *Topology optimization. Theory, methods, and application*. Springer Publ., 2004, 370 p.
- [15] Sigmund O., Maute K. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2013, vol. 48, pp. 1031–1055. DOI: 10.1007/s00158-013-0978-6
- [16] Sysoeva V.V., Chedrik V.V. *Uchenye zapiski TsAGI — TsAGI Science Journal*, 2011, vol. 42, no. 2, pp. 91–102.
- [17] *Design sensitivity and optimization*. User’s guide. MSC Nastran Publ., 2018.
- [18] *Quick reference guide*. MSC Nastran Publ., 2018.

Borovikov A.A., post-graduate student, Engineer, JSC “MIC “NPO Mashinostroyeniya”. e-mail: sigma@vpk.npomash.ru

Tushev O.N., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Aerospace Systems, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: kafsm2@bmstu.ru