

## СИНТЕЗ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПАНЕЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКТИВНО-СИЛОВЫХ СХЕМ

В настоящее время в отечественной и мировой практике одним из направлений совершенствования космической техники является повышение эффективности солнечных батарей (СБ), обеспечивающих электроэнергией всю бортовую аппаратуру с помощью прикрепленных к ним фотоэлектрических преобразователей энергии (ФП) [1]. Современное космическое аппаратостроение выдвигает жесткие требования к энергоотдаче и удельной мощности СБ, что приводит к необходимости увеличения их площади с помощью размещения ФП на специальных выдвижных или раскрывающихся после вывода на орбиту панелях. Это еще больше повышает предъявляемые жесткие требования к панелям СБ по обеспечению несущей способности и жесткости в условиях эксплуатации в специфических условиях космоса при их минимальной массе [2]. Использование эффективных конструктивно-силовых схем (КСС) для агрегатов данного класса в сочетании с применением современных полимерных композиционных материалов (ПКМ), обладающих низкой плотностью при высоких прочностных и жесткостных характеристиках, в значительной степени способствует решению этой проблемы [3].

Независимо от типа панелей СБ, выводимых на орбиту РН, к ним (кроме жесткого ограничения поверхностной массы) предъявляются следующие требования [4]. Панели СБ должны выдерживать:

- в режиме старта РН высокие расчетные перегрузки, которые могут достигать значений в  $n \leq 18$ ;
- при эксплуатации термоциклирование  $10^5$  циклов в диапазоне температур  $-100 \leq T \leq 80^\circ\text{C}$ ;
- акустическое нагружение в режиме старта и полета при регламентированных диапазонах частот, спектральной плотности и времени воздействия;
- в режиме раскрытия системы СБ на орбите силовые воздействия регламентированного уровня.

Кроме этих требований обязательно регламентируются максимальные прогибы панели СБ, существенным образом влияющие на работу ФП.

Степень реализуемости этих возможностей зависит от эффективности применяемых КСС и конструктивно-технологических решений (КТР), от используемых материалов, а также от существующего уровня производства агрегатов данного класса [4].

Анализ опыта создания объектов рассматриваемого класса, позволяет сделать вывод о том, что тенденции все большего расширения использования ПКМ для изготовления несущих конструкций СБ все более

усиливаются и обретают глобальный характер во всех странах. В связи с этим вопросы совершенствования существующих или поиск и разработка новых КСС и КТР для агрегатов рассматриваемого класса в рамках современных достижений энергетики, материаловедения и информационных компьютерных технологий становятся еще более актуальными и приобретают первостепенное значение.

Современный уровень развития интегрированных компьютерных технологий проектирования позволяет подойти к решению проблемы повышения массовой эффективности панелей СБ различных КСС с учетом существующего уровня их производства путем разработки концептуального подхода к синтезу рациональных параметров композитных агрегатов рассматриваемого класса в рамках предложенной нами концепции оптимизации [5]. Предлагаемый подход основан на комплексной реализации следующих принципов, основанных на существующем опыте проектирования и создания конструкций рассматриваемого класса (рис. 1) [3, 6, 7]:

- синтез КСС, обеспечивающих эффективное восприятие конструктивными элементами действующих нагрузок и выполнение функциональных задач;

- формирование рациональных КТР, максимально приближенных к силовым потокам от внешних воздействий;

- поиск рационального распределения материала в различных вариантах КТР панели СБ, исключая зоны конструкции, в которых имеет место неполное его использование;

- реализация эффективного клеевого соединения конструктивных элементов панели СБ;

- оценка влияния на рациональные параметры панелей СБ характерных для их производства технологических отклонений в пределах регламентированных допусков на них;

- соблюдение дополнительных функциональных ограничений, связанных с технологическими, экономическими, экологическими и другими факторами, соответствующими существующему уровню производства панелей СБ выбранной КСС.

Каждый из представленных принципов реализован соответствующими блоками, интегрированными средствами компьютерных технологий в комплекс оптимизации конструктивно-технологических параметров панелей СБ космического назначения, который включает в себя минимизируемую целевую функцию, выражающую поверхностную массу панелей в зависимости от варьируемых и неизменных в процессе оптимизации параметров (рис. 2).

При этом неварьируемыми параметрами являются: характер, вид и величина внешних воздействий; геометрические размеры (габариты) панели СБ и координаты узлов крепления; поверхностная масса ФП; применяемые материалы и их ФМХ.



Рисунок 1 – Комплексная реализация принципов концептуального подхода к синтезу рациональных параметров панелей СБ космического назначения

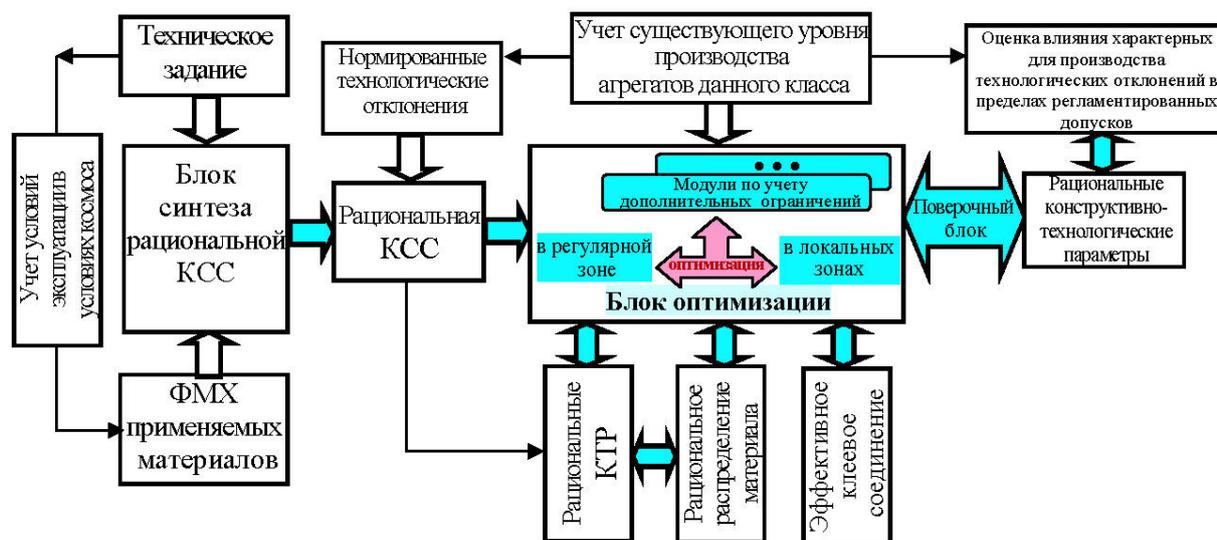


Рисунок 2 – Принципиальная блок-схема реализации концептуального подхода к синтезу рациональных параметров панелей СБ космического назначения

Варьируемыми параметрами в зависимости от типа КСС могут быть толщины и схемы армирования несущих обшивок, размеры поперечного сечения и структуры ребер, параметры заполнителей и т.д. Для выбора рациональной КСС используется поливариантная модель оптимизации, т.е. проводится серия оптимизационных расчетов для фиксированных КСС и выбирается наилучший из полученных результатов.

Осуществление принципа синтеза КСС, обеспечивающих эффективное восприятие конструктивными элементами действующих нагрузок и

выполнение функциональных задач, существенно зависит от типа несущей конструкции СБ. Различия в применяемых КСС таких панелей СБ связаны как с разными условиями функционирования КА, так и с попытками снизить их поверхностную массу. Известно, что эффективность разрабатываемой КСС во многом зависит от качества технологии ее производства. Поэтому в комплексе оптимизации параметров панелей СБ предусмотрена оценка влияния нормированных технологических отклонений на эффективность синтезированной рациональной КСС.

Принцип формирования рациональных КТР панели СБ, максимально приближенных к силовым потокам от внешних воздействий, реализуется как независимо, так и в сочетании с принципом поиска рационального распределения материала. В последнем случае эффективность их совместной реализации существенно возрастает. Примером реализации этих принципов для сэндвичевой КСС может служить введение в несущие обшивки ориентированных соответствующим образом силовых накладок, структура которых позволяет снизить локальный прогиб панели СБ и создать местное усиление зон расположения узлов фиксации ее секции (рис. 3) [6, 7, 8].

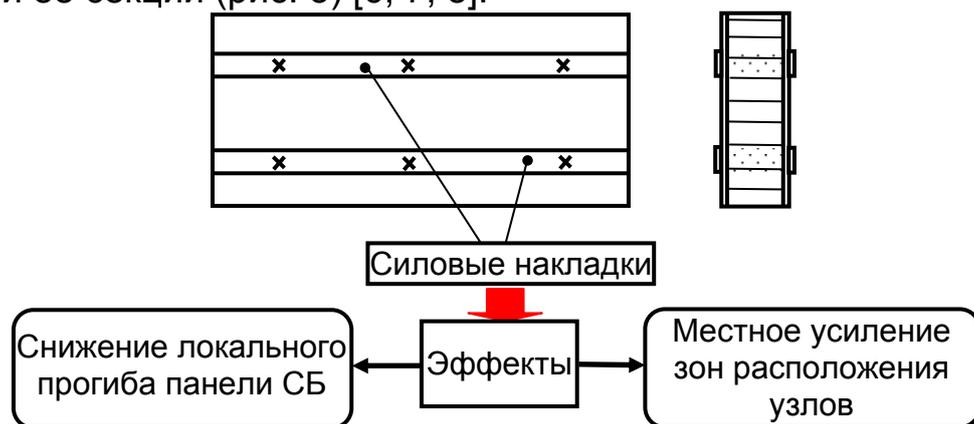


Рисунок 3 – Пример совместной реализации принципов формирования рациональных КТР сэндвичевой панели СБ и поиска рационального распределения материала

Принцип поиска рационального распределения материала в различных вариантах КТР панели СБ исключает наличие в ней недогруженных зон и реализуются локально переменной толщиной композитных элементов. Технологическими предпосылками реализации этого принципа являются разработки в области возможности получения препрегов ПКМ в 1 – 10 монослоев, что существенно расширяет конструктивно-технологические возможности создания супертонких изделий по сравнению с существующим уровнем [9, 10]. Один из аспектов идеи этого принципа, что касается сэндвичевых СБ с СЗ, заключается в выборе соотношений ортогональных модулей сдвига сотов, обеспечивающих минимальные сдвиговые перемещения панели при минимальной приведенной плотности СЗ, что может достигаться оптимизацией параметров ячейки неправильной шестигранной формы [7].

При оптимальном проектировании и изготовлении композитных панелей СБ необходимо обеспечить высокую прочность и надежность склеиваемых конструктивных элементов при незначительной площади их контакта. Для панельных агрегатов рассматриваемого класса доля клея в их поверхностной массе является существенной и может достигать 20% [6]. Предлагаемый принцип реализации эффективного клеевого соединения конструктивных элементов панели СБ позволяет выбрать рациональные параметры клеевого слоя и соответствующую технологию его нанесения, что является одним из перспективнейших путей весового совершенствования агрегатов рассматриваемого класса [11].

Очевидно, что определяющими факторами, влияющими на характеристики готовой конструкций, являются технологические факторы. Реализация принципа оценки влияния на рациональные параметры панелей СБ характерных для их производства технологических отклонений в пределах регламентированных допусков осуществляется по существующим методикам для применяемых КСС и КТР, изложенным в ряде работ, например [12].

Наконец, реализация принципа соблюдения дополнительных функциональных ограничений, связанных с технологическими, экономическими, экологическими и другими факторами, сводится к обеспечению конструктивно-технологической выполнимости проекта в условиях существующего уровня производства панелей СБ выбранной КСС. Построение соответствующих алгоритмов выполняется на основе уже существующих методик, например [12, 13, 14 и др.].

Реализация с учетом изложенных выше принципов предложенного комплекса оптимизации панелей СБ космического назначения в процессе их проектирования и производства позволили синтезировать их рациональных параметры для различных КСС с уровнем поверхностной массы, соответствующим мировым тенденциям [7, 15 – 18].

Анализ накопленного отечественного и зарубежного опыта по созданию и эксплуатации панелей СБ показал, что на сегодняшний день все шире применяются сэндвичевые конструкции с композитными несущими обшивками и сотовым наполнителем (СЗ) [3, 7, 15]. Этот тип КСС позволяет реализовать один из самых высоких показателей удельной прочности и жесткости при минимальной массе, являющийся определяющим параметром эффективности агрегатов рассматриваемого класса [3, 6, 7].

Проведенная нами оптимизация конструктивных параметров секции СБ данной КСС дала основание рассчитывать на принципиальную возможность реализации ее поверхностной массы в пределах  $0,55...0,8 \text{ кг/м}^2$  [7, 15].

В соответствии с изложенными выше принципами были рассмотрены возможные методы рационального распределения материала в панели СБ (табл.1).

1. Использование прогрессивных технологических операций по уменьшению толщины применяемых для формирования несущих обшивок препрегов.

2. При использовании СЗ с большей ячейкой  $a_c=8$  мм прогибы панели изменились меньше чем на 1%, а поверхностная масса снизилась на  $0,06 \text{ кг/м}^2$ . Однако следует заметить, что использование СЗ с большей ячейкой может привести к утяжелению готовой панели СБ за счет использования большего объема заливочного материала при усилении нерегулярных зон [7].

Таблица 1 – Рациональные варианты панели СБ с СЗ

Сотовый наполнитель	Рассматриваемые схемы армирования несущих обшивок			
	2 монослоя		3 монослоя	
	материал несущих обшивок			
	Кулон П-ВК36РТ	TAIRFUL	Кулон П-ВК36РТ	TAIRFUL
	толщина препрега			
	0,05мм	0,07мм	0,04мм	0,05мм
	схема армирования			
	[±60]	[±60]	[0,±75]	[0,90 <sub>2</sub> ]
	поверхностная масса панели, $\text{кг/м}^2$			
ячейка $a_c=6$ мм	0,56	0,68	0,62	0,71
ячейка $a_c=8$ мм	0,50	0,62	0,56	0,65

3. Применение КТР, обеспечивающих усиление между закладными элементами под установку замков, шарнирных узлов и упоров (рис. 2).

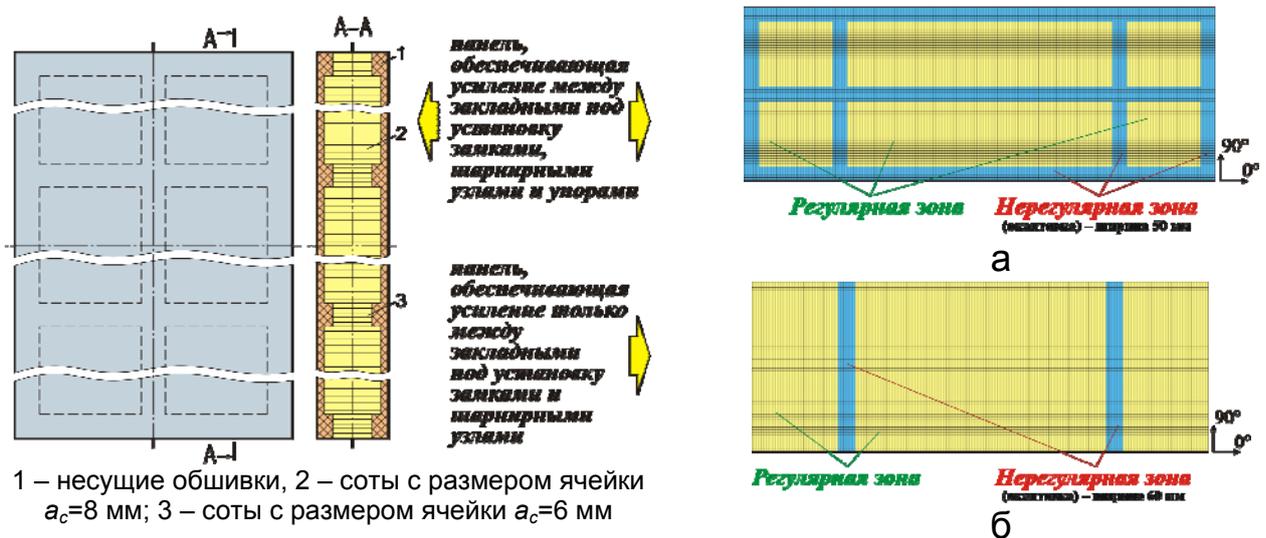


Рисунок 4 – Вид КТР, обеспечивающих локальное усиление несущих обшивок и СЗ:

а – между закладными элементами под установку замков, шарнирными узлами и упорами (схема I); б – только между закладными элементами под установку замков и шарнирными узлами (схема II)

На рис. 5 показан пример полученных картин деформированного состояния рациональных вариантов панели СБ при различных расчетных случаях нагружения.

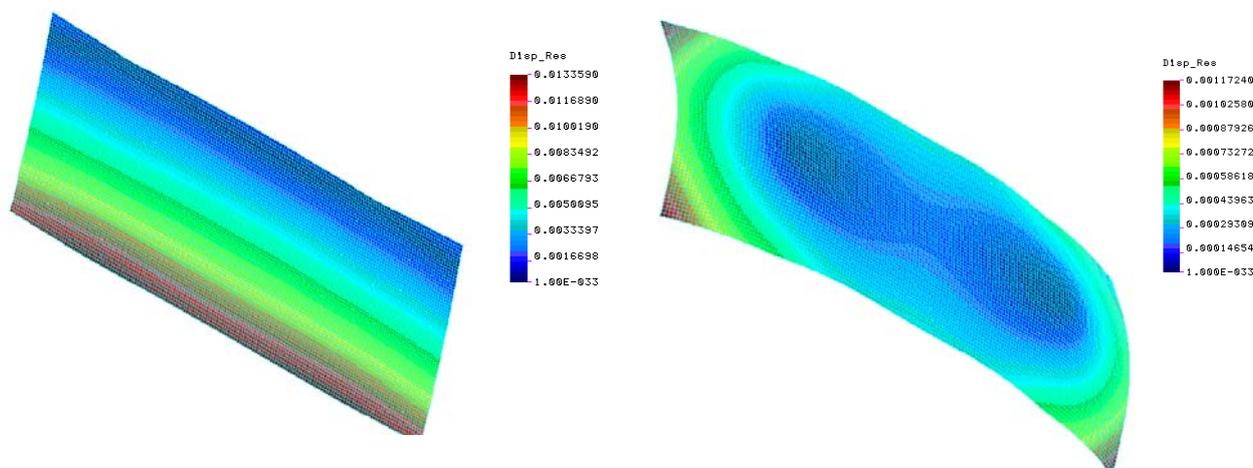


Рисунок 5 – Картины деформированного состояния панели СБ с локальным усилением несущих обшивок и СЗ между закладными элементами под установку замков, шарнирными узлами и упорами (схема I) при различных случаях нагружения, мм

Как уже отмечалось выше, развитие космической техники, особенно в последнее десятилетие, востребовало увеличения ее энергопотребления и роста мощности источников электрической энергии – ФП для СБ, являющихся в настоящее время основными источниками энергии на борту КА [1]. Рост энергопотребления приводит к необходимости увеличения энергоотдачи СБ, что может решаться различными способами. Одним из самых эффективных способов повышения энергоотдачи СБ является применение концентраторов солнечного излучения в виде систем линейных линз Френеля, позволяющих снизить стоимость таких СБ на 30% по сравнению с обычными планарными [2]. Промежуточное концентрирование до 1000 крат с помощью такой системы линз с оптическим коэффициентом полезного действия до 90% приводит к пропорциональному снижению площади и удельной стоимости ФП и, как следствие, к повышению эффективности панели СБ [2]. Однако для успешной реализации данного класса СБ требуется разработка новых КСС панелей с повышенными требованиями к их жесткости и несущей способности. В связи с этим были проведены исследования синтеза рациональных параметров каркасов различных КСС панелей концентраторных СБ [16 – 18]. На основе проведенных предварительных исследований была разработана конструкция панели СБ, состоящая из несущей рамы, к которой крепятся 20 сегментов, предназначенных для фиксации линейных концентраторов светового потока на основе линз Френеля, совмещенных с отражателями и ФП [18].

В качестве КСС сегментов панели были рассмотрены две альтернативные конструкции: ферменная (рис. 6, а) и гофрированная (рис. 6, б).

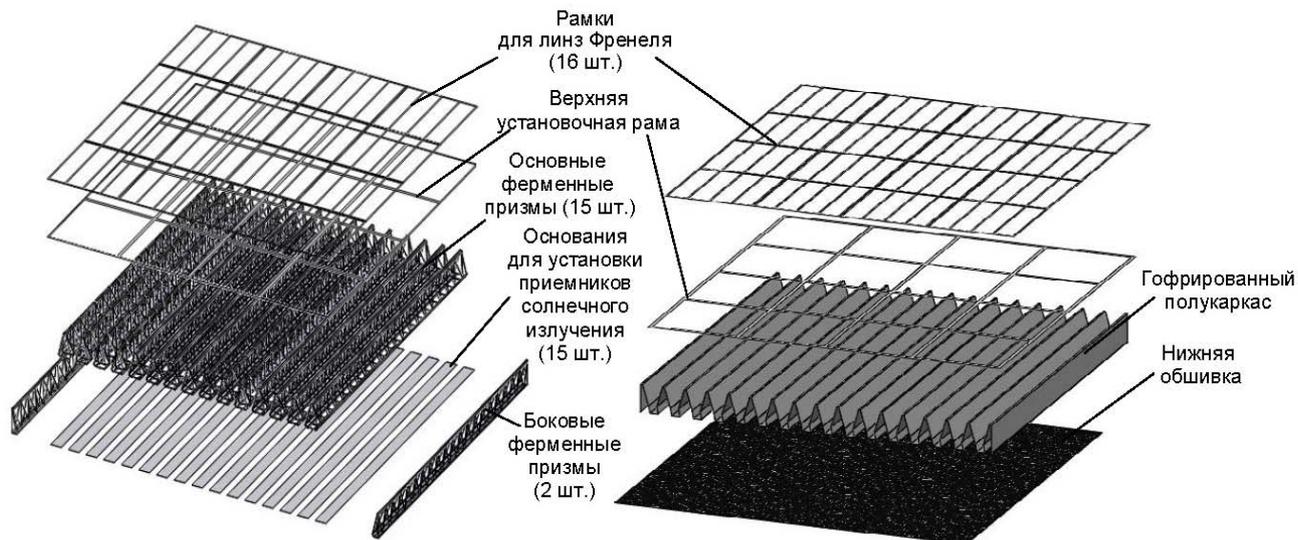


Рисунок 6 – Исследуемые КСС сегмента панели концентраторной СБ для установки линз Френеля:  
а – ферменная; б – гофрированная

Примеры сгенерированных конечно-элементных моделей сегментов панели концентраторной СБ различной КСС показаны на рис. 7.

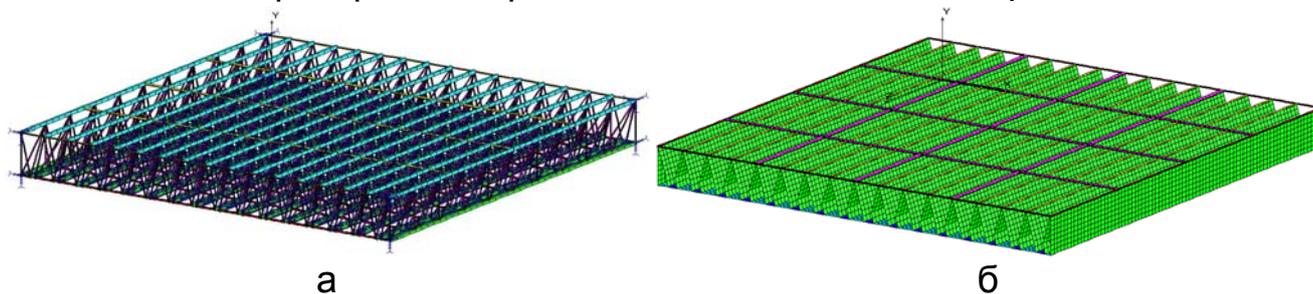


Рисунок 7 – Сгенерированные конечно-элементные модели сегментов панели концентраторной СБ различной КСС:  
а – ферменная; б – гофрированная

Анализ результатов проведенных исследований позволил выбрать наиболее эффективную по массе КСС сегмента панели СБ рассматриваемого класса, а также определить рациональные параметры ее элементов, которые позволили обосновать возможность создания панели концентраторной СБ космического назначения с поверхностной массой  $0,6 \text{ кг/м}^2$ , соответствующей регламентированным техническим требованиям [16, 17].

Одним из видов нагружения панелей СБ космического назначения при их эксплуатации, которое не может быть напрямую учтено при оптимизации в виде расчетного случая, является акустическое воздействие, создаваемое двигательной установкой РН при старте и скоростным потоком, действующим на конструкцию головного блока на участке выведе-

дения [7, 18]. Как отмечалось выше, после определения рациональных конструктивных параметров панели СБ полученные данные поступают в поверочный блок оптимизации, в котором проходит подтверждение полученных результатов. Примером реализации этого блока применительно к рациональным вариантам панелей СБ могут быть результаты проведенных исследований возможности возникновения в них резонансных акустических колебаний и их влияния на напряженно-деформированное состояние (НДС) конструктивных элементов рассматриваемых конструкций [18, 19]. Блок-схема алгоритма реализации предложенного подхода показана на рис. 8.

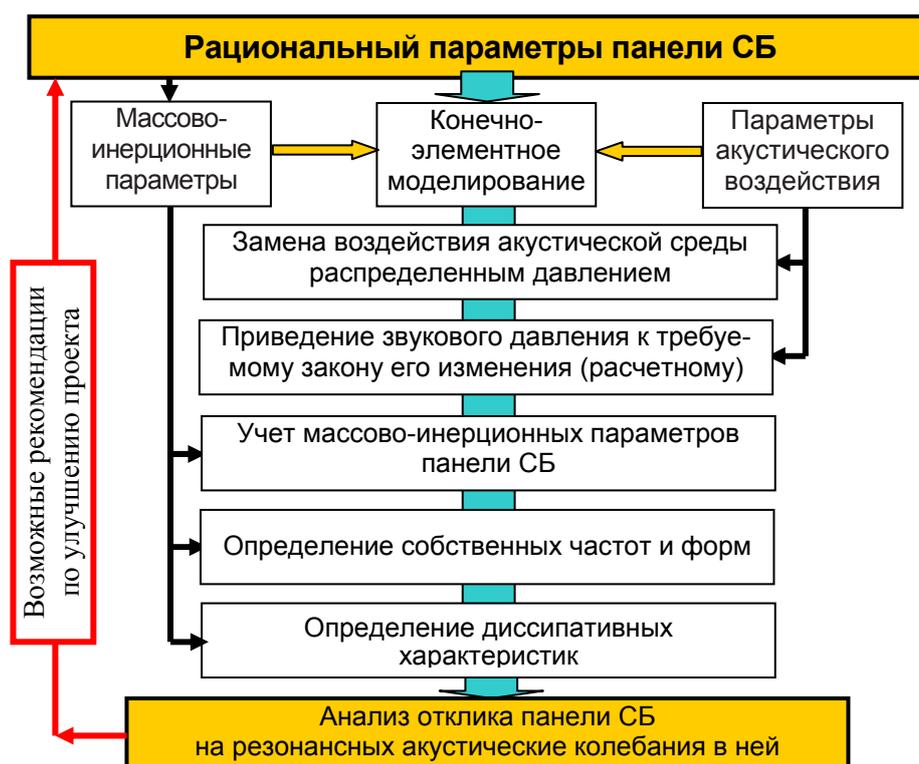


Рисунок 8 – Блок-схема алгоритма поверочного расчета панелей СБ при воздействии звукового давления, основанного на конечно-элементном моделировании возникновения в них резонансных акустических колебаний

На основании полученных решений были построены резонансные кривые, которые позволили оценить влияние резонансных явлений на НДС панелей СБ. На рис. 9 показан пример полученных графиков амплитудно-частотных характеристик

Однако необходимо отметить, что, несмотря на очевидные недостатки, использование предложенного алгоритма позволяет проводить оценку НДС панелей СБ при возникновении в них резонансных акустических колебаний с использованием практически любого пакета конечно-элементного моделирования, даже при отсутствии специализированного, что делает его использование достаточно привлекательным.

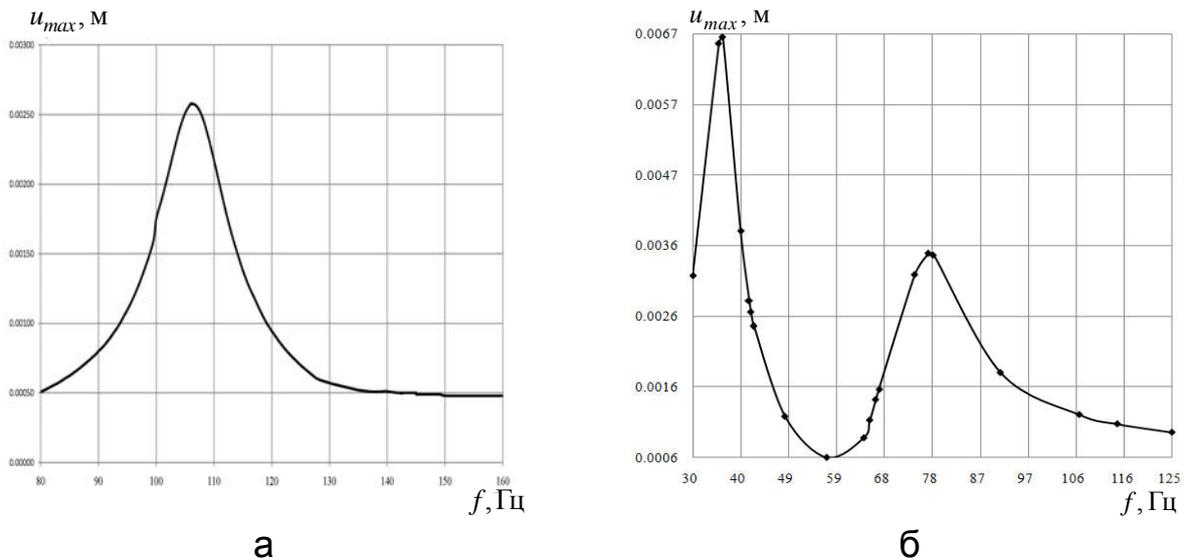


Рисунок 9 – Пример графика амплитудно-частотной характеристики для максимального прогиба различных СБ:  
а – планарная; б – концентраторная

### Выводы

Таким образом, предложен концептуальный подход к синтезу рациональных параметров композитных каркасов панелей СБ различных КСС, основанный на комплексной реализации ряда принципов, реализованных соответствующими блоками и интегрированными средствами компьютерных технологий в комплекс оптимизации конструктивно-технологических параметров конструкций рассматриваемого класса.

### Список использованных источников

1. Научно-технические аспекты разработки, изготовления и эксплуатации систем электроснабжения космических аппаратов [Текст] / К.В. Безручко, В.Н. Борщов, А.О. Давидов и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – X., 2011. – № 5(82). – С. 8 – 13.
2. Современное состояние и перспективы развития солнечных батарей для энергоснабжения космических аппаратов [Текст] / Н.В. Замирец, В.Н. Борщов, О.Н. Замирец и др // Технология приборостроения. – 2010. – № 2. – С. 7 – 13.
3. Сливинский, В.И. Проблемы создания суперлегких конструкций солнечных батарей космического назначения и концепция их оптимизации [Текст] / В.И. Сливинский / Технологические системы. – 2000. – № 2(4). – С. 80 – 82.
4. Грошевой, А.И. Технологические проблемы создания суперлегких композитных панелей конструкций космического назначения [Текст] / А.И. Грошевой, В.И. Сливинский // Вопросы проектирования и производ-

ства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. трудов. – Х.: Харьк. авиац. ин-т, 1995. – С. 12 – 18.

5. Кондратьев, А.В. Концепция оптимизации основных параметров конструкций авиакосмической техники из полимерных композиционных материалов [Текст] / А.В. Кондратьев // Авиационно-космическая техника и технология. – Х., 2010. – № 5(72). – С.13 – 18.

6. Weight optimization of honeycomb structures for space applications / V. Slyvyns'kyu, V. Gajdachuk, A. Gajdachuk, N. Slyvyns'ka // 56th International Astronautical Congress 2005 – Japan, Fukuoka – IAC-05-C2.3.07. P. 1 – 10.

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

8. Щудро, А.П. Проектирование сверхлегких панелей солнечных батарей [Текст] / А.П. Щудро // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники : сб. материалов II междунар. науч.-практ. конф. / Укр. НИИ технологий машиностроения. – Днепропетровск, 2007. – С. 199 – 205.

9. Радишевский, М.Б. Совершенствование технологии получения углеродных наполнителей тонких номиналов для панелей солнечных батарей [Текст] / М.Б. Радишевский // Эффективность сотовых конструкций в изделиях авиационно-космической техники: сб. материалов V междунар. науч.-практ. конф., Днепропетровск 5-7 июня 2013 г. – Днепропетровск, 2013. – С. 160 – 161.

10. Сливинский, В.И. Технологические возможности формирования супертонких препрегов для несущих панелей солнечных батарей космического назначения [Текст] / В.И. Сливинский, Хорхе Эрнандес Тамайо // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. трудов. – Вып. 17. – Х., 1999. – С. 68 – 77.

11. Зависимость несущей способности сотовых конструкций при трансверсальном отрыве от технологии склеивания обшивок с наполнителем [Текст] / В.Е. Гайдачук, О.А. Карпикова, А.В. Кондратьев, В.В. Кириченко // Авиационно-космическая техника и технология. – Х., 2012. – № 2(89). – С. 5 – 17.

12. 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.

13. 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.

14. 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*. – Х., 2012. – № 9. – С. 93 – 98.

15. New possibilities in creating of effective composite size-stable honeycomb structures designed for space purposes (Conference Paper) [Text] / V.I. Slyvynskiy, V.A. Kovalenko, A.V. Kondratjev, M.E. Kharchenko // *64th International Astronautical Congress, IAC 2013. Beijing, China, 23 – 27 September 2013*. – Red Hook, NY: Curran, 2013. – Vol. 7. – P. 5643 – 5655.

16. Выбор рациональных параметров элементов конструктивно-силовой схемы каркаса тестовой панели солнечной батареи космического аппарата [Текст] / В.В. Гаврилко, В.А. Коваленко, А.В. Кондратьев, А.М. Потапов // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. трудов Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Вып. 54. – Х.: ХАИ, 2012. – С. 5 – 13.

17. Модель сетчатой конструктивно-силовой схемы каркаса тестовой панели солнечной батареи космического аппарата [Текст] / В.А. Коваленко, А.В. Кондратьев, М.А. Шевцова, И.Г. Гагауз // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. трудов Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Вып. 58. – Х., 2013. – С.89 – 97.

18. Оценка напряженно-деформированного состояния композитной панели концентраторной солнечной батареи космического назначения при различных случаях нагружения [Текст] / А.П. Кузнецов, В.В. Гаврилко, А.В. Кондратьев, В.А. Коваленко, М.А. Трайдук, А.А. Царицынский // *Авиационно-космическая техника и технология*. – Х., 2015. – № 2(119). – С. 5 – 15.

19. Кондратьев, А.В. Анализ напряженно-деформированного состояния панели солнечной батареи при ее акустическом нагружении [Текст] / А.В. Кондратьев // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»*. – Вып. 3 (71).– Х., 2012. – С. 30 – 38.

*Поступила в редакцию 25.12.2014.*

*Рецензент: д-р техн. наук В.А. Коваленко,  
ГП «Конструкторское бюро «Южное»  
им. М.К. Янгеля», г. Днепрпетровск.*