

УДК 629.7.002.3

А. В. КОНДРАТЬЕВ

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина*

## ПРОЕКТНЫЙ КОМПЛЕКС РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОЗИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

*Синтезирован проектный комплекс реализации концепции оптимизации конструктивно-технологических параметров композитных изделий ракетно-космической техники, позволяющий решить задачу обоснованного (с учетом выбранного критерия эффективности) выбора конструкционных материалов и взаимосвязанных с ним задачи синтеза конструктивно-силовой схемы агрегатов и конструктивно-технологических решений узлов, деталей и соединений с учетом ограничений существующего уровня их производства. Комплекс исследований и их основных результатов представлен в виде анализа типовых отечественных композитных агрегатов ракетно-космической техники.*

**Ключевые слова:** ракетно-космическая техника, оптимизация, проектный комплекс, конструктивно-технологические параметры, полимерные композиционные материалы.

### Введение

Мировой рынок космических услуг, куда входит и Украина, имеет устойчивую тенденцию по присутствию на нем ограниченного числа государств, куда входит и Украина, обладающих научно-техническим потенциалом создавать и развивать ракетно-космические технологии и предлагающих услуги по выведению разнообразных полезных грузов (ПГ) на орбиты [1].

Однако в современных условиях все возрастающей конкуренции основной тенденцией развития ракетно-космической отрасли на долгосрочную перспективу является повышение эффективности производимой ракетно-космической техники (РКТ), обладающей рядом особенностей, что выделяет ее в отдельный класс техники. Уникальность РКТ состоит в том, что она, как правило, предназначена для реализации конкретной научно-технической программы, не имеющей аналогов. При этом производство агрегатов РКТ носит мелкосерийный или единичный характер. Изделия имеют исключительную сложность, как в проектировании, так и в производстве, обладают высокой стоимостью и должны отвечать высоким эксплуатационным требованиям, что затрудняет проведение анализа качества изделия и его работоспособности на стадии проектирования, поскольку нет возможности сравнить его с аналогом. Поиск путей решения этой проблемы особенно в последние десятилетия привел к постоянно нарастающей тенденции использования в конструкциях РКТ полимерных композиционных материалов (ПКМ) с возрастающим объемом и уровнем ответственности изделий [2]. Однако реализация этих возможностей связана с необ-

ходимостью решения ряда принципиально важных задач по обеспечению конкурентоспособности отечественных изделий РКТ из ПКМ на мировом рынке, охватывающих ключевые аспекты научных основ оптимального проектирования и изготовления изделий этого класса с учетом существующего уровня их производства [3].

### Основная часть

Существующая информация о состоянии оптимального проектирования и технологии производства изделий РКТ из ПКМ свидетельствует о достаточно высоком уровне решения обсуждаемой проблемы. Различные аспекты реализации проектов создания композитных агрегатов летательных аппаратов нашли отражение и решение в монографиях и докторских диссертациях ученых различных организаций, например [4 – 7 и др.]. Большой вклад в решение проблемы научного обеспечения внедрения ПКМ в авиационно-космическую технику внесли ученые отечественной научной школы ХАИ [8]. Однако, обобщая современное состояние проблемы оптимального проектирования композитных изделий РКТ с учетом существующего уровня их производства, можно констатировать, что при наличии большого количества публикаций, в том или ином аспекте относящихся к рассматриваемой проблеме, в настоящее время нет завершенных крупномасштабных комплексных исследований, объединяющих в научном плане единым концептуальным подходом все обсуждаемые вопросы.

Проведенный целенаправленный анализ результатов, содержащихся в цитированных выше исследованиях и ряде других источниках позволил об-

рисовать контуры концепции реализации рационального проекта создания изделий РКТ из ПКМ [9], сущность которой состоит в следующем:

- в интегрированной компьютеризации всего жизненного цикла проектируемого объекта, включающей в себя одновременное решение задач проектирования, технологии производства, эксплуатации, экологии и безопасности производственной жизнедеятельности;

- в научно обоснованном прогнозировании предельно возможного повышения эффективности агрегатов РКТ с учетом существующего уровня их производства;

- во вскрытии сопутствующих существующего уровню производства агрегатов РКТ типовых дефектов и установлении их потенциальной опасности для штатного функционирования изделий в эксплуатации.

С целью максимального повышения эффективности агрегатов РКТ из ПКМ с учетом существующего уровня их производства был разработан проектный комплекс реализации предложенной концепции (рис. 1).

Исходным документом на проектирование изделия РКТ является Техническое задание на создание агрегата, составленное его заказчиком совместно с разработчиком. При составлении этого документа четко формулируются цель и задачи, решаемые данным проектом в глобальном аспекте [10].

Данные из Технического задания поступают непосредственно в проектный комплекс реализации оптимизации конструктивно-технологических параметров, где решается задача обоснованного (с учетом указанного критерия эффективности) выбора материалов для конструкций РКТ и взаимосвязан-

ные с ними задачи синтеза конструктивно-силовых схем (КСС) агрегатов и конструктивно-технологических решений (КТР) узлов, деталей и соединений с учетом ограничений существующего уровня их производства.

В качестве критерия оценки различных вариантов проекта конструкции предлагается выбранный в соответствии с Техническим заданием показатель эффективности создаваемого агрегата РКТ. Остальные показатели эффективности принимаются в качестве дисциплинирующих условий (ограничений), накладываемых на решение оптимизационной задачи. Эту постановку задачи в самом общем виде можно назвать поиском решения в области допустимых значений критериев (поликритериальная задача с различными дисциплинирующими условиями) [11]. Такая постановка задачи, относящаяся к классу задач на условный экстремум, является наиболее обоснованной и объективной для агрегатов РКТ. Действительно, при оптимальном проектировании объектов рассматриваемого класса необходимо удовлетворить целому ряду существенных, но конкурирующих требований. При этом требуется обеспечить максимальную целевую эффективность конструкции, но достичь этого нужно с минимальными капитальными затратами и в минимальный срок. При этом необходимо обеспечить высокие эксплуатационные характеристики с учетом существующего уровня производства агрегатов этого класса. Указанные требования противоречивы, и одновременное достижение оптимальных значений этих критериев невозможно. При этом возникает ряд других более или менее существенных ограничений и связей. Однозначная рекомендация в этих условиях возможна лишь при принятии решения по одно-

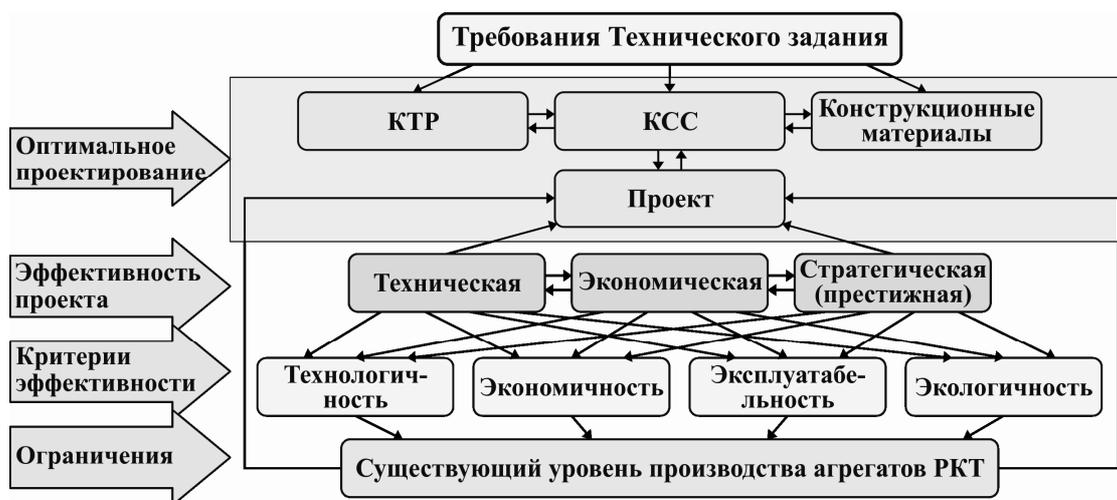


Рис. 1. Проектный комплекс реализации оптимизации конструктивно-технологических параметров композитных изделий РКТ

му критерию и наложении ограничений (дисциплинирующих условий) на другие достаточно существенные для данной задачи критерии. Одним из основных при этом является вопрос, какому из критериев отдать предпочтение и выбрать в качестве материальной функции.

В настоящее время в теории и на практике в качестве самостоятельных направлений развиваются две основные формы оценки эффективности: экономическая [12 – 15] – соизмеряющая результат и затраты, и техническая (целевая) [16 – 18] – соизмеряющая цель и фактический результат.

Некоторые авторы в отдельный класс выделяют задачи оценки стратегической (престижной) эффективности, общий смысл которой сводится к достижению политического, научного, социального или оборонного результата независимо от понесенных для этого затрат («результат любой ценой») [18]. Этот вид эффективности ассоциируется с обеспечением национальных (престижных, жизненно важных) интересов в одной из указанных выше или нескольких из них сферах. По-видимому, стратегическую эффективность необходимо оценивать в исключительных сферах действия.

При постановке задачи экономической эффективности в большинстве случаев схема построения критериев оценки имеет вид либо отношения полученного эффекта от его применения к затратам, связанным с получением данного эффекта – эффект на единицу затрат, либо обратного отношения (стоимость единицы эффекта). При этом оценка проводится, как правило, только по одному указанному критерию. Несмотря на множество различий в трактовке этой эффективности применительно к конструкциям РКТ, все они, так или иначе, сводятся к критерию Д. Л. Томашевича [12 – 15]

$$E = \frac{P}{B} = \eta, \quad (1)$$

где  $P$  – целевая отдача РКТ за время функционирования (эксплуатации),  $B$  – суммарные затраты на изготовление и функционирование РКТ (эксплуатацию).

Различия между критериями, построенными по этой схеме, заключаются лишь в содержании понятия эффект, реже – в содержании понятия затраты [12 – 15].

Для агрегатов РКТ критерий экономической эффективности может трансформироваться в критерий минимума массы [19, 20]. В одних случаях это вполне оправданно, т.к. снижение массы и связанное с этим усложнение технологии почти всегда окупается конечным повышением эффективности [19]. Поэтому в данном случае масса приобретает самостоятельное значение как основной экстремальный критерий эффективности при оптимизации.

В других случаях [5, 7, 19] он лишь позволяет создать облик идеальной конструкции для оценки экономичности к обоснованию применения того или иного материала или конструкции.

Показатель технической эффективности системы обычно представляется в виде [16]

$$W = \Phi(Y_K, Y_H, U_K, U_H), \quad (2)$$

где  $Y_K$  – возможный или фактический достигнутый полезный эффект (конечный результат) функционирования и развития системы;  $Y_H$  – целевой полезный эффект (необходимый конечный результат) функционирования и развития системы;  $U_K$  – возможные или фактические затраты труда на получение  $Y_K$ ;  $U_H$  – минимальные необходимые затраты труда для получения  $Y_H$ .

В работах [16 – 18] показано, что модель технического показателя эффективности  $W$  может быть представлена как система трех комплексных показателей  $P(A)$ ,  $M[Y]$  и  $M[U]$

$$W = \{P(A), M[Y], M[U]\}. \quad (3)$$

Первый показатель  $P(A)$  характеризует целевую надежность системы, второй  $M[Y]$  – целевую производительность системы и третий  $M[U]$  – целевую экономичность системы.

Учет дополнительных функциональных ограничений в проектном комплексе оптимизации параметров композитных изделий РКТ 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. Отметим только, что часть таких оценок может быть синтезирована на основе существующих работ, например [10, 21 и др.], а другая часть подлежит осмыслению, последующему анализу и синтезу [22].

### Результаты исследований

Ввиду большой разнообразности агрегатов РКТ и предъявляемых к ним требованиям применение разработанного проектного комплекса оптимизации напрямую нецелесообразно, поскольку его программная реализация в этом случае будет значительно затруднена. Поэтому требуется декомпозиция общей задачи оптимального проектирования рассматриваемых объектов РКТ на ряд типовых, соответствующих конкретному классу конструкций.

Весь комплекс исследований и их основных результатов представлен в виде анализа типовых оте-

чественных объектов РКТ, реализованных на ряде предприятий ракетно-космического профиля (ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», ПАО «Украинский научно-исследовательский институт технологии машиностроения», ГП «Научно-исследовательский технологический институт приборостроения»):

- несущие отсеки ракет-носителей (РН) – головные обтекатели, межступенные отсеки;
- прецизионные конструкции космических аппаратов (КА) – панели солнечных батарей (СБ), размеростабильные платформы, корпуса спутников.

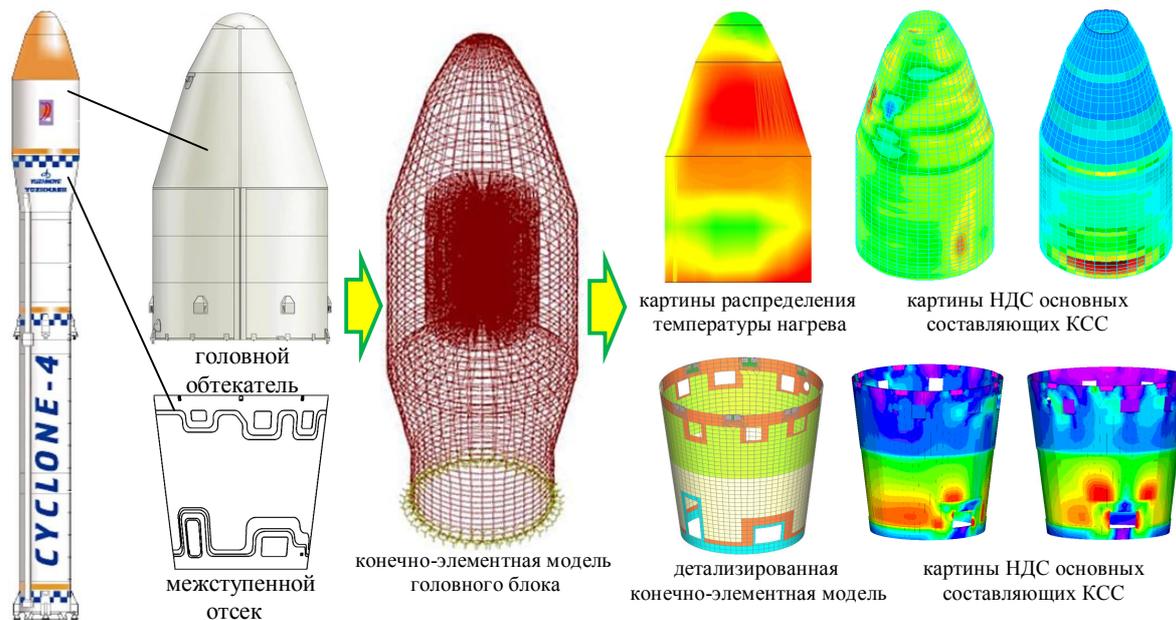


Рис. 2. Несущие композитные отсеки РН «Циклон-4», применительно к которым был реализован предложенный проектный комплекс реализации оптимизации конструктивно-технологических параметров

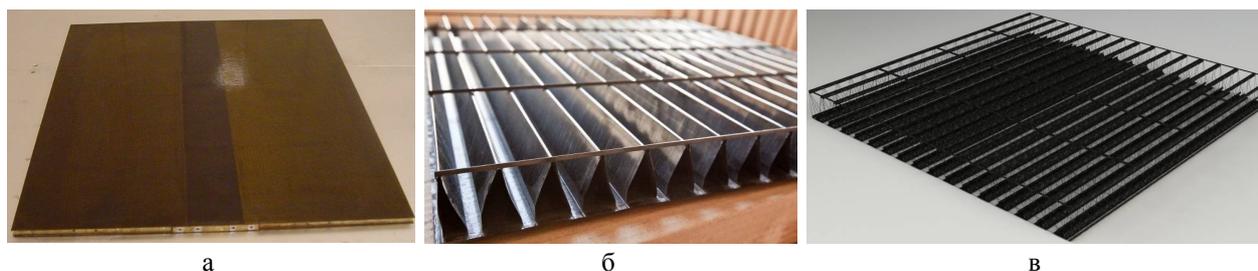


Рис. 3. Исследуемые КСС панелей планарных и концентраторных солнечных батарей: а – сэндвичевая; б – гофрированная; в – ферменная

## Выводы

1. Синтезирован проектный комплекс реализации концепции оптимизации конструктивно-технологических параметров композитных изделий РКТ, позволивший решить задачу обоснованного (с учетом выбранного критерия эффективности) выбора конструкционных материалов и взаимосвязанных с ним задачи синтеза КСС агрегатов и КТР узлов, деталей и соединений с учетом ограничений существующего уровня их производства.

Так минимизация массы головного блока РН «Циклон-4» (рис. 2) обеспечила реализацию потенциальных возможностей ее снижения более чем на 20% в конструктивных элементах при регламентированной несущей способности (прочности и устойчивости) с учетом практически всего спектра внешних воздействий [23], а проведенная оптимизация конструктивных параметров секции СБ различной КСС (рис. 3) дала основание рассчитывать на принципиальную возможность снижения ее поверхностной массы до  $0,55 \dots 0,8 \text{ кг/м}^2$  [24].

2. На основе полученных результатов обеспечено научное сопровождение разработки и производства агрегатов РКТ из ПКМ на отечественных предприятиях ракетно-космического профиля (ГП «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля», ПАО «Украинский научно-исследовательский институт технологии машиностроения», ГП «Научно-исследовательский технологический институт приборостроения»), что позволило воплотить в жизнь ряд уникальных проектов, в том числе КТР составляющих межступенного отсека РН «Циклон-4» из ПКМ,

успешно прошедшего статические испытания, панелей СБ различной КСС для КА, прецизионных конструкций космического назначения и других объектов из ПКМ.

### Литература

1. Перспективы космических исследований Украины [Текст] : сб. статей / под ред. О. П. Федорова. – К. : Академперіодика, 2011. – 240 с.
2. Дегтярев, А. В. Применение композиционных материалов при создании перспективных образцов ракетной техники [Текст] / А. В. Дегтярев, В. А. Коваленко, А. В. Потапов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2012. – №2 (89). – С. 34 – 38.
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. : ХАИ, 2011. – С. 7 – 18.
4. Бахвалов, Ю. О. Методология интегрирования композиционных корпусных элементов в конструкцию эксплуатируемых ракет-носителей [Текст] : дисс. ... д-ра техн. наук : 05.07.02 / Бахвалов Юрий Олегович. – М., 2007. – 520 с.
5. Немировский, Ю. В. Рациональное проектирование армированных конструкций [Текст] : моногр. / Ю. В. Немировский, А. П. Янковский ; под ред. В. М. Фомина. – Новосибирск : Наука, 2002. – 488 с.
6. Бакулин, В. Н. Методы оптимального проектирования и расчёта композиционных конструкций [Текст]. В 2 т. – Т. 1. Оптимальное проектирование конструкций из композиционных и традиционных материалов / В. Н. Бакулин, Е. Л. Гусев, В. Г. Марков. – М. : Физматлит, 2008. – 256 с.
7. Смердов, А. А. Разработка методов проектирования композитных материалов и конструкций ракетно-космической техники [Текст] : дисс. ... д-ра техн. наук : 05.07.02, 05.02.01 / Смердов Андрей Анатольевич. – Москва, 2007. – 410 с.
8. Гайдачук, В. Є. Тридцять років наукової школи з проблеми створення виробів авіаційно-космічної техніки з полімерних композиційних матеріалів [Текст] / В. Є. Гайдачук, О. В. Гайдачук, Я. С. Карпов // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 2(69). – С. 12 – 19.
9. Кондратьев, А. В. Концепция оптимизации основных параметров конструкций авиакосмической техники из полимерных композиционных материалов [Текст] / А. В. Кондратьев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – № 5(72). – С. 13 – 18.
10. Гайдачук, А. В. Научные основы безопасной технологии производства конструкций летательных аппаратов из полимерных композиционных материалов [Текст] : дисс. ... д-ра техн. наук : 05.07.04 / Гайдачук Александр Витальевич. – Х., 2002. – 386 с.
11. Вентцель, Е. С. Введение в исследование операций [Текст] / Е. С. Вентцель. – М. : Советское радио, 1964. – 388 с.
12. Томашевич, Д. Л. Конструкция и экономика самолета [Текст] / Д. Л. Томашевич. – М. : Оборонгиз, 1960. – 202 с.
13. Дракин, И. И. Основы проектирования беспилотных летательных аппаратов с учетом экономической эффективности [Текст] / И. И. Дракин. – М. : Машиностроение, 1973. – 224 с.
14. Саркисян, С. А. Экономическая оценка летательных аппаратов [Текст] / С. А. Саркисян, Э. С. Минаев. – М. : Машиностроение, 1972. – 180 с.
15. Расчеты экономической эффективности новой техники [Текст] : справ. / под ред. К. М. Великанова. – Л. : Машиностроение, 1975. – 432 с.
16. Голубев, И. С. Соизмерение технического уровня и эффективности при проектировании конструкций ЛА [Текст] / И. С. Голубев. – М. : МАИ, 1986. – 90 с.
17. Ильичев, А. В. Эффективность проектируемой техники: основы анализа [Текст] / А. В. Ильичев. – М. : Машиностроение, 1991. – 336 с.
18. Белов, Г. В. Основы проектирования ракет [Текст] / Г. В. Белов, С. И. Зоншайн, А. П. Оскорко. – М. : Машиностроение, 1974. – 256 с.
19. Лизин, В. Т. Проектирование тонкостенных конструкций [Текст] / В. Т. Лизин, В. А. Пяткин. – М. : Машиностроение, 1985. – 344 с.
20. Сердюк, В. К. Проектирование средств выведения космических аппаратов [Текст] / В. К. Сердюк ; под. ред. А. А. Медведева. – М. : Машиностроение, 2009. – 504 с.
21. Коваленко, В. А. Научные основы технологии производства агрегатов ракетно-космической техники регламентированного качества из полимерных композиционных материалов [Текст] : дисс. ... д-ра техн. наук : 05.07.02 / Коваленко Виктор Александрович. – Х., 2014. – 414 с.
22. Бычков, С. А. Основные проблемы создания изделий авиационной и ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов: аналитический обзор [Текст] / С. А. Бычков, В. Е. Гайдачук // *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. Гос. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*. – Вып. 13. – Х., 1998. – С. 6 – 17.
23. Кондратьев, А. В. Комплексный подход к оптимизации проектных параметров несущих отсеков головного блока ракеты-носителя при одновременном силовом и тепловом нагружении [Текст] / А. В. Кондратьев // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»*. – Вып. 67. – Х., 2015. – С. 58 – 72.
24. Кондратьев, А. В. Синтез рациональных параметров панелей солнечных батарей космиче-

ского назначения различных конструктивно-силовых схем [Текст] / А. В. Кондратьев // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. Нац. аэро-

косм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». – Вып. 1 (81). – X., 2015. – С. 7–18.

Поступила в редакцию 9.11.2015, рассмотрена на редколлегии 18.11.2015

**ПРОЕКТНИЙ КОМПЛЕКС РЕАЛІЗАЦІЇ КОНЦЕПЦІЇ ОПТИМІЗАЦІЇ  
КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОМПЗИТНИХ ВИРОБІВ  
РАКЕТНО-КОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ**

*А. В. Кондратьєв*

Синтезовано проектний комплекс реалізації концепції оптимізації конструктивно-технологічних параметрів композитних виробів ракетно-космічної техніки, що дозволяє вирішити задачу обґрунтованого (з урахуванням обраного критерію ефективності) вибору конструкційних матеріалів і взаємозалежних з ним задачі синтезу конструктивно-силової схеми агрегатів і конструктивно-технологічних рішень вузлів, деталей і з'єднань з урахуванням обмежень існуючого рівня їхнього виробництва. Комплекс досліджень та їх основних результатів представлено у вигляді аналізу типових вітчизняних композитних агрегатів ракетно-космічної техніки.

**Ключові слова:** ракетно-космічна техніка, оптимізація, проектний комплекс, конструктивно-технологічні параметри, полімерні композиційні матеріали.

**DESIGN COMPLEX OF IMPLEMENTATION OF CONCEPTION OF OPTIMIZATION  
OF STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF COMPOSITE PRODUCTS  
OF ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY**

*A. V. Kondratiev*

Design complex of implementation of conception of optimization of structural and technological parameters of composite products of rocket and space technology is synthesized. The complex allows to solve the problem of structural material reasonable selection and related problem of synthesis of aggregate structure-loading diagram and structure-technology solutions of units, parts and joints taking into account effectiveness criterion selected and state-of-art manufacture level constraints. Research complex is given in form of analysis of typical domestic objects of rocket and space technology.

**Keywords:** rocket and space technology, optimization, design complex, structural and technological parameters, polymer composite materials.

**Кондратьев Андрей Валерьевич** – д-р техн. наук, доцент, доцент каф. конструкций и проектирования ракетной техники, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: kondratyev\_a\_v@ukr.net.