

УДК 629.7.023

А.В. КОНДРАТЬЕВ

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

## КОНЦЕПЦИЯ ОПТИМИЗАЦИИ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОНСТРУКЦИЙ АВИАКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

*В статье проведен обзор и анализ результатов исследований, посвященных различным аспектам реализации проектов создания конструкций авиакосмической техники из полимерных композиционных материалов. Предложена концепция оптимизации основных параметров ответственных конструкций авиакосмической техники из полимерных композиционных материалов, которая включает в себя пять взаимосвязанных составляющих: проектирование, технология производства, эксплуатация, экология и безопасность производственной жизнедеятельности. Проведен анализ критериальных оценок технологической составляющей проблемы. Приведен краткий обзор и анализ методов многокритериальной оптимизации.*

**Ключевые слова:** авиакосмическая техника, полимерные композиционные материалы, концепция, оптимизация, многокритериальная проблема.

Проектирование сложных технических систем, к которым относятся и конструкции авиационно-космической техники (АКТ), в особенности из полимерных композиционных материалов (ПКМ), является сложной многоаспектной проблемой, связанной с основной их особенностью (но далеко не единственной), которая состоит в том, что сам материал создается в процессе изготовления изделия [1, 2], вынося тем самым во главу угла технологию создания этого объекта.

В свою очередь технология производства изделий АКТ из ПКМ в значительной степени связана с другими важнейшими составляющими этой комплексной проблемы, к которым относятся экономическая, экологическая, включающая в себя и безопасность производственной жизнедеятельности (БЖД), эксплуатации изделия в определенных условиях [3, 4].

Поэтому проектный комплекс оптимизации конструктивных параметров объекта вырастает в многокритериальную проблему, в которой должны синтезироваться знания и результаты исследований многих узких специалистов.

Традиционно проблемные вопросы проектирования изделий АКТ из ПКМ является предметом технической подготовки производства, а именно ее составляющей – конструкторской подготовки производства [5].

Впервые проблема технической подготовки производства конструкций АКТ из ПКМ в двух ее основных аспектах на высоком научном уровне была поставлена и в значительной степени решена в работах, обобщенных в докторской диссертации

В.Е. Гайдачука еще в конце 70-х годов прошлого столетия [6].

Позже, в начале 90-х годов решение технологического аспекта этой проблемы было существенно развито и расширено в докторской диссертации В.Ф. Забашты [7] и его монографии [8].

Решение проблемы выбора рациональных или близких к оптимальным конструктивно-технологическим решениям (КТР) конструкций АКТ из ПКМ в регулярных и нерегулярных зонах нашло глубокое отражение в трудах Я.С. Карпова, обобщенных в его докторской диссертации [9], монографии [10] и учебнике [11].

Позднее, в начале 2000-х годов была поставлена и решена проблема экологической безопасности и безопасности производственной жизнедеятельности в процессах реализации технологии создания изделий АКТ из ПКМ в работах А.В. Гайдачука, обобщенных им в докторской диссертации [12].

На достаточно высоком научном уровне различные аспекты реализации проектов создания изделий АКТ из ПКМ нашли отражение и решение в монографиях и докторских диссертациях ученых МАИ [13-15], Научно-исследовательского института авиационной технологии (НИИАТ) [16, 17], ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского [18, 19] и др.

В ряде решенных комплексных задач обсуждаемой проблемы, включающей в себя, как показано в [3, 4] пять взаимосвязанных составляющих: собственно проектирование, технология производства, экономика, эксплуатация, экология и БЖД – наименее глубоко исследованы вопросы экономики и эксплуатации изделий АКТ из ПКМ.

В этом плане следует назвать только монографию [20], появившуюся в начале широкого освоения ПКМ в конструкциях различных отраслей машиностроения и посвященную экономике первого из представителей композитов – стеклопластика. Что же касается эксплуатабельности конструкций АКТ из ПКМ, то решению этой составляющей проблемы посвящено значительно меньше работ, которые освещают только ее отдельные аспекты [21-23].

Однако завершенных крупномасштабных комплексных исследований, объединяющих в научном плане (теоретическом, экспериментальном и организационно-методологическом) единым концептуальным подходом все составляющие обсуждаемой здесь проблемы до настоящего времени не проведено, хотя в этом направлении ведутся работы в Национальном аэрокосмическом университете им. Н.Е. Жуковского, связанные с выполнением комплексных тем Минобрнауки Украины по плану важнейших фундаментальных программ [24, 25], в которых автор принимает непосредственное участие.

Отсутствие завершенных исследований по решению обсуждаемой комплексной проблемы, по-видимому, связано с двумя основными причинами.

Одной из них является необходимость для такого решения достаточно большого объема результатов, к которому, исходя из сделанных выше ссылок [6 - 25], заметна явная тенденция приближения.

Второй причиной является прогнозируемая этими источниками масштабность концепции оптимизации проектных параметров в данной многокритериальной проблеме реализации проектов создания конструкций АКТ из ПКМ, которая становится возможной только при современном уровне развития информационных компьютерных технологий и перспективных темпах их роста.

Проведенный автором целенаправленный анализ результатов, содержащихся в исследованиях [6 - 25] и ряде других источников позволил обрисовать контуры концепции оптимизации основных параметров в обсуждаемой проблеме, укрупненная блок-схема которой представлена на рис. 1. Блок-схема включает в себя все пять составляющих оптимизации проектных параметров изделий АКТ из ПКМ, каждая из них содержит ряд взаимосвязанных групп факторов разного уровня, для каждого из которых имеет место один или несколько критериев, определяющих оптимальное значение факторов данной группы\*.

Так с технологией связано 2 группы факторов разного уровня. В каждой из них имеет место кри-

терий (критерии), по которому эту группу нужно оптимизировать (минимизировать или максимизировать). По-видимому, эта оптимизация должна реализовываться на различных этапах.

Так 1-я группа факторов «Подготовительные технологические процессы» (ТП) включает в себя:

I уровень

факторы, определяющие качество процессов (операций) подготовки армирующих материалов как этапа реализации технологии изготовления изделия из ПКМ на подготовительной стадии; факторы, определяющие качество процессов (операций) подготовки связующего как этапа реализации технологии и изготовления изделия из ПКМ также на подготовительной стадии; факторы (операции) подготовки оснастки той же подготовительной стадии производства изделия из ПКМ.

II уровень

факторы, определяющие качество конкретного процесса (операции) из группы процессов (операций), составляющей факторы I уровня подготовительной стадии.

Количество факторов I уровня определено 1-й группой «Подготовительные ТП»:

$X_i^{II}$  ( $i=1, 2, 3$ ) – факторы I уровня 1-й группы.

Например, для 1-й группы факторов «Подготовительные ТП»  $X_1^{II}$  – подготовка армирующего материала;  $X_2^{II}$  – подготовка связующего;  $X_3^{II}$  – подготовка оснастки.

$X_j^{II}$  ( $j=1, 2, \dots, k$ ) – факторы II уровня 1 группы.

Количество факторов II уровня  $k$  определяется видом ПКМ (стеклопластик, углепластик, органо-пластик, гибридный КМ того или иного вида и т.д.), а также спецификой производства.

Например,  $X_1^{II2}$  – подготовка армирующего материала расшлихтовкой;  $X_5^{II2}$  – подготовка связующего дозированием;  $X_9^{II2}$  – подготовка оснастки зачисткой и т.п.

Здесь лицом, принимающим решение (ЛПР), является специалист или руководитель технологической службы соответствующего уровня (главка, НИИ, ОКБ и др.)

При необходимости для 1-й группы факторов «Подготовительные ТП» (при дальнейшем анализе специалистами технологами – исследователями, разработчиками задач оптимизации процессов производства изделий из ПКМ) может быть введен III уровень оптимизации: факторы, определяющие качество конкретной операции из группы процессов операций, составляющей факторы II уровня подготовительной стадии.

\* При внимательном анализе нетрудно увидеть, что блок-схема в своей основе содержит схему обобщенного производственного процесса, составляющего базис теории системного подхода развиваемого ранее Л.А. Колесниковым [26], к сожалению, оставшегося незавершенным в связи со смертью автора.

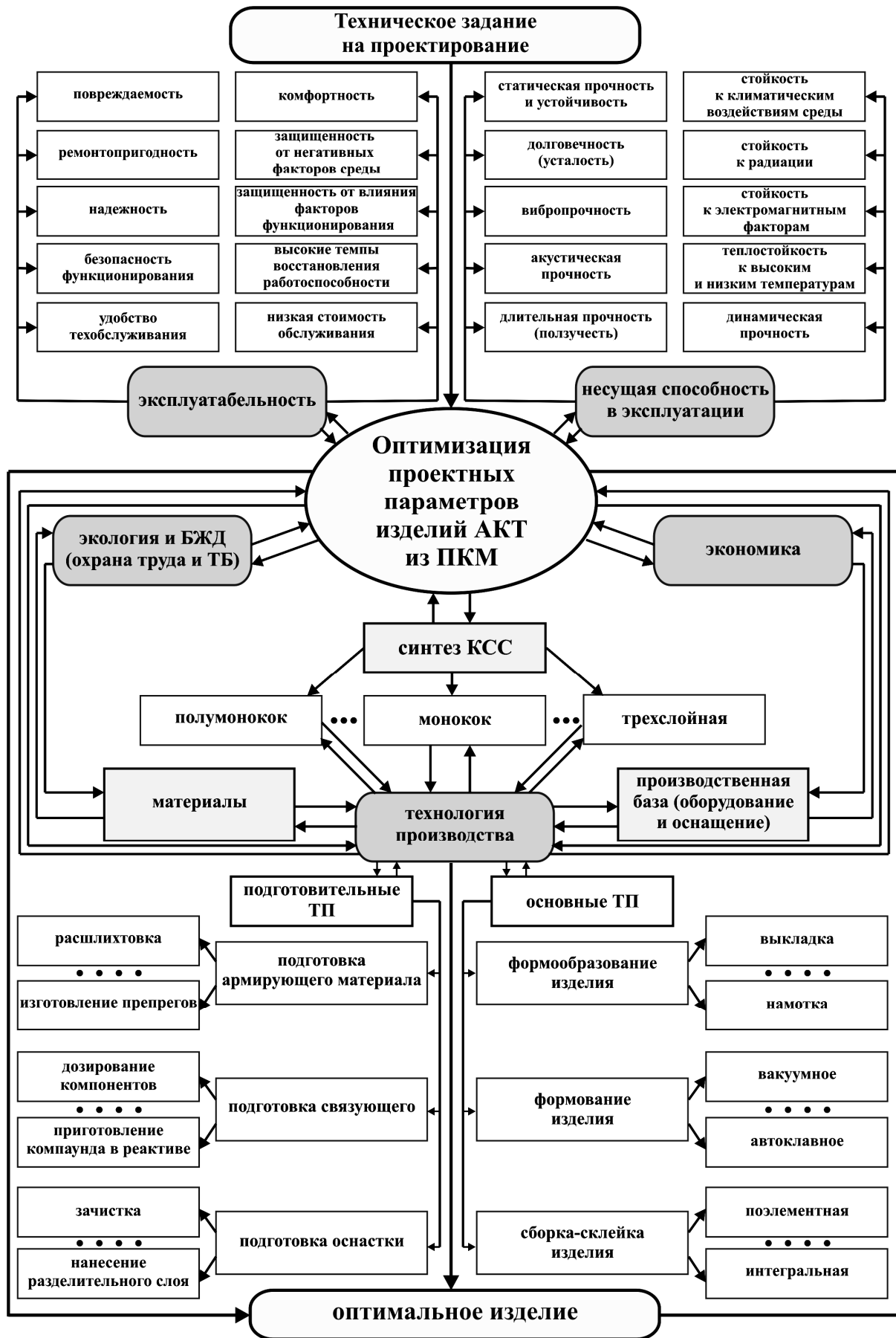


Рис. 1. Укрупненная блок-схема концепции реализации оптимального проекта создания изделий АКТ из ПКМ

Количество факторов III уровня, если он введен, определяется аналогично. Аналогично вводятся факторы для 2-ой группы факторов «Основных ТП»  $X_i^{O1}$ ,  $X_j^{O2}$ ,  $X_r^{O3}$ . В этом случае уровни и количество факторов также определяется ЛПР.

Критерии оптимальности разных групп факторов и различных их уровней могут быть различными и частично или полностью совпадающими. В частности к таким критериям можно отнести: трудоемкость процесса или операции; себестоимость процесса (операции); длительность; энергоемкость; экологичность (включая БЖД процесса или операции); технологичность операции или процесса, определяемую через технические параметры качества [27] или квалиметрически [28].

В наиболее часто встречающемся случае указанные критерии (в [29] называемые целевыми функциями) в разной степени, но одновременно имеют место для оценки (оптимизации) одной и той же группы факторов.

В [29] приведен краткий обзор и анализ методов многокритериальной оптимизации, которые условно разделены на две группы.

Методы первой группы сводят многокритериальную задачу к однокритериальной путем свертывания векторного критерия в суперкритерий, который затем используется как критерий однокритериальной оптимизации.

Наиболее часто используется линейная свертка векторного критерия вида:

$$\Phi(x) = \sum_{i=1}^m \alpha_i F_i(x), \alpha_i \geq 0, \quad (1)$$

где  $\Phi(x)$  – суперкритерий, результирующий свертку;  $\alpha_i$  – коэффициенты относительной важности  $i$ -го критерия (иначе – весовые коэффициенты).

Ко второй группе можно отнести остальные методы многокритериальной оптимизации, которые не производят свертывание локальных критериев в скалярный суперкритерий.

Если все локальные критерии имеют одинаковую важность. В таком случае возможно решение задачи многокритериального программирования на основе принципа справедливого компромисса. Справедливым считается такой компромисс, при котором относительный уровень снижения качества по одному или нескольким критериям не превосходит относительного уровня повышения качества по остальным критериям (меньше или равен) [29].

Если в области компромиссов  $\Gamma_x$  даны два решения  $x'$  и  $x''$ , качество которых оценивается критериями  $F_1(x)$  и  $F_2(x)$ , и решение  $x'$  превосходит решение  $x''$  по критерию  $F_1$ , но уступает ему по критерию  $F_2$ , то производится сравнение этих решений и осуществляется выбор наилучшего на основе принципа справед-

ливого компромисса. Для сравнения этих решений на основе принципа справедливого компромисса вводится мера относительного снижения качества решения по каждому из критериев – цена уступки  $\chi$ :

$$\chi_1 = \Delta F_1(x', x'') / \max_{x', x''} F_1(x), \quad \chi_2 = \Delta F_2(x', x'') / \max_{x', x''} F_2(x), \quad (2)$$

где  $\Delta F_1$  и  $\Delta F_2$  – абсолютные снижения уровня критериев при переходе от решения  $x'$  к решению  $x''$  (для критерия  $F_1$ ) и при обратном переходе (для критерия  $F_2$ ).

Если относительное снижение критерия  $F_1$  больше, чем критерия  $F_2$ , то следует отдать предпочтение решению  $x'$ . Это следует из сравнения цены уступки по каждому критерию.

В [29] приведены также разработанные в [30] методы свертывания локальных критериев в скалярный суперкритерий на основе принципа приближения по всем локальным критериям к идеальному решению, принципа последовательных уступок (принцип лексикографии) и другие.

Отмечается, что метод, основанный на принципе последовательных уступок целесообразно применять для решения тех многокритериальных задач, в которых все частные критерии естественным образом упорядочены по степени важности, причем каждый критерий настолько существенно более важен, чем последующий, что можно ограничиться учетом только попарной связи критериев и выбирать допустимое снижение очередного критерия с учетом поведения лишь одного следующего критерия.

Для решения многокритериальных задач также можно использовать генетические алгоритмы. Генетические алгоритмы – адаптивные методы поиска, которые в последнее время часто используются для решения задач функциональной оптимизации. Они основаны на генетических процессах биологических организмов [31, 32]. В [30] указано, что существуют три проблемы многокритериальной оптимизации.

Первая проблема связана с выбором принципа оптимальности, который строго определяет свойства оптимального решения и отвечает на вопрос, в каком смысле оптимальное решение превосходит все остальные допустимые решения. В отличие от задач однокритериальной оптимизации, у которых только один принцип оптимальности  $f(x^0) \geq f(x)$ , в данном случае имеется большое количество различных принципов, и каждый принцип может приводить к выбору различных оптимальных решений. Это объясняется тем, что приходится сравнивать векторы эффективности на основе некоторой схемы компромисса. В [33] рассмотрены около 10 принципов оптимальности, существующих на сегодняшний день, и отмечается, что наиболее часто используют принцип оптимальности по Парето [34].

Вторая проблема связана с нормализацией векторного критерия эффективности  $F$ . Она вызвана тем, что очень часто локальные критерии, являющиеся компонентами вектора эффективности, имеют различные масштабы измерения, что и затрудняет их сравнение. Поэтому приходится приводить критерии к единому масштабу измерения, т. е. нормализовать их.

Третья проблема связана с учетом приоритета (или различной степени важности) локальных критериев. Хотя при выборе решения и следует добиваться наивысшего качества по всем критериям, однако степень совершенства по каждому из них, как правило, имеет различную значимость. Поэтому обычно для учета приоритета вводится вектор распределения важности критериев  $\Lambda = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ , с помощью которого корректируется принцип оптимальности или проводится дифференциация масштабов измерения критериев.

К сожалению, объем статьи не позволяет дать анализ аналогичный приведенному для технологической составляющей проблемы критериальных оценок для других составляющих, указанных в укрупненной блок-схеме концепции.

Отметим только, что часть таких оценок аналогична обсуждаемым выше, другая часть может быть синтезирована на основе цитированных выше источников [6 - 23], а третья часть подлежит осмыслению, последующему анализу и синтезу.

В заключение необходимо отметить, что данную статью следует считать как первой начальной попыткой построения современной концепции оптимизации основных параметров в многокритериальной проблеме реализации проектов создания ответственных конструкций АКТ из ПКМ, конкурентоспособных на рынке продаж по сравнению с аналогами.

## Литература

1. Композиционные материалы : справочник / под ред. Д.М. Карпиноса. – К. : Наук. думка, 1985. – 592 с.
2. Композиционные материалы : справочник / под ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М. : Машиностроение, 1990. – 512 с.
3. Бычков С.А. Основные проблемы создания изделий авиационной и ракетно-космической техники из полимерных композиционных материалов : аналитический обзор / С.А. Бычков, В.Е. Гайдачук // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – Вып. 13. – Х.: НАКУ "ХАИ", 1998. – С. 6-17.
4. Гайдачук В.Е. Научная школа ХАИ по проблемам создания эффективных конструкций летательных аппаратов из полимерных композиционных материалов / В.Е. Гайдачук, Я.С. Карпов // Технологические системы. – 1999. – Вып. 2(5). – С. 81-83.

5. Горбунов М.Н. Основы технологии производства самолетов / М.Н. Горбунов. – М.: Машиностроение, 1976. – 259 с.

6. Гайдачук В.Е. Теоретические основы технической подготовки производства авиаконструкций из композиционных материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.07.04 / Гайдачук Виталий Евгеньевич. – Х., 1979. – 438 с.

7. Забаишта В.Ф. Научные основы систематизации объектов и моделирование операций в подготовке производства авиаконструкций из композиционных материалов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.07.04 / Забаишта Владимир Федорович. – К., 1993. – 498 с.

8. Забаишта В.Ф. Техническая подготовка производства конструкций из композиционных материалов / В.Ф. Забаишта. – К.: Техніка, 1993. – 147 с.

9. Карпов Я.С. Принципы и методы синтеза параметров металлокомпозитных гетерогенных структур авиаконструкций: дис. ... д-ра техн. наук: 05.07.02 / Карпов Яков Семенович. – Х., 1993. – 490 с.

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

11. Карпов Я.С. Проектирование деталей и агрегатов из композитов: учеб. / Я.С. Карпов; НАКУ «ХАИ». – Х., 2010. – 748 с.

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

13. Образцов И.Ф. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов / И.Ф. Образцов, В.В. Васильев, В.А. Бунаков. – М. : Машиностроение, 1977. – 144 с.

14. Молодцов Г.А. Напряженные элементы конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов: моногр. / Г.А. Молодцов. – М. : Машиностроение, 1993. – 224 с.

15. Сироткин О.С. Соединения конструкций из композиционных материалов / О.С. Сироткин, В.В. Воробей. – Л. : Машиностроение, 1985. – 168 с.

16. Боголюбов В.С. Формообразующая оснастка из полимерных материалов / В.С. Боголюбов. – М. : Машиностроение, 1979. – 183 с.

17. Технология производства изделий и интегральных конструкций из композиционных материалов в машиностроении: моногр. / В.С. Боголюбов, Г.Р. Борох, А.Г. Братухин, В.М. Виноградов. – М.: Готика, 2003. – 515 с.

18. Проектирование, расчет и испытания конструкций из композиционных материалов: сб. статей. – М. : ЦАГИ, 1973. – Вып. 1. – 196 с.

19. Белозеров Л.Г. Композитные оболочки при силовых и тепловых воздействиях / Л.Г. Белозеров, В.А. Киреев. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 388 с.

20. Коган А.М. Экономика производства и применения стеклопластиков / А.М. Коган, Л.И. Кошкин, Х.Р. Паркисян; под общ. ред. Рахлин И. В. – М.: Химия, 1972. – 240 с.

21. Смирнова М.К. Прочность корпусов судна из стеклопластика / М.К. Смирнова. – Л. : Судостроение, 1965. – 331 с.
22. Цыплаков О.Г. Научные основы технологии композиционно-волокнистых материалов: в 2 т. – Т.1 / О.Г. Цыплаков. – Пермь: Пермское книжн. изд-во, 1974. – 317 с.
23. Буланов В.В. Теоретические основы неразрушающего контроля и диагностики состояния элементов конструкций летательных аппаратов вибрационными методами: дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.14, 05.02.09 / Буланов Виталий Владимирович. – К., 1996. – 432 с.
24. Создание теоретических основ технологической механики сотовых конструкций для аэрокосмической техники: отчет о НИР / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»; рук. Гайдачук В.Е. – Х., 2005. – № ГР 0103U004091.
25. Создание научных основ проектирования и производства композитных конструкций авиационно-космической техники: отчет о НИР / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ»; рук. Гайдачук В.Е. – Х., 2009. – № ГР 0106U001060.
26. Колесников Л.А. Основы теории системного подхода / Л.А. Колесников. – К. : Наук. думка, 1988. – 176 с.
27. Прялин М.А. Оценка технологичности конструкций / М.А. Прялин, В.М. Кульчев. – К. : Техніка, 1985. – 120 с.
28. Король В.Н. Метрологическое обеспечение калиметрических показателей авиационной техники на авиационном НТК им. О.К. Антонова / В.Н. Король // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов. – Вып. 20(3). – Х.: НАКУ "ХАИ", 2000. – С. 6-12.
29. Шоробура Н.Н. Решение задач многокритериальной оптимизации сложных объектов и систем [Электронный ресурс] / ДонНТУ. Факультет КИТА. – Режим доступа : [http://masters.donntu.edu.ua/publ2004/kita/kita\\_shorobura.pdf](http://masters.donntu.edu.ua/publ2004/kita/kita_shorobura.pdf).
30. Алиев Р.А. Методы разработки интегрированных АСУ промышленными предприятиями / Р.А. Алиев, В.П. Кривошеев, Г.М. Уланов. – М. : Энергоиздат, 1983. – 320 с.
31. Исаев С.А. Обоснованно о генетических алгоритмах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bspu.ab.ru/Docs/~saisa/ga/text/part1.html>.
32. Батищев Д.И. Оптимизация многоэкстремальных функций с помощью генетических алгоритмов / Д.И. Батищев, С.А. Исаев // Высокие технологии в технике, медицине и образовании: сб. науч. тр. ВГТУ. – Воронеж, 1997. – С. 4-17.
33. Хоменюк В.В. Элементы теории многоцелевой оптимизации / В.В. Хоменюк. – М. : Наука, 1983. – 127 с.
34. Подиновский В.В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач / В.В. Подиновский, В.Д. Ногин. – К. : Наука, 1982. – 256 с.

Поступила в редакцию 10.09.2010

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. каф. проектирования ракетно-космических аппаратов В.Е. Гайдачук, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

## КОНЦЕПЦІЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ КОНСТРУКЦІЙ АВІАКОСМІЧНОЇ ТЕХНІКИ З ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

*А.В. Кондратьєв*

В статті виконано огляд і аналіз результатів досліджень, присвячених різним аспектам реалізації проектів створення конструкцій авіакосмічної техніки з полімерних композиційних матеріалів. Запропоновано концепція оптимізації основних параметрів відповідальних конструкцій авіакосмічної техніки з полімерних композиційних матеріалів, що включає в себе п'ять взаємопов'язаних складових: проектування, технологія виробництва, експлуатація, екологія та безпека виробничої життєдіяльності. Виконано аналіз критеріальних оцінок технологічної складової проблеми. Виконано короткий огляд та аналіз методів багатокритеріальної оптимізації

**Ключові слова:** авіакосмічна техніка, полімерні композиційні матеріали, концепція, оптимізація, багатокритеріальна проблема.

## CONCEPT OF FUNDAMENTAL PARAMETERS OPTIMIZATION OF STRUCTURES AEROSPACE ENGINEERING FROM POLYMERIC COMPOSITE MATERIALS

*A.V. Kondratiev*

The article provides an overview and analysis of the results of studies on various aspects of the realization of projects of the aerospace structures made of polymer composite materials. The concept of optimizing the main parameters responsible aerospace structures made of polymer composite materials, which includes five interrelated components: design, production technology, operation, environment and safety of industrial life. The analysis of criteria ratings techno-logical component of the problem. A brief review and analysis methods for multiobjective optimization.

**Keywords:** aerospace engineering, polymer composites, concept, optimization, multicriteria problem.

**Кондратьєв Андрей Валерьевич** – канд. техн. наук, старший преподаватель, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: kondratyev\_a\_v@mail.ru.