

На правах рукописи

ЧЕРНЯЕВ Александр Вячеславович

**ОПТИМИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ДИСКРЕТНОЙ  
ПОСТАНОВКЕ**

Специальность 05.07.02 –  
Проектирование, конструкция и производство  
летательных аппаратов

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара, 2009 г.

Работа выполнена на кафедре конструкции и проектирования летательных аппаратов Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва» (СГАУ)

<i>Научный руководитель:</i>	доктор технических наук, профессор Комаров Валерий Андреевич
<i>Официальные оппоненты:</i>	доктор технических наук, доцент Смердов Андрей Анатольевич  доктор физико-математических наук, профессор Радченко Владимир Павлович
<i>Ведущее предприятие:</i>	Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный научно-производственный ракетно-космический центр «ЦСКБ-Прогресс», г. Самара

Защита состоится «22» декабря 2009 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.04 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34, корпус 3а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СГАУ.

Автореферат разослан «20» ноября 2009 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент

А.Г. Прохоров

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Использование новых материалов в конструкциях летательных аппаратов (ЛА) традиционно является одним из основных направлений повышения их весовой отдачи и транспортной эффективности. Для авиационных конструкций перспективным представляется использование волокнистых композиционных материалов (стеклопластики, углепластики и т.д.). Их первоначальное внедрение шло по пути использования в несилевых и легко сменяемых агрегатах – обтекателях, створках, рулях и т.п. Накопленный к настоящему времени опыт эксплуатации таких конструкций показал их высокие функциональные качества. Поэтому сейчас в практике ведущих авиационных организаций мира наблюдается переход к существенному использованию высокопрочных слоистых композиционных материалов (КМ) в наиболее ответственных силовых агрегатах планера, таких как крыло, фюзеляж, оперение. Весовая (массовая) доля КМ в конструкциях современных гражданских и боевых самолетов достигает до 30%.

В отличие от конструкций из традиционных материалов, при проектировании которых определению подлежат, как правило, только размерные параметры (например, толщины поперечных сечений), в ходе разработки композитных конструкций требуется установление дополнительных сведений, характеризующих структуру материала (последовательность чередования слоев, углы ориентации волокон). Существующие подходы, основанные на упрощенном моделировании поведения КМ (например, создание конструкций квазиизотропной структуры), часто не позволяют реализовать в многослойных композициях потенциально высокие свойства однонаправленных КМ. Поэтому их эффективное использование в конструкциях ЛА требует применения методов оптимального проектирования.

Специфика композитной конструкции как объекта оптимизации состоит в следующем. Во-первых, технологические особенности строения многослойных композитов, составленных, как правило, из монослоев фиксированной толщины, определяют дискретную природу ряда задач оптимизации их параметров и структуры. Однако в большом числе работ эти задачи ставятся и решаются в непрерывной постановке. Во-вторых, многомерность пространственных параметров усложняет поиск глобального экстремума целевого функционала. Успешное решение такой задачи требует применения адекватного метода оптимизации. Данная характеристика позволяет рассматривать в этом качестве так называемые генетические алгоритмы, относящиеся к новому направлению в оптимизации – эволюционным вычислениям.

В соответствии с этим, **цель диссертационной работы** формулируется следующим образом: разработать методику, алгоритмы и программное обеспечение для проектирования элементов авиационных конструкций из волокнистых композиционных материалов с учетом широкого спектра ограничений по прочности, жесткости и технологическим особенностям их строения.

**Задачи исследования:**

1. Предложить формулировки задач оптимизации параметров и последовательности укладки слоев в элементах авиационных конструкций из композиционных материалов в дискретной постановке.
2. Предложить методы их решения с использованием генетических алгоритмов.
3. Разработать способы настройки собственных параметров генетических алгоритмов применительно к решению рассматриваемого класса проблем.
4. Создать программное обеспечение (ПО), реализующее разработанные методы и алгоритмы.
5. Решить практические задачи.

**Методы исследования:** методы математического моделирования, в том числе методы оптимизации, метод конечных элементов, вычислительный эксперимент, тестирование алгоритмов на специально построенных задачах, в том числе имеющих аналитическое решение.

**Научная новизна:**

- Предложена дискретная постановка задачи о проектировании участка тонкостенной авиационной конструкции, учитывающая множество случаев нагружения различной природы, ограничения по прочности, сдвиговой жесткости и ряд эмпирических рекомендаций.
- В математической формулировке задачи оптимизации параметров трехслойной конструкции с несущими слоями из композиционного материала учтено влияние последовательности чередования монослоев в несущих слоях на запас устойчивости всей панели.
- Построен комбинированный генетический алгоритм, объединяющий в себе механизмы алгоритмов с двоичными и перестановочными операторами для решения задачи оптимизации параметров трехслойной конструкции с несущими слоями из композиционного материала.
- Предложен способ настройки собственных параметров генетических алгоритмов при решении задач оптимизации композитных конструкций за счет сочетания механизмов их динамического регулирования и настройки по тестовым моделям.
- Разработаны новые тестовые модели для настройки алгоритмов оптимизации на решение задач отыскания параметров и последовательности укладки монослоев тонкостенных конструкций из композиционных материалов, а также параметров трехслойных конструкций с несущими слоями из композиционных материалов.

**Практическая ценность работы.** Разработаны методика и программное обеспечение для проектирования авиационных конструкций из композиционных материалов с учетом широкого спектра ограничений, включая технологические. Решена практическая задача проектирования композитного крыла легкого многоцелевого самолета в двух постановках: квазиизотропной и с оптимизацией параметров внутренней структуры, которая выявила резервы массы силовых элементов от 9% до 39% в разных проектах.

**Достоверность** полученных результатов обеспечена использованием моделей классической теории слоистых пластин, критериев прочности, подтвержденных экспериментальными исследованиями других авторов, корректным использованием системы конечно-элементного анализа MSC Nastran и решением известных и специально построенных тестовых оптимизационных задач.

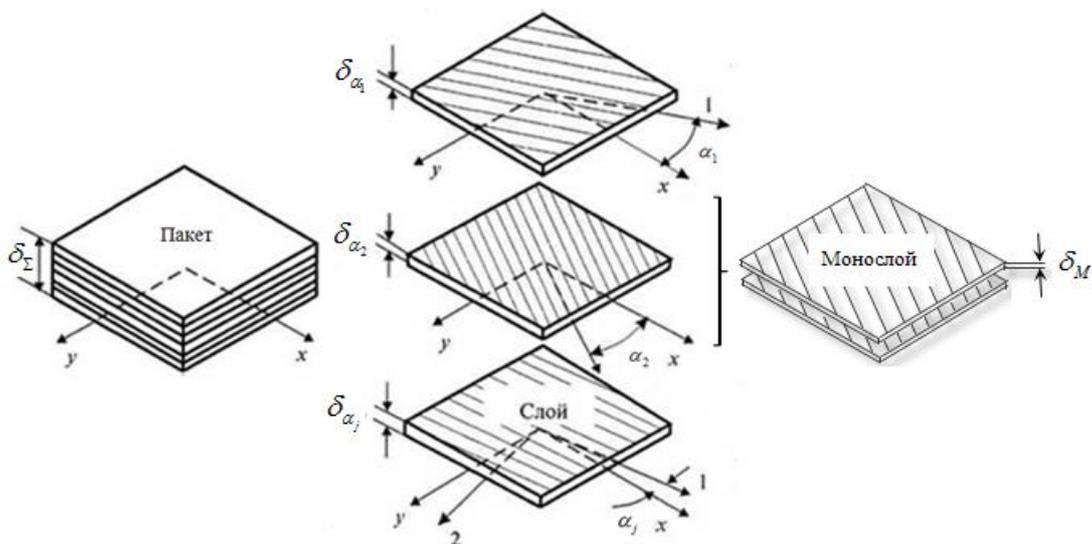
**Апробация работы.** Основные результаты диссертации докладывались на 2-й Всероссийской конференции ученых, молодых специалистов и студентов "Информационные технологии в авиационной и космической технике - 2009" (г. Москва, 2009) и Всероссийской научно-практической конференции "Актуальные проблемы машиностроения - 2009" (г. Самара, 2009).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 5 научных работ, из них 3 – в ведущих рецензируемых научных изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией. Одна работа написана в соавторстве. В диссертацию включены только результаты, полученные лично автором.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа содержит 151 страницу текста, 36 рисунков, 17 таблиц и состоит из предисловия, пяти глав, выводов, четырех приложений и списка литературы из 112 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе дается обоснование актуальности темы диссертации. В разделе 1.1 приведены некоторые сведения о композиционных материалах и их применении в авиационной технике.



*Рисунок 1 – Строение элемента тонкостенной конструкции из композиционного материала*

В разделе 1.2 рассматривается строение элемента тонкостенной конструкции из композиционного материала (рис. 1). Отмечается, что он представляет собой пакет однонаправленных монослоев фиксированной толщины (0,125 мм для современных КМ). Монослои в пакете могут иметь как совпадающие, так и различные направления ориентации волокон. Кроме того, в литературе часто используется понятие «однонаправленный слой»,

применяемое для обозначения суммарной толщины всех монослоев  $\delta_{\alpha_j}$ , имеющих одинаковое направление ориентации волокон в пакете, т.е.

$$\delta_{\alpha_j} = \delta_M \cdot n_{\alpha_j},$$

где  $n_{\alpha_j}$  – количество монослоев, уложенных в направлении  $\alpha_j$ ,  $\delta_M$  – толщина монослоя.

Приводятся основные соотношения классической теории слоистых пластин, использовавшиеся в рамках данной работы для моделирования поведения композита при нагружении в плоскости армирования. Рассмотрены некоторые частные случаи, следующие из основного уравнения этой теории и имеющие наибольший практический интерес. В частности, рассмотрена модель многослойного композита с симметричной уравновешенной укладкой слоев, применявшаяся при решении всех задач данного исследования. Отмечается вклад в развитие методов расчета композитных конструкций ученых Н.А. Алфутова, С.А. Амбарцумяна, А.Н. Андреева, Дж.Е. Аштона, В.В. Васильева, В.Э. Вильдемана, Р.Ф. Гибсона, И.М. Дэниела, Р.М. Джонса, П.А. Зиновьева, О. Ишаиа, Р. Кристенсена, В.Ф. Кутьинова, С.Г. Лехницкого, Ю.В. Немировского, Б.Е. Победри, А.А. Смердова, Дж.М. Уитни, Т. Фудзии, К.Ф. Черных, В.Чу и др.

Раздел 1.3 посвящен вопросам проектирования конструкций из композиционных материалов. Среди особенностей композитов особо выделена возможность одновременной разработки конструкции и материала, что позволяет разделить задачи проектирования на параметрические и структурные. Для их решения могут быть использованы методы оптимизации. Отмечается вклад в развитие методов оптимального проектирования конструкций из композиционных материалов отечественных и зарубежных ученых Н.В. Баничука, В.А. Бунакова, В.В. Васильева, З. Гюрдала, А.А. Дудченко, П.А. Зиновьева, В.А. Комарова, В.Л. Нарусберга, И.Ф. Образцова, Р.Б. Рикардса, А.А. Смердова, Г.А. Тетерса, Р.Т. Хафтки, В.В. Чедрика.

Рассматриваются варианты постановок *параметрических* задач, когда функцией цели выступает масса конструкции, а ограничениями – требования достаточной прочности, жесткости и др. Особое внимание уделяется вопросу выбора проектных переменных. Отмечается, что наиболее часто проектными переменными выступают толщины однонаправленных слоев, изменяющиеся непрерывно внутри всей области допустимых значений. При этом условие кратности  $\delta_{\alpha_j}$  толщине монослоя не соблюдается в процессе оптимизации. Результатом такого проектирования является теоретически оптимальная конструкция, а переход к практически осуществимому проекту, как правило, сопряжен с возможностью нарушения ограничений, выдерживавшихся в ходе оптимизации или получением квазиоптимального решения. В результате предпочтительным представляется решение данного класса задач в дискретной постановке, когда в качестве проектных параметров используются количества монослоев  $n_{\alpha_j}$  в каждом из направлений армирования. Это позволяет в ходе

оптимизации учитывать технологические особенности строения многослойных композитов. Отмечается, что проблема структурной оптимизации, состоящая в отыскании оптимальной последовательности чередования монослоев в пакете, также относится к классу дискретных задач.

**Глобальным** методом оптимизации, способным решать задачи с дискретно изменяющимися проектными параметрами и нелинейными ограничениями, являются генетические алгоритмы (ГА). Указывается, что использование генетических алгоритмов напрямую сопряжено с необходимостью *настройки их собственных параметров*, которые не являются постоянными величинами для различных классов целевых функций и напрямую определяют эффективность работы этих алгоритмов.

В разделе 1.4 сформулированы основные задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена вопросам оптимизации параметров тонкостенных элементов конструкций из композиционных материалов.

В разделе 2.1 разрабатывается математическая формулировка данной оптимизационной задачи. В основу предлагаемой формулировки положены следующие идеи:

- а) замена континуальной тонкостенной конструкции дискретной моделью, состоящей из набора плоских элементарных панелей, в пределах каждой из которых можно пренебречь изменениями действующих усилий;
- б) группирование элементарных панелей в подконструкции, для которых в процессе оптимизации целесообразно сохранение единообразия параметров и структуры материала;
- с) представление каждой подконструкции одной элементарной панелью, рассчитываемой на  $K = L \times M$  случаев нагружения, где  $L$  – число панелей на участке,  $M$  – количество случаев нагружения, задаваемых нормами прочности.

Для тонкостенной композитной конструкции, разбитой на  $p$  элементарных панелей площадью  $S_i$ , функцией цели служит масса конструкции, которая представляется в следующем виде:

$$m_K = \rho_{KM} \delta_M \sum_{i=1}^p \left( S_i \sum_{j=1}^t n_{\alpha_j} \right),$$

где  $\rho_{KM}$  – плотность материала,  $t$  – количество направлений армирования.

*Проектные переменные в задаче – это количество однонаправленных монослоев  $n_{\alpha_j}$  фиксированной толщины  $\delta_M$ , укладываемых в каждом из направлений армирования  $\alpha_j$ .* Предполагается, что направления армирования ограничены следующим набором углов:  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $\pm 45^\circ$ . Схема представления данных о параметрах многослойной композиции такой структуры показана на рис. 2.

В качестве возможных ограничений рассматриваются:

- а) Ограничение *по прочности*, которое записывается применительно к каждому монослою КМ в форме феноменологического критерия Хилла.
- б) Ограничение *по крутильной жесткости* (характерно для конструкций крыльев). Требуется, чтобы обшивка проектируемой конструкции имела

жесткость при сдвиге не менее некоторой заданной величины  $[k_\gamma]$ . Отмечается, что при замене металлической конструкции на изготовленную из композиционного материала величина  $[k_\gamma]$  может определяться исходя из уровня жесткости исходного металлического варианта.

с) Эмпирическое «правило десяти процентов», согласно которому количество монослоев в любом из четырех направлений армирования должно составлять не менее 10% от общего числа монослоев в составе пакета, чтобы исключить возможность прямого нагружения связующего, что в свою очередь исключает полное вырождение слоев в процессе оптимизации.



Рисунок 2 – Конструктивно-технологическая схема кодирования параметров и структуры многослойного композита

Преобразование задачи к безусловно экстремальной форме осуществляется методом внешних штрафных функций. Предлагаются варианты записи штрафных добавок для каждого из перечисленных видов ограничений. Отмечается, что сформулированная задача может быть охарактеризована как целочисленная.

Раздел 2.2 посвящен разработке генетического алгоритма, обеспечивающего эффективное решение сформулированной задачи. Отмечается, что для решения целочисленных задач широкое распространение получили генетические алгоритмы с двоичным кодированием решений. Приводятся сведения об основных принципах работы таких алгоритмов. Отмечается, что генетический алгоритм представляет собой метод решения задач оптимизации, основанный на аналогии с процессами приспособления живых организмов к условиям среды их существования. На каждой итерации ГА работает с некоторым множеством решений – популяцией – к элементам которого последовательно применяются операторы отбора, кодирования в двоичной форме (используется код Грея), рекомбинации, декодирования, мутации и элитизма (рис. 3).

Анализируются основные параметры алгоритма, требующие настройки. Целью настройки является установление значений параметров ГА, которые

предотвращали бы его преждевременную сходимость (получение квазиоптимальных решений) при минимальных затратах вычислительных ресурсов. Отмечается, что для настройки таких параметров ГА, как схема скрещивания, вероятность мутации и число элитных членов, возможно применение так называемых *адаптивных стратегий*, когда на основании некоторых исходных установок алгоритму предоставляется возможность динамически (т.е. в процессе работы) выбирать те или иные значения своих параметров. В то же время указывается на то, что адекватные значения такого параметра ГА, как размер популяции, могут быть определены исключительно "методом проб и ошибок", но не динамически. Для этих целей предлагается использовать *метод тестовых моделей*. Его суть состоит в том, что при настройке алгоритма на решение какой-либо реальной задачи ее условия изменяют таким образом, чтобы не затрагивая физической и математической стороны, получить некоторое предсказуемое (часто тривиальное) решение. Такая измененная задача называется тестовой моделью.

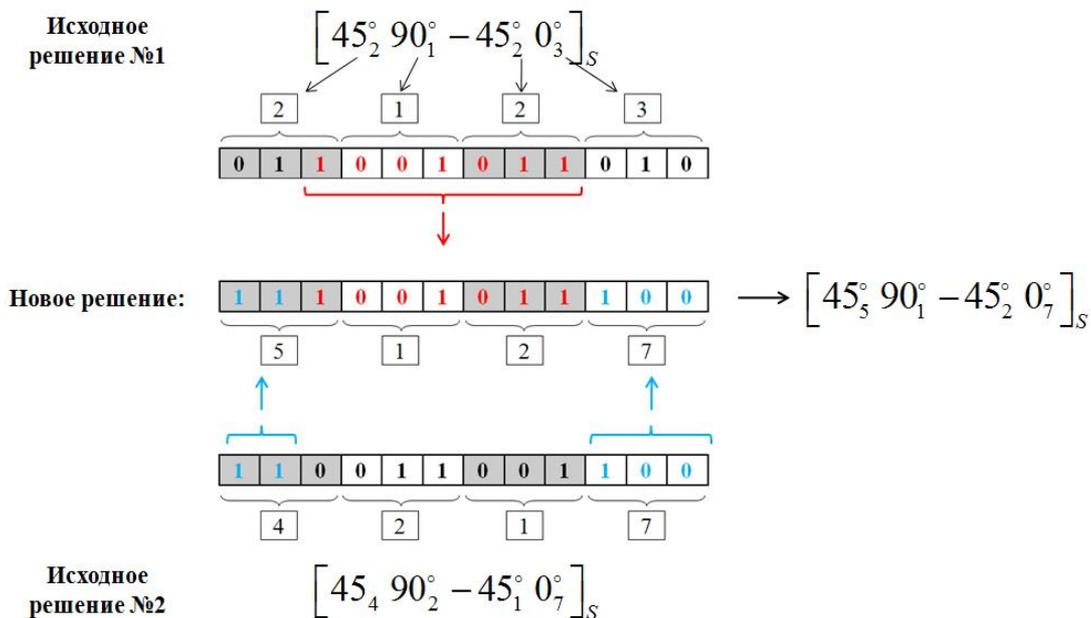


Рисунок 3 – Осуществление операторов кодирования, рекомбинации и декодирования параметров композитных панелей в ходе работы генетического алгоритма

**Динамическая настройка.** Разрабатываются оригинальные способы динамической настройки параметров генетического алгоритма. На их основе строится адаптивный генетический алгоритм (АГА). На тестовых функциях (функции Растригина, Гриванка, Акли и Швепеля) производится сравнение разработанного адаптивного алгоритма с простым ГА, не имеющим механизмов для выполнения динамической настройки своих параметров. В качестве критерия для сравнения алгоритмов используется относительная частота сходимости алгоритма к глобальному оптимуму, определяемая в каждом случае для серии из  $\nu = 40$  запусков:

$$p_{cx}^i = \frac{u}{\nu},$$

где  $u$  – количество запусков ГА, сходимость к глобальному оптимуму в которых была достигнута не более чем за  $i$  итераций. По результатам вычислительного эксперимента выявлено, что разработанный адаптивный генетический алгоритм в большинстве случаев оказывается значительно более эффективным в сравнении с простым ГА.

**Настройка по тестовым моделям.** Предлагается комплекс из четырех тестовых моделей для настройки параметров генетического алгоритма. Во всех случаях объектом оптимизации служит плоская элементарная панель из композиционного материала, работающая при различных условиях нагружения.

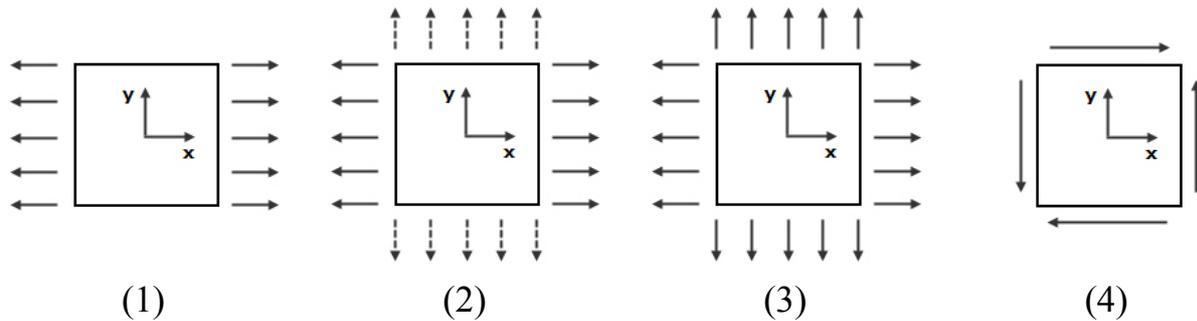


Рисунок 4 – Тестовые модели

Тестовая модель №1. Элементарная панель растягивается одноосной равномерно распределенной силой  $N_x$  вдоль оси X (рис. 4.1). У оптимальной панели вырождаются слои, уложенные под  $\pm 45^\circ$  и  $90^\circ$ , а оставшиеся монослои с направлением армирования  $0^\circ$  формируют полнонапряженный пакет. Прочность конструкции при этом определяется прочностью слоев в направлении волокон.

Тестовая модель №2. Панель подвергается действию двух случаев нагружения (рис. 4.2). При этом в результате оптимизации вырождаются слои, уложенные под  $\pm 45^\circ$ . Получившаяся структура имеет одинаковое количество монослоев в направлениях  $0^\circ$  и  $90^\circ$ , учитывая что случаи нагружения отличаются только ориентацией вектора внешних сил, но не его величиной. Прочность всей такой конструкции определяется прочностью слоев на растяжение в направлении перпендикулярно волокнам, т.е. в большей степени – прочностью связующего. В первом случае ( $N_y = 0$ ) слой, армированный в направлении  $90^\circ$ , будет полнонапряженным, в то время как слой с  $\alpha = 0^\circ$  останется недогруженным. Обратная ситуация имеет место во втором случае нагружения ( $N_x = 0$ ). Названные признаки позволяют судить об оптимальности панели.

Тестовая модель №3. Панель находится в двухосном напряженном состоянии (рис. 4.3). Данная задача интересна наличием целого множества решений, соответствующих глобальному экстремуму, в отличие от предыдущих случаев, когда глобальный оптимум был достижим только при одном наборе параметров из всех возможных. Суть этого явления состоит в том, что восприятие действующих нагрузок может одинаково эффективно

осуществляться как слоями с направлением укладки  $0^\circ$  и  $90^\circ$ , так и диагонально армированными под  $\pm 45^\circ$  слоями. Помимо "первичных" с технологической точки зрения структур толщиной  $n_\Sigma^{opt}$ , которые содержат только два направления укладки (только  $0^\circ$  и  $90^\circ$  или только  $\pm 45^\circ$ ) и имеют в каждом из этих направлений одинаковое число монослоев, оптимальными будут также структуры, содержащие  $n_\Sigma^{opt}$  слоев, в которых задействованы все четыре возможных направления армирования. Во всех случаях конструкция является равнопрочной, а ее прочность определяется в основном свойствами связующего.

Тестовая модель №4. Панель нагружена касательными силами (рис. 4.4). Оптимальная конструкция имеет два направления армирования под углами  $\pm 45^\circ$ . При этом, для получения тривиального результата, когда в каждом из этих направлений содержалось бы равное количество монослоев, требуется чтобы материал одинаково работал на растяжение и сжатие. Это, как правило, несвойственно для реальных КМ, однако при тестировании алгоритма допустимо предположить, что конструкция будет изготовлена из гипотетического материала.

Приводятся данные о настройке разработанного адаптивного алгоритма по предложенным тестовым моделям.

В разделе 2.3 предлагается методика, позволяющая проводить оптимизацию параметров тонкостенной конструкции из КМ на основе ее дискретной модели и с использованием разработанного генетического алгоритма.

**Третья глава** посвящена вопросам оптимизации последовательности укладки монослоев в тонкостенных элементах конструкций из композиционных материалов.

В разделе 3.1 предлагается математическая формулировка данной оптимизационной задачи. Отмечается, что последовательность укладки (чередования) монослоев по высоте пакета существенно влияет на значения изгибных жесткостей  $D_{ij}$  композитной конструкции, которые во многом определяют ее способность сопротивляться потере устойчивости. При этом задача устойчивости сводится к задаче на минимальное собственное значение, представляющее собой параметр нагружения  $\lambda$ , такой, что критические усилия в панели  $N_x^{kp}$ ,  $N_y^{kp}$  и  $N_{xy}^{kp}$  вычисляются по формулам:

$$N_x^{kp} = \lambda N_x, \quad N_y^{kp} = \lambda N_y, \quad N_{xy}^{kp} = \lambda N_{xy}.$$

Приводятся расчетные соотношения для вычисления значений  $\lambda$  применительно к структурному элементу тонкостенной конструкции – плоской прямоугольной пластинке из композиционного материала – при нагружении нормальными силами, сдвигом и комбинированном нагружении.

Задача оптимизации ставится следующим образом: требуется при заданных направлениях армирования и параметрах пакета найти такую последовательность укладки монослоев по его высоте, при которой обеспечивалось бы максимальное сопротивление потере устойчивости.

Изменение числа слоев в составе пакета и направлений их укладки при этом не допускается.

В простейшем случае, когда объектом оптимизации является одна элементарная панель и рассматривается один случай нагружения, целевой функцией, требующей максимизации, предлагается считать параметр нагружения  $\lambda$ . Когда речь идет о подконструкции, которая состоит из набора элементарных панелей и рассчитывается на несколько случаев нагружения, функцией цели можно считать сумму параметров нагружения, т.е.

$$f(\lambda_{i,j}) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q (\lambda_{i,j} + \Delta_{i,j}),$$

где  $p$  и  $q$  – соответственно количество элементарных панелей и случаев нагружения; параметр  $\Delta_{i,j}$  оценивает близость подконструкции к равноустойчивому состоянию.

В качестве проектных переменных служат позиции отдельных монослоев в составе пакета. Для этого перед началом расчета слои группируются произвольным образом, образуя «базовую укладку». Каждому монослою присваивается порядковый номер, соответствующий его позиции в рамках базовой укладки, начиная с внешней поверхности пакета.

В качестве ограничения предлагается рассматривать эмпирическое требование, состоящее в недопустимости следования подряд более чем четырех слоев одинаковой ориентации. Согласно имеющимся экспериментальным данным, следование данному правилу позволяет снизить вероятность расслоения кромок панели. С учетом данного ограничения предлагается форма записи дополненной целевой функции.

Отмечается, что сохранение числа монослоев и направлений армирования неизменными в процессе оптимизации и варьирование исключительно позициями монослоев позволяет рассматривать сформулированную задачу не только как целочисленную, но как комбинаторную с перестановками. Причем количество возможных перестановок, соответствующих различным вариантам укладки, определяется числом монослоев в составе пакета:

$$N_{перест} = n_{\Sigma}!,$$

где  $n_{\Sigma}$  – количество монослоев в составе пакета.

Раздел 3.2 посвящен разработке генетических алгоритмов, способных обеспечить решение сформулированной задачи. Отмечается, что все решения сформулированной задачи, учитывая ее перестановочный характер, представляют собой соединения из  $n_{\Sigma}$  элементов, содержащие все  $n_{\Sigma}$  элементов и отличающиеся поэтому друг от друга только порядком их расположения. Таким образом, недопустимыми в процессе работы генетического алгоритма являются потеря или повторение какого-либо из элементов соединения. При этом стандартный генетический алгоритм, использующий двоичные операторы скрещивания и мутации, не обеспечивает выполнения данного требования.

Построено три генетических алгоритма, в каждом из которых для решения описанной проблемы реализован один из следующих механизмов.

1. Введение дополнительного штрафа по отношению к решениям, в которых в результате выполнения двоичных операторов были потеряны исходные элементы.
2. Проверка решений вслед за выполнением двоичных операторов и возвращение утерянных элементов.
3. Использование специальных перестановочных операторов скрещивания и мутации, которые гарантируют, что все позиции из заданного набора будут встречаться только единожды в пределах каждого решения. При этом пропадает необходимость в использовании бинарного кодирования, вместо которого может быть применено десятичное представление решений. Предлагается вариант осуществления перестановочного оператора скрещивания.

В разделе 3.3 разрабатывается тестовая модель, которая позволила бы сравнить построенные алгоритмы. Отмечается, что при одноосном сжатии квадратной пластины равномерно распределенной силой, параметр нагружения определяется как

$$\lambda = \frac{\pi^2}{N_x} \left[ D_{11} \left( \frac{m}{a} \right)^2 + 2(D_{12} + 2D_{66}) \left( \frac{n}{a} \right)^2 + D_{22} \left( \frac{n}{a} \right)^4 \left( \frac{a}{m} \right)^2 \right],$$

где  $N_x$  – величина сжимающей силы,  $D_{ij}$  – изгибные жесткости,  $a$  – размер пластины в плане,  $m$  и  $n$  – число полуволн ее деформированной поверхности. Анализ данного выражения применительно к пластине, армированной только в направлениях  $0^\circ$  и  $\pm 45^\circ$ , позволил показать, что с точки зрения обеспечения максимальной устойчивости выгоднее слои с армированием под  $\pm 45^\circ$  размещать на наибольшем удалении от срединной поверхности панели. Такой результат является характерным и предсказуемым, что позволяет использовать данную модель в качестве тестовой.

В разделе 3.4 предложенные алгоритмы сравниваются с использованием разработанной тестовой модели. Отмечается, что алгоритм с дополнительными штрафными добавками не проявил поисковых способностей при решении рассматриваемого класса задач. Сравнение двух других алгоритмов показало, что наиболее эффективным оказывается ГА со специальными перестановочными операторами и десятичным представлением решений (Перестановочный Генетический Алгоритм, ПГА). Так, относительная частота сходимости, вычисленная по результатам 50 итераций при популяции, составленной из 100 решений, оказалась для него на 15% выше по сравнению с алгоритмом, реализующим механизм проверки решений. Отмечается пятикратное превосходство алгоритма с перестановочными операторами по быстродействию.

**Четвертая глава** посвящена вопросам оптимизации трехслойных конструкций с несущими слоями из композиционных материалов.

В разделе 4.1 предлагается математическая формулировка задачи оптимизации трехслойной конструкции с несущими слоями из КМ. Отмечается, что проектировочный расчет трехслойной конструкции может быть разделен на два независимых этапа. На первом из них по условию прочности определяются

параметры несущих слоев, что не имеет существенных различий с задачей отыскания параметров тонкостенной панели. Для ее решения используются алгоритм и методика, разработанные во второй главе данного исследования.

На втором этапе параметры несущих слоев (количество монослоев в каждом из заданных направлений армирования) остаются неизменными и подбирается толщина заполнителя из условия сохранения устойчивости панели. Показано, что данная задача может быть сведена к целочисленной. Отмечается, что если несущие слои выполнены из композиционного материала, то последовательность укладки в них монослоев также оказывает влияние на способность панели сопротивляться потере устойчивости.

Задача оптимизации на этом этапе формулируется следующим образом: *требуется отыскать толщину заполнителя и последовательность укладки монослоев в несущих слоях трехслойной панели, отвечающие минимуму ее массы.* То есть, на втором этапе требуется одновременное решение двух существенно разнородных подзадач – целочисленной и перестановочной.

При фиксированных параметрах несущих слоев масса трехслойной панели определяется толщиной заполнителя. Последовательность укладки монослоев в несущих слоях оказывает косвенное воздействие на толщину заполнителя, влияя на изгибные жесткости всей панели и, как следствие, на запас устойчивости, определяемый параметром нагружения  $\lambda$ . Последовательность укладки, найденная из условия «максимум  $\lambda$ », позволит уменьшить потребную толщину заполнителя. Это эквивалентно введению дополнительного критерия эффективности, что делает задачу двухкритериальной.

Проектными переменными в задаче служат позиции монослоев в составе несущего слоя и толщина заполнителя. Ограничением является требование о недопустимости потери устойчивости, т.е. всегда должно выполняться условие:  $\lambda \geq 1$ .

При решении использовался подход, основанный на сведении задачи двухкритериальной оптимизации к однокритериальной задаче методом весовых множителей. Целевая функция записывалась следующим образом:

$$f(c, \lambda) = \beta_1 \cdot f_1^*(c, \lambda) + \beta_2 \cdot f_2^*(\lambda),$$

где  $f_1^*(c, \lambda)$  и  $f_2^*(\lambda)$  – нормализованные значения критериев  $f_1(c, \lambda)$  и  $f_2(\lambda)$ . Функция  $f_1(c, \lambda)$  задает критерий для отыскания толщины заполнителя ( $c$ ), при которой выполняется условие  $\lambda \geq 1$ :

$$f_1(c, \lambda) = c \left( 1 + \frac{\varphi}{\lambda} \right) \text{ при } \varphi = \begin{cases} 0, & \text{если } \lambda \geq 1, \\ 1, & \text{если } \lambda < 1; \end{cases}$$

функция  $f_2(\lambda)$  дает информацию о целесообразности применения той или иной последовательности укладки:

$$f_2(\lambda) = -\lambda.$$

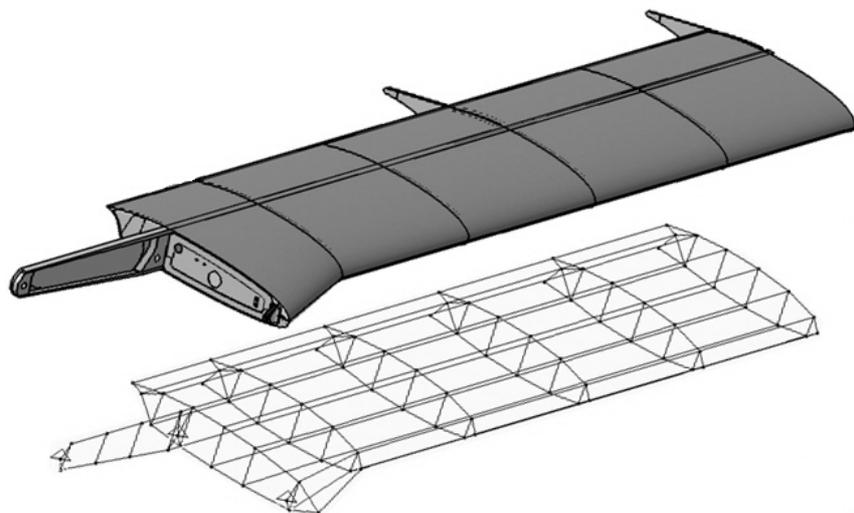
Здесь знак минус введен для перехода к задаче минимизации при отыскании оптимальной последовательности укладки.

Весовые множители  $\beta_1$  и  $\beta_2$  назначались, исходя из очевидного превосходства критерия «минимальная масса» над критерием «максимум  $\lambda$ » по относительной важности, т.е.  $\beta_1 > \beta_2$ , при  $\beta_1 + \beta_2 = 1$ .

Раздел 4.2 посвящен разработке генетического алгоритма, способного обеспечить решение сформулированной задачи. Опыт решения обозначенных классов проблем по-отдельности подсказывает, что для отыскания оптимальной толщины заполнителя (целочисленная задача) целесообразно использование стандартного ГА с двоичными операторами. В то же время, как показано в предыдущей главе, при поиске оптимальной последовательности укладки (перестановочная задача) более эффективным является применение алгоритма, работающего на основе специализированных перестановочных операторов. Предлагается вариант комбинированного генетического алгоритма (КГА), объединяющего в себе механизмы стандартного и перестановочного ГА.

В разделе 4.3 дается оценка работоспособности КГА. Предлагается тестовая модель – квадратная трехслойная панель, нагруженная вдоль направления  $0^\circ$  сжимающей равномерно распределенной силой. Несущие слои панели армированы в направлениях  $0^\circ$  и  $\pm 45^\circ$  и имеют симметричную уравновешенную схему укладки. При  $\beta_1 > \beta_2$  результат оптимизации предсказуем: несущие слои с углами укладки  $\pm 45^\circ$  разнесены на максимальное удаление относительно своих собственных срединных поверхностей (по аналогии с результатом, полученным в разделе 3.3); панель в целом имеет параметр нагружения  $\lambda = 1$ . Тестирование алгоритма показало возможность отыскания глобального оптимума данной задачи с  $p_{cx} = 1,00$  за 50 итераций при относительно небольших размерах популяции: от 30 до 140 решений при числе монослоев с каждой стороны от плоскости симметрии несущего слоя от 8 до 24.

**В пятой главе** описывается реализованное программное обеспечение и решается прикладная задача проектирования композитного крыла легкого многоцелевого самолета.



*Рисунок 5 – Геометрическая и конечно-элементная модели крыла*

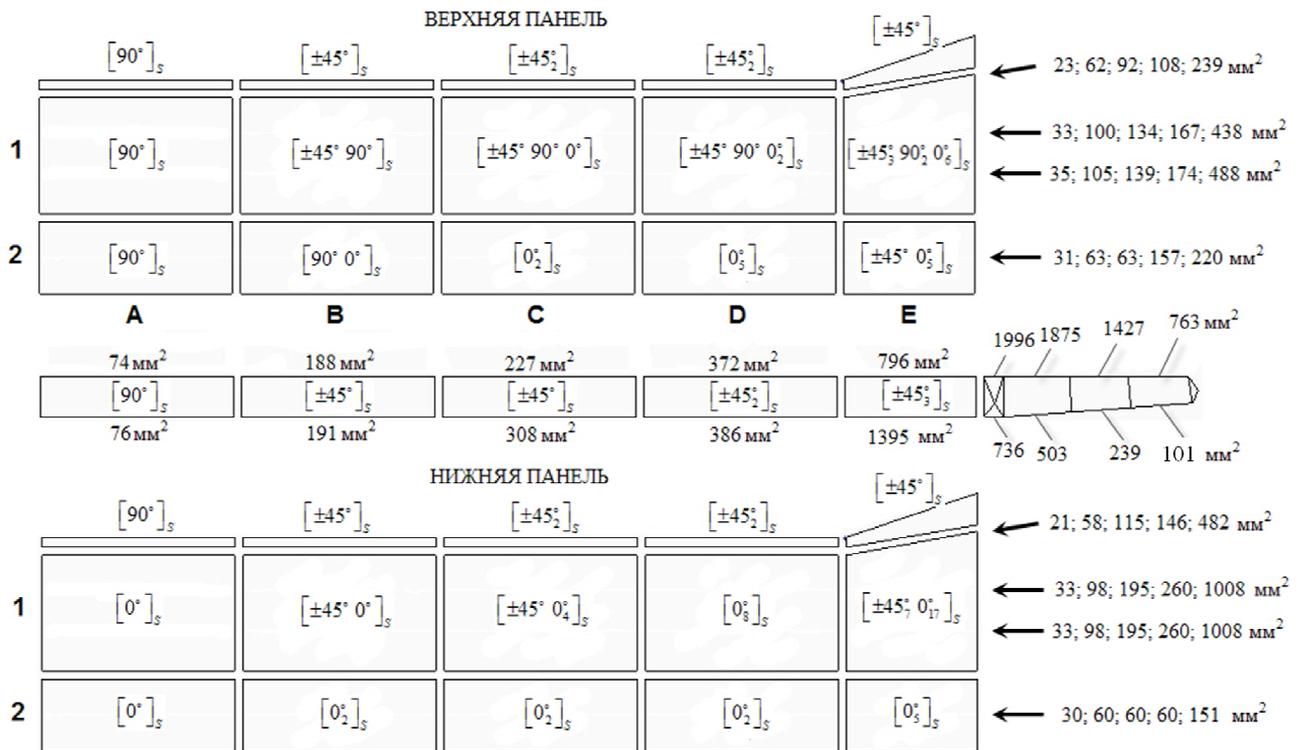


Рисунок 6 – Параметры крыла, оптимального по прочности

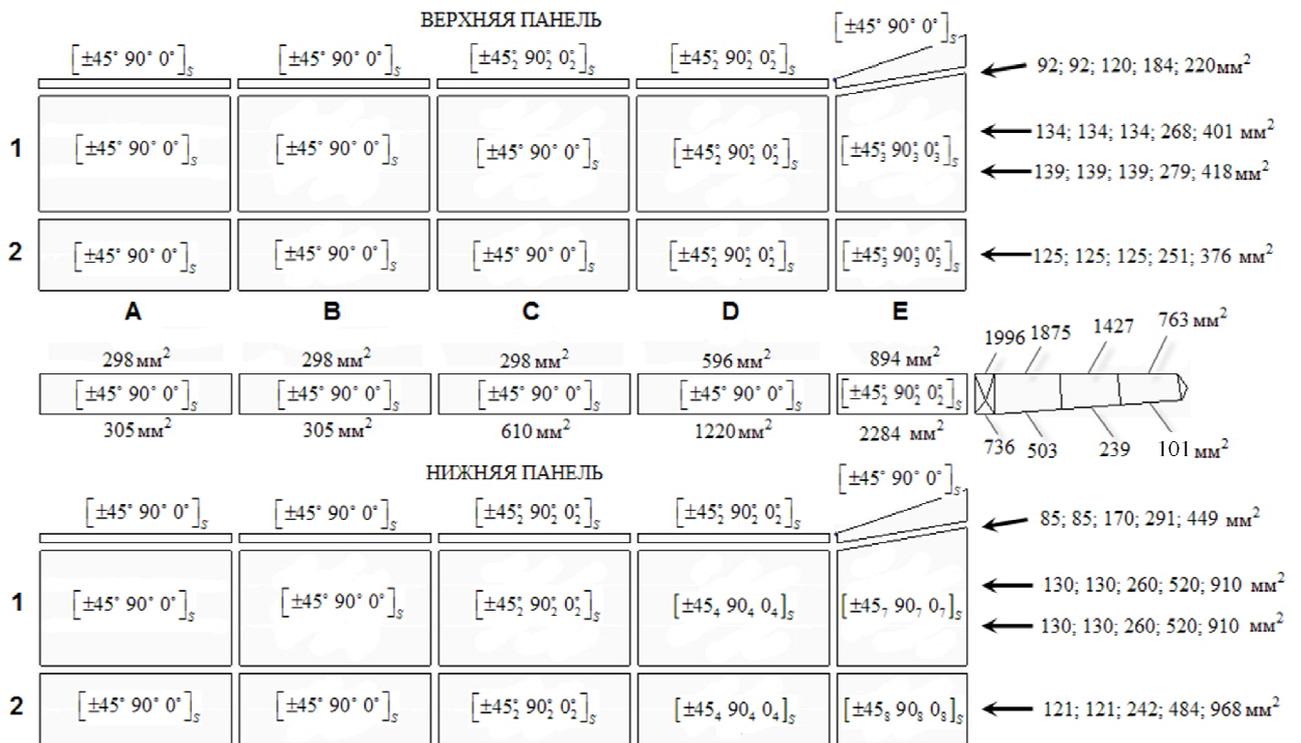


Рисунок 7 – Параметры крыла квазиизотропной структуры

В разделе 5.1 отмечается, что разработанные в рамках данного исследования алгоритмы и модели оптимизации реализованы в системе технических расчетов Matlab в виде трех приложений. В их число входит пакет программ для оптимизации параметров тонкостенных конструкций из композиционных материалов, программы для отыскания оптимальной

последовательности укладки слоев в тонкостенных элементах конструкций из КМ и набор программ для оптимизации параметров трехслойных конструкций.

В разделе 5.2 рассматривается задача проектирования композитного крыла легкого многоцелевого самолета. Расчет крыла выполняется для двух случаев нагружения – А и С. Крыло выполнено по однолонжеронной схеме; конструкционный материал – стеклопластик. Панели обшивки трехслойные, кроме того, редко подкреплены стрингерным набором. Лонжерон также выполнен по трехслойной технологии. Целью расчета является определение параметров несущих слоев панелей обшивки и стенок лонжерона, а также площадей поперечных сечений элементов продольного набора. Геометрическая модель крыла, предоставленная ОКБ – разработчиком самолета, представлена на рис. 5. Здесь же показана конечно-элементная модель крыла, построенная на основе его геометрической модели.

Предполагалось, что все панели будут выполнены по симметричной уравновешенной схеме. Значения углов армирования выбирались из стандартного набора:  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  и  $\pm 45^\circ$ . В качестве ограничений при оптимизации рассматривались:

- только ограничения по прочности, заданные в форме критерия Хилла. При этом не допускалось нарушение сплошности какого-либо из слоев при действии любых нагрузок вплоть до эксплуатационных;
- ограничения по прочности и эмпирическое правило 10%;
- одновременно ограничения по прочности, жесткости и эмпирические требования.

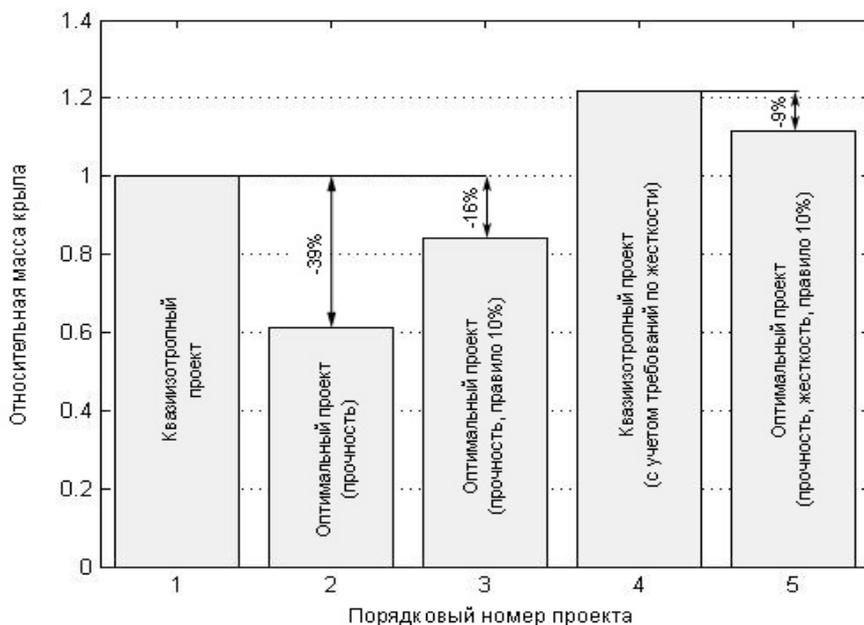


Рисунок 8 – Сравнительная характеристика квазиизотропных и оптимальных проектов

Проекты, полученные с использованием разработанного программного обеспечения, сравнивались с проектами крыла квазиизотропной структуры. Во всех случаях отмечается существенное преимущество оптимальных проектов. Так, например, оптимальный проект, полученный с учетом только ограничения

по прочности (рис. 6) имеет 39% выигрыш по массе в сравнении с квазиизотропным крылом (рис. 7). На рис. 6 и 7 стрелками указано положение стрингеров, рядом – параметры их поперечных сечений. Сравнительная характеристика всех полученных проектов приведена на рис. 8.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Разработана методика, алгоритмы и программы проектирования тонкостенных элементов авиационных конструкций из волокнистых композиционных материалов с учетом широкого спектра ограничений по прочности, жесткости и ряда эмпирических рекомендаций, которые позволяют находить минимально необходимую толщину пакета и порядок укладки каждого монослоя.
2. Предложена математическая формулировка задачи оптимизации параметров трехслойной панели с несущими слоями из композиционных материалов, учитывающая влияние последовательности укладки монослоев в несущих слоях на запас устойчивости всей панели.
3. Разработаны методы решения сформулированных задач с использованием генетических алгоритмов.
4. Разработан комбинированный генетический алгоритм, объединяющий в себе механизмы для одновременного решения целочисленной и перестановочной составляющих задачи проектирования трехслойной панели.
5. Предложен способ настройки собственных параметров генетических алгоритмов при решении задач оптимизации композитных конструкций за счет сочетания механизмов их динамического регулирования и настройки по тестовым моделям.
6. Разработаны новые тестовые модели для настройки алгоритмов оптимизации на решение задач отыскания параметров и последовательности укладки монослоев тонкостенных конструкций из композиционных материалов, а также параметров трехслойных конструкций с несущими слоями из композиционных материалов.
7. Решена практическая задача оптимизации параметров композитного крыла легкого многоцелевого самолета. Показано, что оптимальные проекты, найденные с использованием разработанных программ, обладают значительно большей весовой эффективностью, чем проекты крыла квазиизотропной структуры.

### **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ**

*в ведущих рецензируемых научных изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией:*

1. Черняев А.В. Применение генетических алгоритмов при проектировании авиационных конструкций из композиционных материалов / А.В. Черняев // Полет. – М.: Машиностроение, 2009. – №7. – с. 50-55.
2. Комаров В.А. Сравнительный анализ различных подходов к проектированию структур тонкостенных элементов из композиционных материалов / В.А.

Комаров, **А.В. Черняев** // Вестник СГАУ. – Вып. 1 (17). – Самара: Изд-во СГАУ, 2009. – с. 155-159.

3. Черняев А.В. О настройке генетических алгоритмов для решения задач оптимального проектирования конструкций из композиционных материалов / А.В. Черняев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Специальный выпуск: Актуальные проблемы машиностроения. – Самара: Изд-во Самарского научного центра РАН, 2009. – с. 243-247.

*в других изданиях:*

4. Черняев А.В. О некоторых путях повышения эффективности тонкостенных конструкций из композиционных материалов / А.В. Черняев // Студенческая наука аэрокосмическому комплексу. – Вып. 9. – Самара: Изд-во СГАУ, 2009. – с. 60-66.

5. Черняев А.В. Применение генетических алгоритмов для решения задач оптимального проектирования тонкостенных элементов авиационных конструкций из композиционных материалов / А.В. Черняев // Информационные технологии в авиационной и космической технике-2009. Тезисы докладов. – М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2009. – с. 17.