

На правах рукописи



Арувелли Сергей Витальевич

Методика определения облика управляемой планирующей парашютной грузовой системы под параметры транспортной операции

Специальность:

05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент

Долгов Олег Сергеевич

Официальные оппоненты:

Сетуха Алексей Викторович – доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», научно-исследовательский вычислительный центр, ведущий научный сотрудник

Аругюнов Артём Георгиевич – кандидат технических наук, акционерное общество «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», главный конструктор проектно-конструкторского центра многоразовых ракетно-космических систем им. Р.Л. Бартини.

Ведущая организация:

федеральное казенное предприятие «Государственный казенный научно-испытательный полигон авиационных систем», Московская область, п. Белозерский

Защита состоится 18 декабря 2020 года в 09:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.10 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» и на сайте https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=118254.

Автореферат разослан «_____» _____ 2020 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.10,
к.т.н., доцент



Денискина Антонина Робертовна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

В настоящее время возрастает потребность в применении управляемых планирующих парашютных грузовых систем (УППГС) в связи с активным освоением Арктики и других труднодоступных районов, необходимостью беспосадочной доставки грузов в районы стихийных бедствий, в горячие точки и для проведения поисково-спасательных операций, наблюдается общая тенденция к увеличению роли десантных операций вооружённых сил.

В связи с расширением областей применения УППГС растут потребности в разработке и улучшении методик их проектирования. Одним из наиболее перспективных направлений, призванным удовлетворить эти потребности и повысить эффективность разработки, является использование при проектировании таких систем методов многокритериальной и многодисциплинарной оптимизации, позволяющих перейти от решения отдельных локальных задач к комплексной многодисциплинарной системе определения облика УППГС. Такой подход позволяет адекватно оценить функционирование сложной технической системы в реальных и прогнозируемых условиях эксплуатации. Однако переход от традиционных методик проектирования УППГС к многодисциплинарному подходу оптимального проектирования сопровождается необходимостью математического моделирования функционирования системы с высокой точностью и учёта эффектов, обусловленных динамикой полёта системы груз-парашют. Поэтому расчётно-теоретическое определение характеристик и оптимизацию конструктивных параметров УППГС необходимо проводить на базе комплексной математической модели функционирования системы груз-парашют, адаптированной к оптимизационным расчётам и учитывающей заданные требования и ограничения, междисциплинарные связи и динамику посадочного манёвра.

Конструкции УППГС, спроектированные с помощью существующих методик, не вполне удовлетворяют современным требованиям к высокоточным системам доставки грузов десантированием. Проектирование традиционными способами подразумевает большие экономические и временные затраты. Разработка методики определения облика УППГС тесно связана с целым рядом теоретических и практических вопросов, удовлетворительное решение которых до настоящего времени не получено. Это объясняется, прежде всего, тем, что традиционные методики базируются на решении отдельных дисциплинарных задач, а принятие решений чаще всего основывается на интуитивных методах, а не на формальных математических методах поиска оптимальных проектных решений.

Среди ведущих предприятий авиационной и космической отраслей наблюдается устойчивая тенденция к переходу и использованию методов многодисциплинарной

оптимизации и высокоточного математического моделирования. Внедрение научных достижений по указанным направлениям в область разработки парашютных систем (ПС) создаёт предпосылки перехода от традиционных методов проектирования к парадигме высокоточного оптимального проектирования, что обеспечивает повышение точности прогнозирования характеристик разрабатываемых ПС, снижение рисков проектов и сокращение финансовых и временных затрат на процесс разработки.

Актуальность работы заключается в том, что разработанная методика позволяет повысить эффективность проектирования УППГС, оптимизировать конструкцию по нескольким критериям под заданную транспортную операцию и достигнуть улучшения требуемых характеристик для решения широкого круга важных практических задач точного десантирования грузов, востребованных в транспортной и военных отраслях.

Актуальность диссертационного исследования обусловлена следующими факторами:

1. Проблема определения облика УППГС затрагивает большую номенклатуру прикладных задач, связанных с доставкой грузов десантированием.
2. Необходимость повышения эффективности авиационных транспортных систем и транспортных операций, включающих десантирование грузов.
3. Необходимость применения УППГС в составе транспортных систем в широком диапазоне погодных условий для точного приземления груза в заданную точку.
4. Перспективным направлением развития методов проектирования УППГС является переход от решения отдельных локальных (дисциплинарных) задач к созданию комплексных многодисциплинарных систем определения облика, применение и внедрение методов многодисциплинарной и многокритериальной оптимизации.
5. Необходимость оптимизации конструкции УППГС под определённый тип транспортных операций, используемых при решении ключевых проблем доставки грузов.

Разработка методики определения облика УППГС с учётом специфики транспортной операции является актуальной задачей, решение которой позволит увеличить эффективность авиационных транспортных систем и транспортных операций, включающих десантирования грузов.

Степень разработанности темы

Основы для методик расчёта и проектирования планирующих ПС были заложены во второй половине 20-го века на базе методов проектирования ПС с круглым куполом. Основные принципы расчёта ПС и парашютов без аэродинамического качества были подробно рассмотрены Лобановым Н.А. Базовым вопросам проектирования и расчёта традиционных грузовых ПС посвящена работа Стасевича Р.А.

Методология формирования облика ПС для тяжёлых и сверхтяжёлых грузов, анализ технико-экономических критериев и эффективности парашютной техники, вопросы применения математических моделей при проектировании ПС, математические модели и методы исследования формообразования, аэродинамики, аэроупругости и прочности парашютов, динамики системы груз-парашют освещены в работах Лялина В.В., Морозова В.И., Пономарева А.Т. и Рысева О.В., Пономарева А.Т., Васильева М.И. и др.

Подробная методология проектирования, изготовления и испытания парапланерной техники, отдельные аспекты которой можно применять при проектировании планирующих ПС, представлена в работе Иванова П.И.

Анализ влияния различных конструктивных параметров на лётно-технические характеристики (ЛТХ) и устойчивость планирующих парашютов, отдельные проблемы проектирования планирующих ПС с учётом требований, предъявляемых к высокоточным системам доставки грузов рассмотрены в работах Lingard J.S. Системному описанию методов расчёта и проектирования ПС для различных применений посвящены работы Кнаске Т.В. и др.

В связи с необходимостью использования систем доставки грузов в различных погодных условиях и высокоточного приземления груза в заданную область в настоящее время ведутся активные исследования в области высокоточных авиационных систем доставки грузов, проводятся конференции и демонстрации этих систем в действии.

Актуальные разработки в области высокоточных систем доставки грузов на основе планирующих ПС, алгоритмы наведения, навигации и управления, математические модели динамики и подходы к управлению УППГС описаны, систематизированы и проанализированы в работе под редакцией Yakimenko O.A.

Согласно анализу открытых источников, задача определения облика УППГС под параметры транспортной операции с применением эволюционных алгоритмов оптимизации исследована недостаточно, недостаточно полно разработаны методики, основанные на современных методах междисциплинарной и многокритериальной оптимизации. В связи с этим существует необходимость в разработке методики определения облика УППГС, базирующейся на современном методологическом аппарате.

Цели и задачи исследования

Цель работы – разработка методики определения облика управляемой планирующей парашютной грузовой системы на основе эволюционного алгоритма и междисциплинарной архитектуры оптимизации, учитывающей специфику транспортной операции и позволяющей оптимизировать конструкцию по нескольким критериям.

Поставленная цель достигается последовательным решением следующих **задач**:

1. Параметризация конструкции УППГС, формализация требований транспортных операций к УППГС и ограничений, накладываемых условиями эксплуатации высокоточных авиационных систем доставки грузов.
2. Разработка математической модели функционирования УППГС на основе существующих моделей УППГС и валидация моделей путём сравнения результатов математического моделирования с экспериментальными данными.
3. Разработка методики определения облика УППГС под параметры транспортной операции и её валидация путем сравнения рассчитанных характеристик УППГС с характеристиками, заявленными производителями.
4. Проведение вычислительного эксперимента по определению влияния конструктивных параметров на характеристики УППГС.
5. Оценка эффективности разработанной методики путем решения задач определения облика УППГС.

Объектом исследования является управляемая планирующая парашютная грузовая система.

Предметом исследования является применение эволюционных алгоритмов и многодисциплинарных архитектур оптимизации для решения задачи определения облика управляемой планирующей парашютной грузовой системы.

Научная новизна

Разработана методика определения облика УППГС на основе многокритериального генетического алгоритма и архитектуры многодисциплинарной оптимизации. Методика допускает трансформацию вектора целевых функций и позволяет найти оптимальный по нескольким критериям вектор конструктивных параметров под цели и требования транспортной задачи.

Научная новизна диссертации заключается в том, что:

- разработана математическая модель функционирования УППГС, особенностями которой являются адаптированность к оптимизационным расчётам, учёт междисциплинарных связей и эффекта динамического торможения при оценке скорости приземления;
- предложено алгоритмическое согласование многодисциплинарных методов, что позволяет ускорить процесс проектирования УППГС и повысить его эффективность за счёт многомерной оптимизации проектных параметров по сравнению с традиционными подходами, где проектирование ведётся последовательно по дисциплинам, после чего следует этап их согласования.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость работы заключается в создании методики решения задачи определения облика УППГС с учётом требований и ограничений транспортной операции, в общей постановке и решении задачи многодисциплинарной многокритериальной оптимизации облика УППГС на базе численных методов и обобщений известных решений в области проектирования УППГС.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что разработанная методика определения облика УППГС позволяет при наличии технико-экономических ограничений определить оптимальный по заданным критериям облик системы и принять решение при наличии нескольких критериев оптимальности. Разработанные алгоритмы и программная реализация решения задачи определения облика УППГС, позволяют при проектировании УППГС:

- повысить качество проектно-конструкторских работ по созданию УППГС;
- снизить финансовые и материальные затраты;
- сократить время этапа предварительного проектирования за счёт широкого использования современных методов оптимизации, математического моделирования и средств компьютерного моделирования;
- сформулировать целевые рекомендации по определению облика УППГС.

Разработанная методика определения облика УППГС может быть использована как в процессе проектирования новых парашютных систем с улучшенными характеристиками, так и для модернизации старых конструкций путём переработки отдельных элементов системы.

Методология и методы исследования

При формализации требований и ограничений, моделировании УППГС, проведении вычислительных экспериментов и анализе полученных данных используются расчётно-теоретические методы исследования.

Декомпозиция задач, построение математических моделей и алгоритмов, анализ результатов базируются на принципах системного анализа.

При разработке математической модели функционирования УППГС применяются методы математического моделирования.

Математическая задача отыскания оптимальных значений конструктивных параметров УППГС поставлена как задача многокритериальной оптимизации в смешанно целочисленной постановке и решается математическими методами оптимизации.

Решение задач диссертационной работы базируется на следующих методах исследования:

- методах математического моделирования статических и динамических систем (моделирование УППГС);
- численных методах (решение дифференциальных уравнений, описывающих функционирование УППГС);
- математических методах оптимизации (решение оптимизационной задачи определения облика УППГС): многокритериальный генетический алгоритм NSGA-II в смешанно целочисленной постановке задачи, монолитная архитектура полностью интегрированной многодисциплинарной оптимизации MDF. Алгоритм классифицируется как стохастический глобальный метод поиска решения;
- методах программирования оптимизационных алгоритмов (реализация алгоритма методики в виде программы);
- методах автоматизированного проектирования (построение методики определения облика УППГС).

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие **научные положения**:

- математическая модель функционирования УППГС, определяющая характеристики системы по заданным требованиям транспортной операции;
- методика определения облика УППГС под параметры транспортной операции на основе многокритериального генетического алгоритма и архитектуры многодисциплинарной оптимизации при наличии нелинейных ограничений в смешанно целочисленной постановке задачи оптимизации.

Внедрение результатов работы

Практическая значимость подтверждается тем, что результаты работы были использованы в программе ДПО МАИ с АО «НИИ Парашютостроения» и внедрены в организациях, связанных с проблемами десантирования полезной нагрузки, ПАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева», ПАО «Ил», общероссийской общественной спортивной организации «Объединенная федерация спорта сверхлегкой авиации России».

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность разработанной методики определения облика УППГС и полученных на её основе результатов обеспечивается обоснованностью принятых исходных предпосылок и допущений, адекватным применением сертифицированных пакетов прикладного программного обеспечения (MATLAB). Достоверность подтверждается верификацией и валидацией используемых математических моделей, проверкой методики на адекватность, заключающейся в сравнении полученных расчётным путём характеристик с характеристиками существующих УППГС. При этом отклонение в значениях между расчётными и заявленными

производителями параметрами и характеристиками не превышает $\pm 8.3\%$. Результаты и выводы работы согласуются с результатами исследований других авторов.

Апробация результатов работы

Основные положения работы были доложены и обсуждены на следующих научно-технических конференциях:

- 15-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2016»;
- XLV Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения – 2019»;
- 54-е Научные чтения памяти К.Э. Циолковского;
- 18-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2019».

Публикации автора по теме диссертации

Основные положения и результаты работы опубликованы автором в четырёх научных статьях в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ, а также содержатся в тезисах докладов (9 работ) на научно-технических конференциях всероссийского и международного значения.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 195 наименований и одного приложения. Общий объем диссертации – 230 страниц, включая 14 таблиц и 66 рисунков.

Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность диссертационного исследования и приведён краткий обзор состояния проблемы проектирования и определения облика УППГС, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, дана общая характеристика диссертации.

В **первой главе** выделены задачи, решаемые с помощью УППГС. Сформулировано одно из направлений развития перспективных авиационных транспортных систем – применение УППГС для десантирования отработанных аккумуляторов электрического самолёта с целью увеличения его дальности.

Проведён обзор и анализ состояния работ по тематике УППГС. Приведены основные нерешённые проблемы, направления развития УППГС и методов их проектирования.

Проведён анализ конструкции УППГС и предложена схема её параметризации (рисунок 1). Для упрощения анализа конструктивных решений и уменьшения вычислительных затрат конструкция ППГС параметризована минимальным количеством геометрических параметров, представляющих наиболее значимые параметры по степени

влияния на лётно-технические, экономические характеристики и характеристики устойчивости.

Облик ППГС формализован в виде вектора конструктивных параметров системы:

$$\mathbf{x} = [L, b, c_{\max}, l_0, d, n, \mathcal{G}_0], \quad (1)$$

где L – размах крыла в плане; b – средняя аэродинамическая хорда крыла; c_{\max} – максимальная толщина профиля крыла; l_0 – эффективная длина строп; d – диаметр строп; n – количество строп; \mathcal{G}_0 – угол установки крыла.

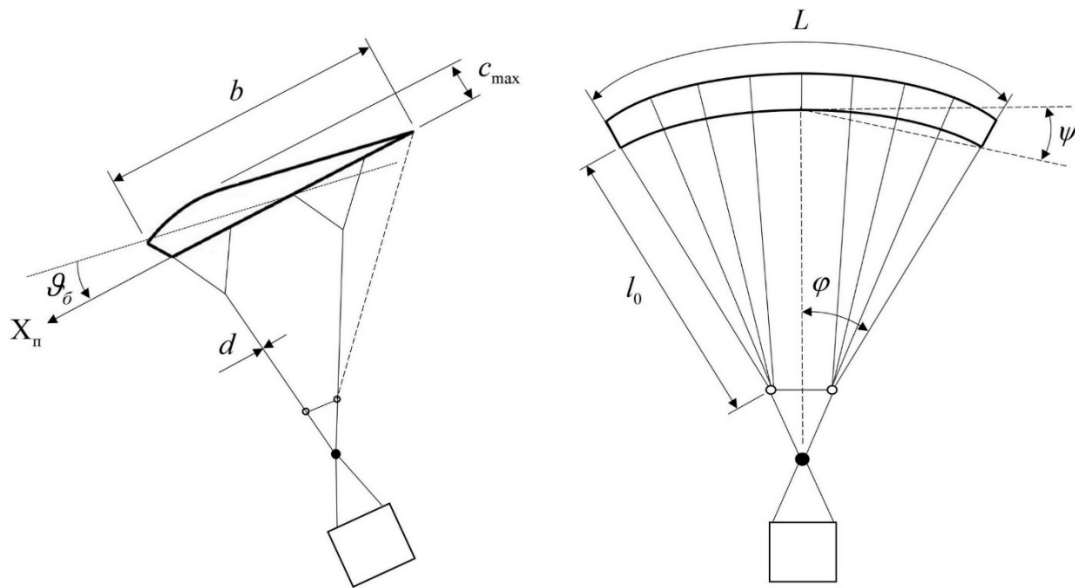


Рисунок 1 – Параметризованный облик ППГС

Формализованы требования и ограничения транспортных операций, накладываемые на конструкцию УППГС, в виде вектора конструктивных требований \mathbf{T} и вектора ограничений $c(\mathbf{x})$:

$$\mathbf{T} = [m_z, S_z, h_0, \mathcal{G}_0, V_0, n_{\max \text{ доп}}, W_{\max}, h_{np}, V_{np \text{ max}}], \quad (2)$$

где \mathbf{T} – вектор конструктивных требований; m_z – масса груза; S_z – характерная площадь груза; h_0 – максимальная высота десантирования системы; \mathcal{G}_0 – угол наклона траектории при вводе ПС в действие; V_0 – максимальная скорость десантирования; $n_{\max \text{ доп}}$ – максимально допускаемая перегрузка полезной нагрузки; W_{\max} – максимальная скорость ветра по условиям эксплуатации; h_{np} – высота площадки приземления; $V_{np \text{ max}}$ – максимально допускаемая скорость приземления полезной нагрузки.

Вектор ограничений представляет собой преобразованные неравенства, которые выражают условия прочности, ограничения массы ПС и максимальной перегрузки, условия устойчивости, пробивания ветра и приземления с заданной скоростью:

$$c(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} \sigma_{mk} - \sigma_{mk.p} \\ \sigma_{cm} - \sigma_{cm.p} \\ m_{ПС} - k_m m_c \\ n_{\max} - n_{\max \text{ доп}} \\ \sigma - \sigma_{\min} \\ \alpha_{\delta} - \alpha_{\max} \\ \alpha_{\min} - \alpha_{\delta} \\ W_{\max} - V_{zop} \\ V_{np} - V_{np \max} \end{bmatrix} \leq \mathbf{0}_{9 \times 1}, \quad (3)$$

где $c(\mathbf{x})$ – вектор ограничений; $\mathbf{0}_{9 \times 1}$ – нулевая матрица, размером 9×1 .

Сформулирована постановка задачи диссертации в вербальной и математической формах в терминах нелинейного математического программирования. Поставленная вербальная и математическая задачи исследования показали, что для успешного синтеза конструкции УППГС необходимо разработать новый подход к формированию облика ПС исходя из жёстких ограничений условий её эксплуатации и специфики транспортных операций. Математическая задача отыскания облика системы поставлена как задача многокритериальной оптимизации в смешанно целочисленной постановке.

Вторая глава посвящена разработке и описанию математической модели функционирования УППГС, адаптированной к оптимизационным расчётам.

Описаны следующие математические модели УППГС, необходимые для реализации методики определения облика УППГС:

- математическая модель конструкции и прочности ПС, описывающая связь между обликом системы, нагрузками при наполнении крыла парашюта и массой, материалами элементов, стоимостью ПС;

- математическая модель процесса наполнения крыла парашюта, определяющая через систему дифференциальных уравнений связь между заданными требованиями к УППГС, её обликом и максимальной нагрузкой, действующей на элементы системы при раскрытии купола, максимальной перегрузкой, действующей на полезную нагрузку;

- математическая модель аэродинамики УППГС, связывающая геометрические параметры системы (её конструктивный облик) с её аэродинамическими характеристиками;

- математическая модель установившегося режима полёта в продольном движении УППГС;

– математическая модель динамики полёта УППГС.

С помощью модели конструкции и прочности ПС рассчитываются напряжения в ткани крыла и стропах, по полученным расчётным напряжениям определяются материалы крыла и строп, определяется геометрия, рассчитывается масса ПС и стоимость материалов для её изготовления. Материалы крыла и строп задаются по базе материалов, заложенной в математическую модель.

Геометрия секции крыла в наполненном состоянии аппроксимируется дугами (рисунок 2) и определяется геометрическими соотношениями.

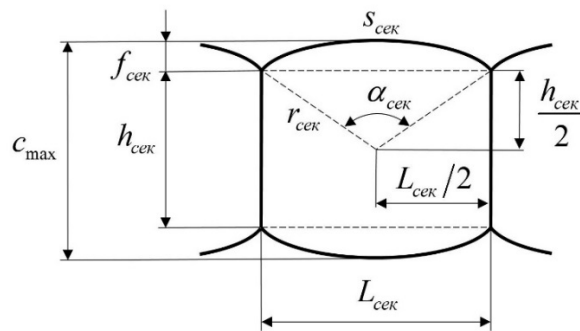


Рисунок 2 – Расчётная схема геометрии секции крыла в наполненном состоянии

Прочностной расчёт ведётся по максимальной расчётной нагрузке во время раскрытия и наполнения крыла парашюта (рисунок 3):

$$\sigma_{тк.р} = \frac{\eta f (0.5 F_{\max})}{\alpha_{тк} \alpha_{ш.у.} b}; \quad \sigma_{ст.р} = \frac{\eta f F_{\max}}{\alpha_{ш} n K_{пр}}. \quad (4)$$

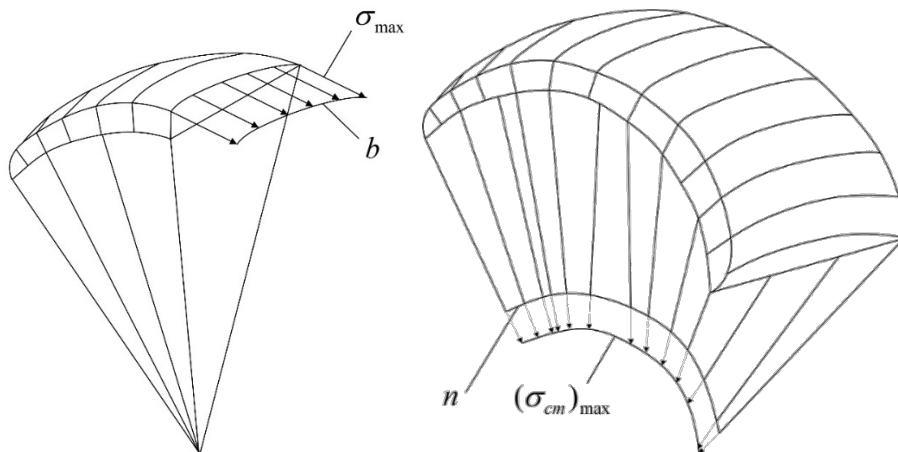


Рисунок 3 – Расчётная схема крыла и стропной системы УППГС

С использованием модели процесса наполнения крыла парашюта (рисунок 4) определяется максимальная сила и перегрузка при раскрытии и наполнении крыла, действующая на элементы ПС и полезную нагрузку.

При описании модели используется полуэмпирический метод решения системы уравнений (5)-(6):

$$m \frac{dV}{dt} = -mg \sin \vartheta - F_a - m_a \frac{dV}{dt} - V \frac{dm_a}{dt}. \quad (5)$$

$$\frac{d\vartheta}{dt} = -g \frac{\cos \vartheta}{V}. \quad (6)$$

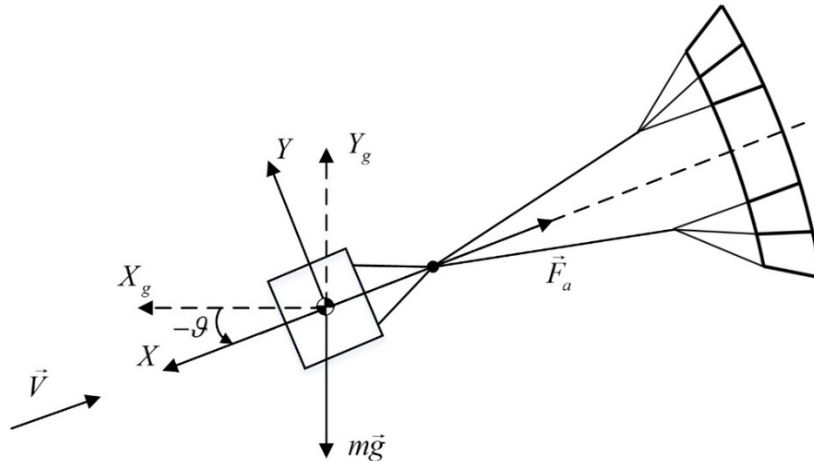


Рисунок 4 – Расчётная схема процесса наполнения крыла планирующего парашюта

Модель аэродинамики (рисунок 5), базирующаяся на теории несущих линий для эллиптического жёсткого крыла, определяет аэродинамические коэффициенты крыла, стропной системы и груза.

С помощью модели установившегося режима полёта в продольном движении УППГС вычисляются горизонтальная и вертикальная скорости установившегося полёта, балансировочный угол атаки и запас продольной статической устойчивости системы. Горизонтальная скорость полёта системы определяет способность УППГС к пробиванию ветра в установившемся полёте, т.е. устойчивость к погодным условиям.

С помощью модели динамики полёта УППГС моделируется посадочный манёвр динамического торможения – динамический «подрыв», определяется скорость приземления при динамическом торможении, а также, при необходимости, другие параметры движения системы. Модель описывается уравнениями динамики и кинематики для системы из двух тел (груза и парашюта).

Рассмотрены допущения и ограничения принятые при описании моделей. Проведена валидация математических моделей и установлено путём сравнения расчетных параметров УППГС с экспериментальными, что ошибка моделирования не превышает $\pm 6\%$.

Описанные математические модели объединены на базе монолитной архитектуры многодисциплинарной оптимизации MDF в единую модель функционирования УППГС (рисунок 6), которая позволяет рассчитать необходимые характеристики системы и

интегрируется в методику определения облика УППГС. Разработанная модель адаптирована для проведения оптимизации облика УППГС, учитывает междисциплинарные связи и эффект динамического торможения при оценке скорости приземления УППГС.

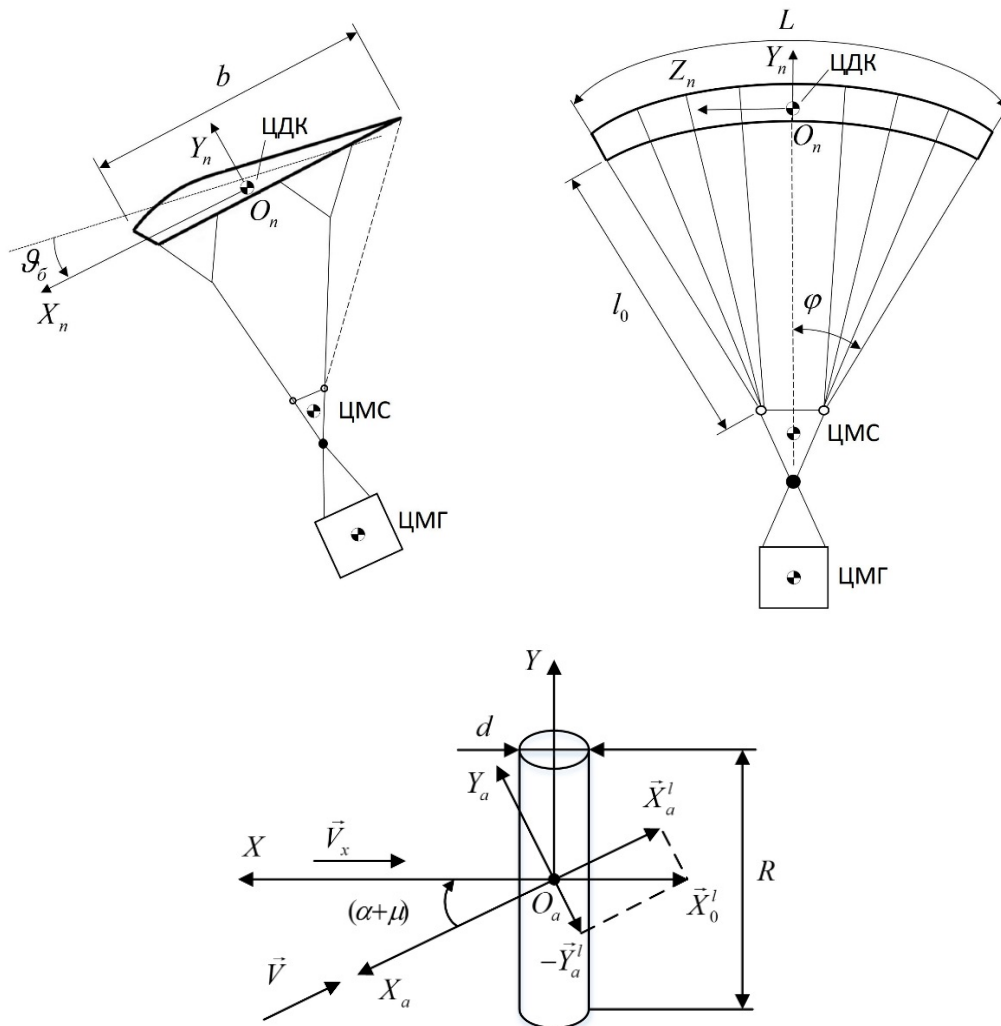


Рисунок 5 – Расчётная схема аэродинамики крыла и стропной системы

Используемые математические модели УППГС согласуются циклом многодисциплинарного анализа. Цикл представляет собой итерационный метод Гаусса-Зейделя. Структура модели функционирования УППГС обеспечивает возможность использования различных математических методов согласования используемых моделей. Модель построена модульным принципом, что позволяет изменять набор математических моделей УППГС в зависимости от поставленной задачи.

Третья глава посвящена разработке и описанию методики определения облика УППГС под параметры транспортной операции на основе многодисциплинарной архитектуры и многокритериального генетического алгоритма NSGA-II в смешанно-целочисленной постановке задачи оптимизации. Методика обрабатывает дискретные и непрерывные переменные и позволяет проводить параметрическую оптимизацию конструкции УППГС под

требования ТЗ с возможностью варьирования критериев оптимальности, а также учитывает динамику системы груз-парашют во время манёвра динамического торможения при оценке скорости приземления.

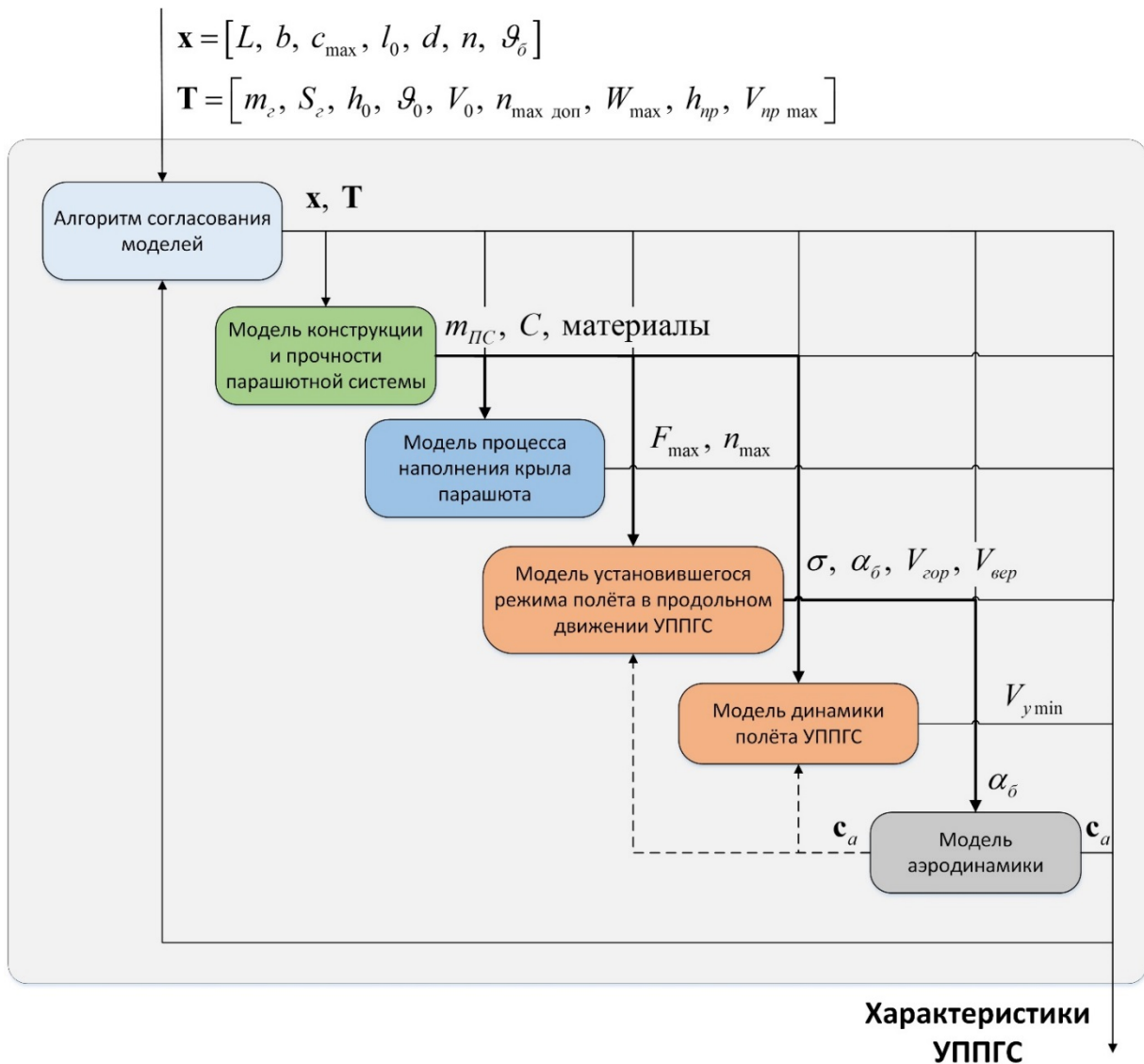


Рисунок 6 – Модель функционирования УППГС

Методику определения облика УППГС (рисунок 7) можно описать следующими шагами:

1. Задание требований к УППГС (вектор требований \mathbf{T}).
2. Задание конструктивного облика УППГС с помощью вектора конструктивных параметров \mathbf{x} .
3. Цикл многодисциплинарного анализа:
 - 3.1. Прочностной расчёт ПС, определение материалов крыла и строп парашюта. Определение массы и стоимости материалов ПС.

- 3.2. Моделирование процесса наполнения крыла парашюта для определения максимальной нагрузки и перегрузки, действующих на элементы ПС и полезную нагрузку.
- 3.3. Определение аэродинамических характеристик УППГС.
- 3.4. Моделирование движения системы груз-парашют: определение скорости приземления, скорости установившегося полёта и производных устойчивости системы.
4. Вычисление значений целевых функций и элементов вектора ограничений.
5. Минимизация значений целевых функций относительно вектора возможных решений в области допустимых решений.

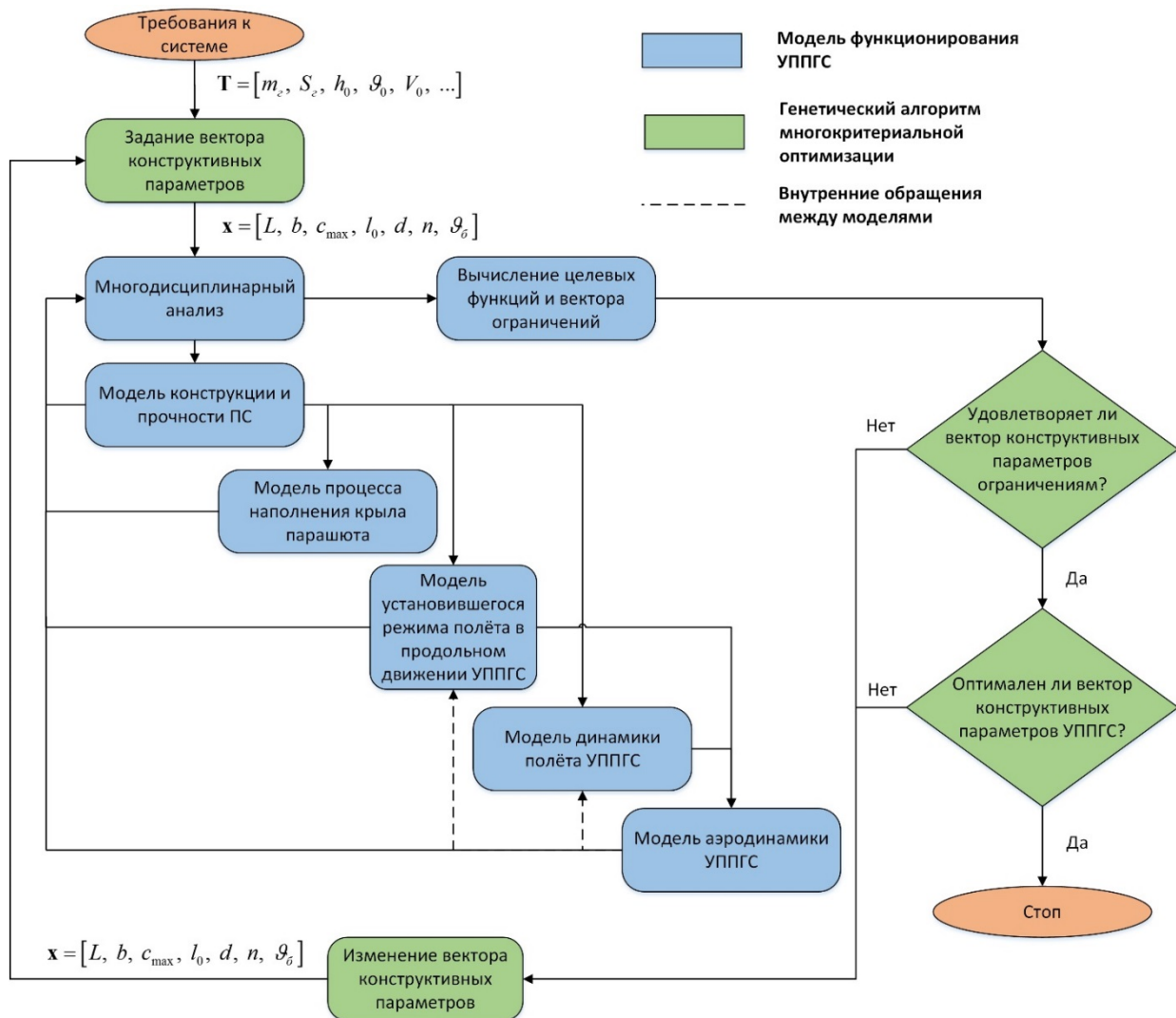


Рисунок 7 – Алгоритм методики определения облика УППГС под параметры транспортной операции

Управление геометрией конструкции УППГС в процессе определения облика осуществляется варьированием параметров, характеризующих геометрию крыла в плане, геометрию профиля крыла, арочность и геометрию фронтальной проекции линии

максимального размаха крыла, параметры центрального треугольника в режиме установившегося полёта.

Согласно принципам многодисциплинарной оптимизации задача определения оптимального облика УППГС декомпозирована на следующие дисциплины:

- конструкция и прочность УППГС;
- раскрытие и наполнение крыла парашюта;
- движение и устойчивость УППГС;
- аэродинамика УППГС.

На каждую из дисциплин накладываются ограничения общего процесса проектирования и ограничения связей дисциплин. Дисциплинарные ограничения могут быть достаточно жёсткими и значительно ограничивают допустимую область поиска решения.

Для решения задачи оптимизации конструктивного облика УППГС в смешанно целочисленной постановке разработана вычислительная схема, объединяющая архитектуру многодисциплинарной оптимизации MDF и многокритериальный генетический алгоритм NSGA-II, позволяющая получить оптимальные решения с высокой скоростью сходимости в условиях отсутствия близкого к оптимальному начального приближения (условия неопределённости).

Предложенное алгоритмическое согласование многодисциплинарных методов позволяет ускорить процесс проектирования ППГС и повысить его эффективность за счёт многомерной оптимизации проектных параметров по сравнению с традиционными подходами, где проектирование ведётся последовательно по дисциплинам, после чего следует этап их согласования.

Структурная матрица задачи определения облика УППГС, отображающая связи между различными элементами (дисциплинами) процесса проектирования и влияние параметров друг на друга, в формате архитектуры многодисциплинарной оптимизации MDF приведена на рисунке 8.

Проведён анализ и классификация критериев оптимальности УППГС, используемых при проектировании.

Сформулирована постановка задачи оптимизации конструктивного облика УППГС и формализовано пространство решений, обоснован выбор методов оптимизации.

Проведена валидация методики путём расчёта характеристик УППГС по заданным векторам конструктивных параметров x и требованиям, указанным производителями. В качестве характеристик были выбраны аэродинамическое качество и масса ПС.

Сравнительный анализ показал, что среднее отклонение характеристик, рассчитанных по методике, от характеристик, заявленных производителями, не превышает $\pm 8.3\%$.

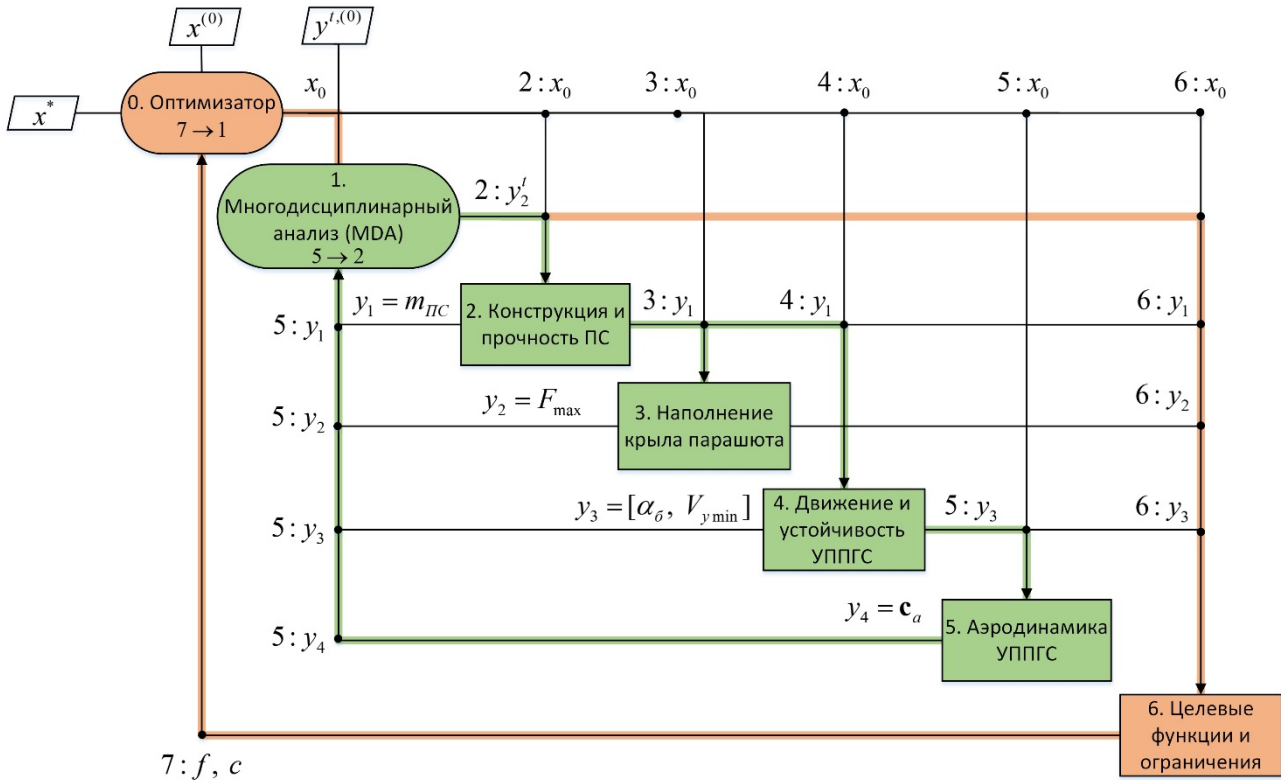


Рисунок 8 – Структурная матрица задачи определения оптимального облика УППГС

Проведен полный факторный вычислительный эксперимент по определению влияния конструктивных параметров на критерии оптимальности УППГС. Показана степень влияния размаха и хорды крыла, длины и диаметра строп, угла установки крыла на аэродинамическое качество системы, горизонтальную скорость крейсерского режима полета, вертикальную скорость приземления, массу и стоимость материалов ПС. Полученные зависимости подтверждают работоспособность методики. Рассмотрены пути повышения эффективности УППГС.

Четвёртая глава посвящена апробации и оценке эффективности методики на ряде прикладных задач по определению облика УППГС. Предложенная методика позволила определить оптимальные конструктивные параметры УППГС под различные транспортные операции по критериям горизонтальной скорости крейсерского полёта, аэродинамического качества (дальности полёта), стоимости материалов ПС и вертикальной скорости приземления при динамическом торможении. На базе полученных решений сформулированы практические рекомендации.

Рассмотрено определение облика УППГС с помощью разработанной методики для решения задач точной доставки грузов в труднодоступные районы (рисунок 9), беспосадочной

доставки грузов десантированием на участке «последней мили» (рисунок 10), десантирования отработанных аккумуляторов электрического самолёта.

Полученный в результате расчета облик УППГС для доставки грузов массой 250 кг в труднодоступные районы (рисунок 9) позволяет увеличить крейсерскую горизонтальную скорость полёта при сохранении аэродинамического качества по сравнению с существующими системами на 2.15 м/с (7.74 км/ч), что расширяет диапазон погодных условий для применения УППГС и увеличивает устойчивость системы к турбулентностям и изменениям ветра во время полёта.

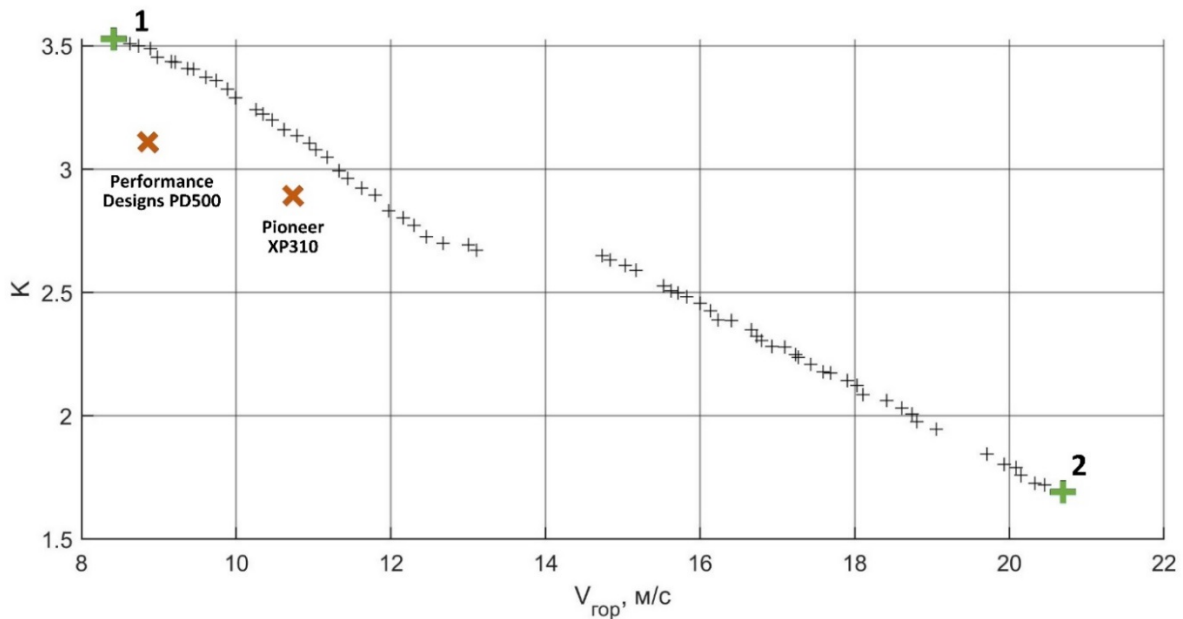


Рисунок 9 – Множество оптимальных по Парето решений задачи определения облика УППГС для точной доставки грузов в труднодоступные районы

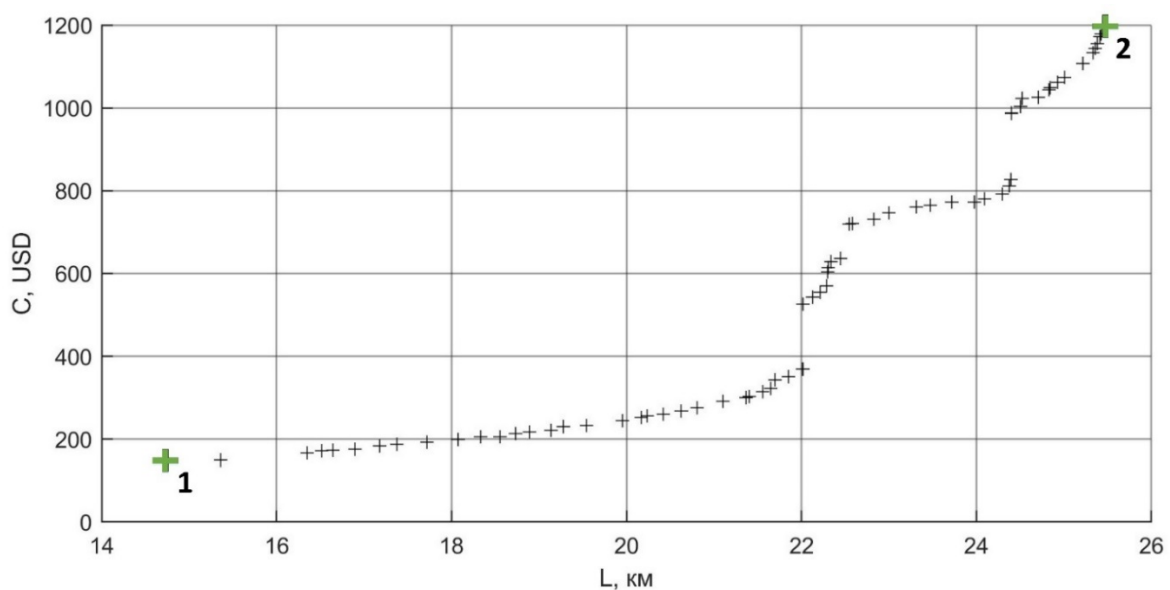


Рисунок 10 – Множество оптимальных по Парето решений задачи определения облика УППГС для беспосадочной доставки грузов

Отмечено преимущество разработанной методики перед традиционными методами определения облика УППГС общего назначения, заключающееся в получении оптимизированных под заданные параметры транспортной операции конструкций УППГС и в меньших временных затратах.

При применении разработанной методики на этапе разработки технического предложения можно сократить время этапа и соответствующие трудозатраты на создание предварительного варианта облика УППГС.

В заключении приведены основные положения диссертации, характеризующие её научное содержание как разработку методики определения облика УППГС под параметры транспортной операции, а также даны предложения по её дальнейшему использованию.

В приложение вынесены материалы о внедрении результатов работы.

Заключение

В результате исследования разработана универсальная формально-эвристическая методика определения облика УППГС с варьируемым количеством критериев оптимальности под параметры и ограничения транспортной операции, основанная на многокритериальном генетическом алгоритме и многодисциплинарной архитектуре оптимизации, которая позволяет решать широкий круг прикладных задач.

Практическая значимость подтверждается тем, что результаты работы были использованы в программе ДПО МАИ с АО «НИИ Парашютостроения» и внедрены в организациях, связанных с проблемами десантирования полезной нагрузки, ПАО «ТАНТК им. Г.М. Бериева», ПАО «Ил», общероссийской общественной спортивной организации «Объединенная федерация спорта сверхлегкой авиации России».

Также в ходе работы были получены следующие результаты, обладающие научной новизной и практической ценностью:

1. Предложена схема параметризации конструкции УППГС в виде вектора конструктивных параметров $\mathbf{x} = [L, b, c_{\max}, l_0, d, n, \vartheta_0]$. Формализованы требования к УППГС и ограничения, накладываемые условиями эксплуатации высокоточных авиационных систем доставки грузов, в виде вектора конструктивных требований $\mathbf{T} = [m_z, S_z, h_0, \vartheta_0, V_0, n_{\max \text{ доп}}, W_{\max}, h_{np}, V_{np \max}]$ и вектора ограничений $c(\mathbf{x})$.

2. Разработана математическая модель функционирования УППГС, позволяющая определить характеристики системы по заданным требованиям и ограничениям, особенностями которой являются адаптированность к оптимизационным расчётам, учёт междисциплинарных связей и эффекта динамического торможения при оценке скорости

приземления. Достоверность проверена путём валидации используемых моделей, показавшей сходимость с данными экспериментов в пределах $\pm 6\%$.

3. Достоверность разработанной методики подтверждена расчётами конструкций существующих УППГС, показавшими относительную погрешность при определении основных характеристик в пределах $\pm 8.3\%$. Проведён полный факторный вычислительный эксперимент по определению влияния конструктивных параметров на характеристики УППГС, показавший, что характер полученных зависимостей является логичным и ожидаемым, что говорит о работоспособности и адекватности разработанной методики.

4. Показана эффективность и работоспособность разработанной методики на примере решения ряда задач по определению облика УППГС для доставки грузов в труднодоступные районы, беспосадочной доставки грузов на этапе «последней мили» и десантирования аккумуляторов электрического самолёта. Полученный оптимизированный облик УППГС для доставки грузов массой 250 кг в труднодоступные районы позволяет увеличить горизонтальную скорость крейсерского режима полёта при сохранении аэродинамического качества по сравнению с существующими системами на 2.15 м/с (7.74 км/ч), что существенно расширяет диапазон погодных условий для применения УППГС и увеличивает устойчивость к турбулентностям и изменениям ветра во время полёта.

5. Показана возможность применения эволюционных алгоритмов и методов многодисциплинарной оптимизации и их работоспособность для решения задач определения облика УППГС.

Разработанная методика определения облика УППГС позволяет повысить качество и эффективность разработки УППГС, снизить временные, финансовые и материальные затраты на ранних этапах проектирования

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Для дальнейшего развития темы по созданию методов определения облика УППГС с применением эволюционных алгоритмов и многодисциплинарных архитектур оптимизации рекомендуется разработка и применение более точных параметрических математических моделей этапов функционирования системы, учёт критерия вероятности приземления груза в заданную область с применением алгоритмов оптимального управления, проведение экспериментов и лётных испытаний конструкций, полученных на основе данных разработанной методики. Указанные направления развития открывают перспективу высокоточного проектирования УППГС с учётом всех этапов её функционирования.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ, по специальности 05.07.02:

1. Арувелли С.В. Влияние угла установки крыла и длины строп на динамику планирующей парашютной грузовой системы // Общероссийский научно-технический журнал «ПОЛЕТ». 2020. №2. С. 54-64.
2. Арувелли С.В. Методика определения оптимального облика планирующей парашютной грузовой системы на ранних этапах проектирования // Вестник Московского Авиационного Института. 2020. № 1 (27). С. 76-87
3. Арувелли С.В., Долгов О.С. Способ увеличения дальности полета электрических самолётов за счёт уменьшения массы во время полёта // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2020. №3. С. 34-41.

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ, по другим специальностям:

Арувелли С.В., Долгов О.С. Требования и условия эксплуатации авиационных систем доставки грузов в труднодоступные районы // Научно-производственный и культурно-образовательный журнал «Качество и жизнь». 2017. № 3(15). С. 11-15.

Публикации в других изданиях:

1. Арувелли С.В., Долгов О.С., Пугачёв Ю.Н. Формирование облика авиационной системы доставки грузов в труднодоступные районы // 15-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2016». 14–18 ноября 2016 года. Москва. Тезисы. – Типография «Люксор». 2016. С. 15–16.
2. Арувелли С.В., Долгов О.С. Анализ условий эксплуатации и требований к авиационным системам доставки грузов в труднодоступные районы // 16-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2017». 20-24 ноября 2017 года. Москва. Тезисы. Типография «Люксор». 2017. С. 13–14.
3. Арувелли С.В. Анализ условий эксплуатации и требований к авиационным системам доставки грузов в труднодоступные районы // 9-й Всероссийский межотраслевой молодёжный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики». Аннотации конкурсных работ. МАИ. 2017. С. 48.
4. Арувелли С.В. Анализ ограничений при эксплуатации авиационных систем доставки грузов в труднодоступных районах // Гагаринские чтения – 2018: XLIV Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов: М., МАИ. 2018. С. 32–33.

5. Арувелли С.В. Математическое моделирование авиационной системы доставки грузов на основе планирующей парашютной системы // XLV Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения – 2019». Сборник тезисов докладов – М.: МАИ. 2019. С. 36.
6. Арувелли С.В., Киселёв И.А., Непомнящий Г.К. Математическое моделирование управляемой грузовой парашютной системы типа «крыло» для доставки грузов в заданную точку // Материалы 54-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. Часть 2. Калуга: ИП Стрельцов И.А. (Изд-во «Эйдос»). 2019. С. 94–96.
7. Арувелли С.В. Методика определения оптимального облика планирующей парашютной грузовой системы на ранних этапах проектирования // 18-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2019». 18-22 ноября 2019 года. Москва. Тезисы. – Типография «Логотип». 2019. С. 11-12.
8. Арувелли С.В. Определение облика планирующей парашютной системы как средства управления дальностью // XLVI Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения – 2020». Сборник тезисов докладов – М.: МАИ. 2020. С. 47–48.
9. Арувелли С.В. Методика определения облика планирующей парашютной грузовой системы с учетом параметров транспортной операции // Материалы 55-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. Часть 1. Калуга: ИП Стрельцов И.А. (Изд-во «Эйдос»). 2020. С. 268–271.