

На правах рукописи

БОЛДЫРЕВА
АННА АЛЕКСАНДРОВНА

РАЗРАБОТКА НОВЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ И
МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ВОЗДУШНО-ГАЗОВОЙ
СИСТЕМЫ ДИРИЖАБЛЕЙ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Специальность 05.07.02 – Проектирование, конструкция и
производство летательных аппаратов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 2016

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

Научный руководитель: доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник ОСКБЭС, Кирилин Александр Николаевич

Официальные оппоненты:

Панатов Геннадий Сергеевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Летательные аппараты» Института радиотехнических систем и управления Инженерно-технологической академии Южного Федерального университета.

Ивченко Борис Александрович – кандидат технических наук, главный конструктор, ЗАО «Воздухоплавательный центр «Авгурь».

Ведущая организация: АО «Долгопрудненское конструкторское бюро автоматики», Московская обл., Долгопрудный г., ул. Летная, 1.

Защита диссертации состоится _____ 2016 г. в _____ часов на заседании диссертационного Совета Д 212.125.10 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, 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: <http://mai.ru/events/defence/>.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.10,
кандидат технических наук,
доцент

Денискина
Антонина Робертовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В последние годы ученые ряда стран приходят к мнению, что применение дирижаблей может произвести революцию в технологии транспортных перевозок. Транспортные дирижабли нового поколения по сравнению с летательными аппаратами (ЛА) тяжелее воздуха будут иметь малую материалоемкость, высокую весовую отдачу и топливную эффективность, низкую себестоимость транспортных операций. Им будет присущ более высокий уровень безопасности и экологичности. Одним из наиважнейших преимуществ дирижаблей перед другими видами транспорта является отсутствие для них ограничений по маршрутам передвижения. Они способны вертикально взлетать и садиться, летать на большие расстояния, доставлять грузы, в том числе крупногабаритные, «от двери до двери», требуя за это минимальных затрат на инфраструктуру.

Перспективным классом воздухоплавательной техники являются средневисотные ($H=3-8$ км) и стратосферные ($H=12-20$ км) аэростатические платформы. Это аппараты двойного назначения. Их потенциальные области применения обширны: мониторинг земной поверхности, воздушного и водного пространств; телевизионная и сотовая связь, широкополосный интернет, инструментальная разведка. Стоимость высотных дирижаблей будет во много раз ниже стоимости существующих космических технологий. В отличие от спутников связи, аэростатические платформы могут периодически возвращаться на Землю для технического обслуживания, ремонта и замены целевой нагрузки.

В настоящее время в мире разработкой воздухоплавательных летательных аппаратов (ВПЛА) занимаются более 50 фирм. Они базируются преимущественно в Китае (21 воздухоплавательный институт), США (Lockheed Martin, Goodyear, Worldwide AEROS corp., Northrop Grumman, ABC), Германии (WDL, Zeppelin GmbH), Англии (Advanced Technology Group). В России на протяжении длительного времени проектированием ВПЛА занимаются Воздухоплавательный центр «Авгурь-РосАэроСистемы», ДКБ-А и ЗАО «Аэростатика». Научные исследования ведутся в таких крупных научных центрах как ЦАГИ, ГосНИИАС, МАИ, ТТИ ЮФУ.

Среди типов ВПЛА, разрабатываемых и применяемых сегодня, лидирующие позиции занимают:

- Классические многоцелевые и транспортные пилотируемые дирижабли;
- средневисотные пилотируемые / беспилотные дирижабли;
- беспилотные стратосферные аэростатические платформы;
- гибридные летательные аппараты;

- привязные аэростатные комплексы (ПАК).

По типу конструкции дирижабли подразделяются на мягкие, полужесткие и жесткие. Реализация крупногабаритных ЛА большой грузоподъемности возможна только при использовании многосекционной жесткой схемы дирижабля. Технологичность, ремонтпригодность и надежность такого типа конструкции не идет ни в какое сравнение с дирижаблями, выполненными по мягкой и полужесткой схемам. Поэтому в работе рассматриваются именно аппараты жесткой схемы.

В эксплуатации дирижабль представляет собой «живой организм», в котором происходят сложные физические процессы, контролируемые воздушно – газовой системой (ВГС). ВГС является главной системой дирижабля, обеспечивающей не только создание аэростатической подъемной силы ЛА, но и функционирование многочисленных ее подсистем, таких как подсистема управления сверхдавлением в корпусе ЛА, подсистема управления массово-инерционными характеристиками дирижабля, балластная, противообледенительная и др., от эффективности и надежной работы которых во многом зависит летно-технические характеристики и безопасность летательного аппарата в целом. Поэтому разработка и оценка эффективности новых технических решений и методов проектирования ВГС дирижаблей нового поколения является актуальной задачей.

Степень разработанности проблемы. Существующая на сегодня методологическая база проектирования ВГС является слабо разработанной и основанной на упрощенных зависимостях физических параметров атмосферы от высоты полета. Работы отечественных (С. А. Лосик, Ю. С. Бойко, С. В. Федоров, М. Я. Арие, А. М. Вахминцев) и зарубежных авторов (R. K. Smith, G. Khoury, H. Kollman, E. Mowforth) в области проектирования ВГС дирижаблей преимущественно посвящены разработке газовых клапанов. При этом расчет расхода газа через клапаны ведется по упрощенным зависимостям, не учитывающим неоднородность изменения давления и температуры газов с подъемом на высоту, что особенно важно для высотных и стратосферных дирижаблей. Полностью отсутствуют табличные и графические зависимости геометрических параметров элементов ВГС от размерности и скороподъемности ВПЛА, уровня избыточного давления в корпусе ЛА, типа рабочего газа (гелий, флегматизированный водород, воздух).

Обязательным условием эксплуатации дирижаблей нового поколения должно стать наличие у них противообледенительной системы (ПОС) корпуса дирижабля, обеспечивающей круглогодичную стоянку дирижабля под открытым небом. Стоянка на причальной мачте при сильном снегопаде и обледенении, особенно характерном для российских

широт, вследствие наличия больших поверхностей и хрупкости конструкции, может привести к разрушению дирижабля. Во 2-ой половине прошлого века фирмой TCOM, специализирующейся на разработке привязных аэростатов, совместно с геофизической лабораторией ВВС США предпринималась попытка разрешения данной проблемы посредством различных механических и физико-химических способов (вибратор низкой частоты, пульсация давления в оболочке аэростата, скрепер, скоростной вентилятор, полимерные и полиуретановые покрытия, подогретая смесь этиленгликоля и воды, электрообогреватели). Однако все использовавшиеся способы по удалению снега и льда с поверхности аэростатов оказались трудоемкими и малоэффективными. Вместе с тем известно, что в авиации широко и успешно применяются воздушно-тепловые ПОС. Применение воздушно-теплового способа борьбы со снегом и льдом, являющегося элементом функционирования современной ВГС, должно стать генеральным направлением в разработке ПОС дирижаблей нового поколения.

Еще одной важной проблемой эксплуатации дирижаблей является необходимость их балластирования. В качестве балласта используют газообразные (воздух), жидкие и твердые вещества. В последние годы появились проекты транспортных гибридных дирижаблей жесткого типа – DRAGON'S DREAM – ML866 фирмы Aeros (США), АТЛАНТ-30, АТЛАНТ-100 фирмы Август - РосАэроСистемы (Россия), в которых ВГС является основной и единственной системой балластирования ЛА. Для обеспечения таких функциональных возможностей ВГС разработчики проектов предлагают закачивать воздух в балластные емкости под большим давлением. Идея очень заманчивая. Но насколько она прагматична с точки зрения массовой эффективности ВГС? Необходимы специальные исследования.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности функционирования воздушно-газовой системы многоцелевых, транспортных и высотных дирижаблей жесткого типа нового поколения.

Для достижения поставленной цели в работе были решены следующие **задачи**:

- разработка методики проектирования геометрических параметров основных элементов ВГС многоцелевых, транспортных и высотных (в том числе стратосферных) дирижаблей;
- разработка методики оценки энергетических затрат, необходимых для эффективной работы ПОС дирижабля жесткого типа нового поколения;
- разработка схемных решений воздушно-тепловой ПОС корпуса дирижабля жесткого типа нового поколения;

- оценка возможности использования ВГС дирижабля в качестве воздушно-балластной системы высокого давления;
- разработка практических рекомендаций по заданию геометрических и физических параметров основных элементов ВГС дирижаблей в зависимости от объема, высоты полета, скороподъемности и типа газа.

Предметом диссертационного исследования является процесс проектирования ВГС многоцелевых, транспортных и высотных (в том числе стратосферных) дирижаблей жесткого типа и его важнейшие категории: объект, задачи и методы проектирования.

В качестве объектов исследования рассматриваются многоцелевые, транспортные и высотные (в том числе стратосферные) дирижабли жесткого типа в широком диапазоне размерностей.

Методика исследования. Разработка новых технических решений и методов проектирования ВГС дирижаблей нового поколения базируется на принципах:

- технического анализа и классификации аэростатических ЛА по типу их ВГС;
 - анализа и синтеза сложных технических систем;
 - вычислительной термо- и газодинамики для аналитического и численного теплового расчета ПОС корпуса дирижабля с использованием программного комплекса FlowVision 2.5;
- и основных законах аэростатики: законе Архимеда, законе Бойля-Мариотта, законе Гей-Люссака и физических свойствах газов.

Достоверность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается результатами численных экспериментов и имитационного моделирования, а также согласуется с данными экспериментов и результатами исследований других авторов, представленных в печатных изданиях.

Наиболее существенные новые научные результаты, полученные автором и выдвигаемые для защиты:

- усовершенствованная методика проектирования геометрических параметров основных элементов ВГС дирижабля, отличающаяся от известных учетом неоднородности изменения параметров внешней среды, учетом выбора протекающего термодинамического процесса в элементах ВГС дирижабля и расширением граничных условий до высоты функционирования стратосферных дирижаблей;
- впервые предлагаемая методика оценки энергетических затрат, необходимых для эффективной работы ПОС дирижабля жесткого типа нового поколения, разработанная на основе применения воздушно-теплового способа борьбы со снегом;

- схемные решения воздушно – тепловой ПОС корпуса дирижабля жесткого типа нового поколения.

Практическая ценность диссертационной работы заключается в следующих аспектах:

- алгоритм, соответствующий предлагаемой методике проектирования геометрических параметров основных элементов ВГС и реализованный в модернизированном программном комплексе формирования облика дирижабля нового поколения, который имеет Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015613625 от 19.03.2015 и внедрен в проектно-конструкторскую деятельность Научно-производственной фирмы «Аэростатика»;

- предложены новые схемные решения воздушно-тепловой ПОС корпуса дирижабля и проведена оценка их энергетической эффективности, позволившая выявить предпочтительное схемное решение;

- проведена оценка возможности использования ВГС в качестве воздушно-балластной системы высокого давления;

- даны практические рекомендации по заданию геометрических параметров основных элементов ВГС дирижаблей в широком диапазоне их размерностей.

Выявленные закономерности между проектными параметрами и характеристиками ВГС дирижаблей могут быть использованы авиационными специалистами при разработке перспективных образцов ВПЛА.

Апробация работы. Основные результаты работы были доложены на ряде всероссийских и международных научно-технических и научно-практических конференций, форуме и семинаре: 7-ая, 8-ая Всероссийские научно - практические конференции «Перспективные системы и задачи управления». п. Домбай, Карачаево- Черкесская республика, 2012-2013гг.; III Международный научный семинар «Системный анализ, управление и обработка информации». п. Дивноморское, Краснодарский край, Россия, 27 сентября - 2 октября 2012 г.; X Международный научно-технический форум «Инновация, экология и ресурсосберегающие технологии». Ростов-на-Дону, Россия, 9-11 октября, 2012 г.; Ежегодная конференция Профессорско-преподавательского состава Донского государственного технического университета, г. Ростов-на-Дону, 13-17 мая, 2013 г.; «SAE 2013 AeroTech» конференция и выставка. Монреаль, Квебек, Канада, 24-26 сентября 2013 г.; «Реализация прикладных научных исследований и экспериментальных разработок по приоритетному направлению Транспортные и космические системы в 2014 году в рамках федеральной целевой программы "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на

2014 – 2020 годы», Московский государственный машиностроительный институт (МАМИ), г. Москва, 01 декабря, 2014 г.; 10-ая международный съезд и выставка Международной ассоциации дирижаблистов. Фридрихсхафен, Германия, 16-18 апреля, 2015 г.

Внедрение результатов работы. Разработанные автором теоретические и практические результаты использовались при:

- разработке эскизно-технического проекта «Комплекс дистанционно-пилотируемого дирижабля для ретранслятора связи», выполненного по заказу МО РФ, 2012 г.;

- разработке проекта «Формирование облика целевой нагрузки дирижабля, предназначенного для ведения аварийно-спасательных работ при ликвидации чрезвычайных ситуаций», выполненного по заказу МЧС РФ, 2012 г.;

- разработке материалов в эскизный проект системы 201С6 в части высотных и стратосферного дирижаблей для обеспечения функционирования РЛС и специальных оптико-электронных комплексов, выполненного по заказу МО РФ, 2014 г.;

- выполнении НИР «МААТ – Многоуровневая транспортная система на базе стратосферных дирижаблей» (грант Евросоюза №285602), 2011-2015 гг.;

- выполнении прикладных научных исследований «Исследования и разработка критических технологий, необходимых для создания дирижаблей нового поколения с высокой энергетической, экологической и экономической эффективностью» по соглашению о предоставлении субсидии Министерством образования и науки РФ в целях реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы». Уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEF157614X0058, 2014 г.

Публикации. Полученные в диссертации научные результаты представлены в 11 научных работах, в том числе 2 из них в перечне журналов, рекомендованных ВАК, и 2 – в издании, индексируемом в базе данных Scopus. Различные аспекты материалов, вошедших в диссертацию, отражены в 5 научно-технических отчетах. Также в рамках проведения исследований по диссертации получено 1 авторское свидетельство.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложений. Объем работы составляет 120 страниц, включая 49 рисунков и 15 таблиц. Список литературы содержит 125 наименований.

Краткое содержание диссертации

Во введении дается обоснование актуальности темы диссертации, приведены перспективы развития дирижаблей в различных областях человеческой деятельности, технические проблемы, которые необходимо преодолеть для создания ВГС жестких дирижаблей нового поколения, определены цели и задачи исследования.

В первой главе диссертации приведено аналитическое исследование проблем и способов реализации ВГС различных типов дирижаблей. Анализ существующих или применяемых ранее типов ВГС ЛА легкого воздуха позволил классифицировать их по различным идентификационным признакам (рисунок 1):

1. Открытые и закрытые системы. К ЛА с открытой системой можно отнести такие ЛА, ВГС которых непосредственно взаимодействует с атмосферой (тепловые аэростаты, дирижабли «Цепелинновского типа»), а к закрытым – ЛА, имеющие избыточное давление внутри корпуса (мягкие, полужесткие, жесткие и т.д.);

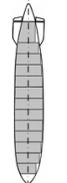
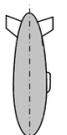
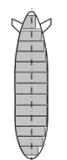
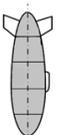
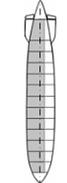
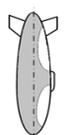
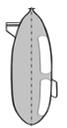
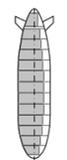
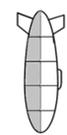
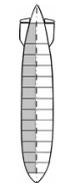
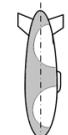
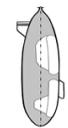
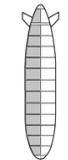
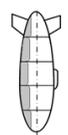
2. Баллонетные (БС) и безбаллонетные системы (ББС). К последним можно отнести тепловые аэростаты, дирижабли «Цепелиновского типа», жесткие дирижабли, крейсера и фидеры системы МААТ (Multibody Advanced Airship for Transport);

3. По типу используемого подъемного газа: гелий, флегматизированный водород или теплый воздух.

Выбор типа ВГС зависит от типа летательного аппарата, его конструктивных и функциональных возможностей.

Жесткие дирижабли нового поколения должны быть многосекционными безбаллонетными и в отличие от дирижаблей первого поколения – закрытого типа с малым избыточным давлением внутри корпуса. На рисунке 2 приведен один из возможных вариантов схемного решения ВГС системы (за исключением теплозащиты корпуса) современного дирижабля жесткого типа.

ВГС дирижаблей нового поколения должна обладать многогранными функциональными возможностями, общий перечень которых представлен на рисунке 3.

Тип системы	ОТКРЫТЫЕ СИСТЕМЫ		ЗАКРЫТЫЕ СИСТЕМЫ					
	Тепловой аэростат (ББС)	Диржабл «Цепелиновского типа» (ББС)	Аэростаты	Низко- и средневысотные дирижабли		Стратосферные дирижабли		
ВЫСОТА ПОЛЕТА ЛА	H_3							
	H_2							
	H_1							
				<i>Мягкие, блинты (БС)</i>	<i>Полужесткие (БС)</i>	<i>Жесткие (ББС)</i>	<i>Классической формы (ББС)</i>	<i>Крейсеры и фидеры системы МААТ (ББС)</i>

□ – подъемный газ, □ – воздух; H_1 , H_2 и H_3 - три различные высоты подъема ЛА, при этом H_3 – высота выполнения;
 БС – баллонетные системы, ББС – безбаллонетные системы; T_1 , T_2 , T_3 – температура теплого воздуха на высотах H_1 , H_2 и H_3

Рисунок 1 – Классификация аэростатических ЛА по типу их ВГС

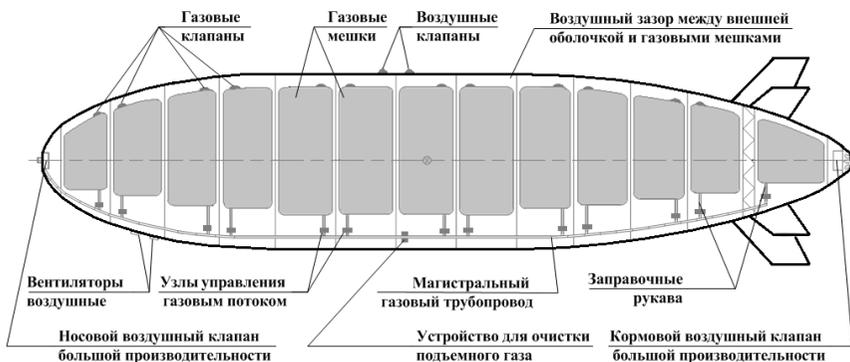


Рисунок 2 – Схема воздушно – газовой системы дирижабля жесткого типа нового поколения

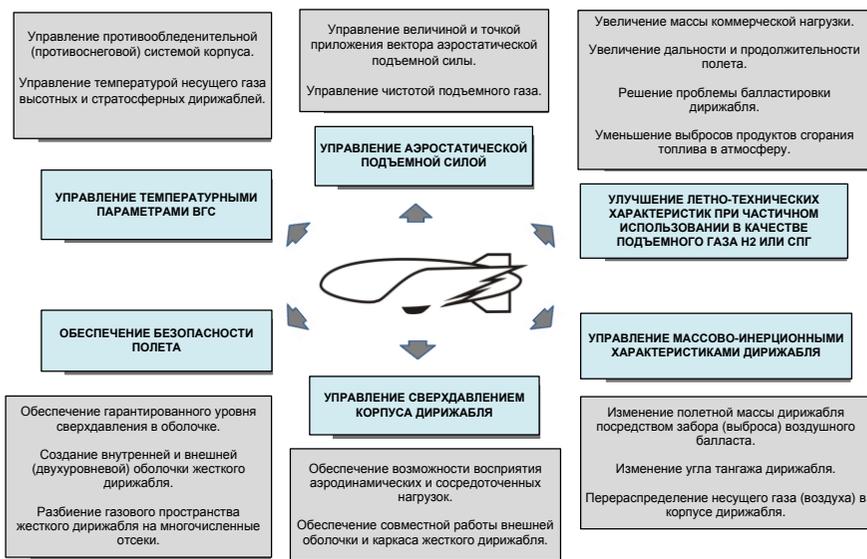


Рисунок 3 – Функциональные возможности воздушно-газовой системы дирижабля нового поколения

Вторая глава посвящена разработке методики проектирования и численным исследованиям параметров воздушно-газовой системы дирижабля нового поколения.

Существующая на сегодня методологическая и технологическая базы проектирования основных элементов ВГС являются слабо разработанными. В существующих методиках расход газа через клапаны рассчитывается по однородной атмосфере:

$$Q = \frac{U_z \cdot V_y}{8000}, \quad (1)$$

где Q – расход газа; U_z – газовый объем ЛА; V_y – вертикальная скорость; 8000 – высота однородной атмосферы.

Определение расхода газа по формуле (1) ведет к увеличению потребной суммарной площади входных (выходных) сечений основных элементов ВГС и, следовательно, к увеличению массы самой ВГС дирижабля.

В диссертационной работе была разработана *усовершенствованная методика проектирования геометрических параметров основных элементов ВГС дирижабля*, отличающаяся от известных учетом неоднородности изменения параметров внешней среды, учетом выбора протекающего термодинамического процесса в элементах ВГС дирижабля и расширением граничных условий до высоты функционирования стратосферных дирижаблей.

Критерием оценки эффективности данной методики являлось повышение точности расчетов и минимизация геометрических параметров основных элементов ВГС дирижабля.

Требования, которым должны удовлетворять численные значения геометрических параметров основных элементов ВГС:

- критерии летной годности для транспортных дирижаблей («Transport airship requirements», 2000, Германия);
- требования стандартной атмосферы ГОСТ 4401-81.

Основные ограничения, накладываемые на параметры ВГС дирижабля и его характеристики:

- скороподъемность ЛА $V_y \geq 15$ м/с;
- высота функционирования дирижабля $H \in [0..20]$ км;
- скорость ветра $V_\theta \leq 30$ м/с.

Основные выходные параметры усовершенствованной методики проектирования геометрических параметров основных элементов ВГС:

- потребная суммарная площадь входных (выходных) сечений газовых S_g , воздушных клапанов S_θ , воздушных вентиляторов $S_{\theta\theta}$;
- размер «живого» сечения клапанов $S_{кл}$.

В соответствие с предложенной методикой проектирования потребная суммарная площадь входных (выходных) сечений газовых и воздушных клапанов, воздушных вентиляторов будет равна:

$$\text{при подъеме } S = \frac{\lambda_1 \cdot U_{H_1} \cdot \left(\frac{P_{H_1}}{P_{H_1} - V_y \cdot \Delta t \cdot dp / dH} - 1 \right)}{\mu \cdot \sqrt{2 \Delta p_{ВГС} / \rho_{H_2}} \cdot k}, \quad (2)$$

$$\text{при спуске } S = \frac{\lambda_2 \cdot U_{H_1} \cdot \left(1 - \frac{P_{H_1}}{P_{H_1} + V_y \cdot \Delta t \cdot dp / dH} \right)}{\mu \cdot \sqrt{2 \Delta p_{ВГС} / \rho_{H_2}} \cdot k}, \quad (3)$$

где U_{H_1} – объем газа в газовых отсеках на высотах H_1 ; P_{H_1} – давление воздуха на высотах H_1 ; Δt – временной промежуток, сек.; λ_1, λ_2 – поправочные коэффициенты, учитывающие незначительное изменение температуры воздуха по высоте, ρ_{H_2} – плотность газа на высоте H_2 ;

$\Delta p_{ВГС}$ – избыточное давление в элементах ВГС; dp/dH – неоднородность изменения давления с подъемом/спуском дирижабля; k – показатель адиабаты для основных газов ВГС дирижабля (гелий, флегматизированный водород, воздух), μ – безразмерный коэффициент расхода, зависящий от характера отверстия, обычно равен 0,4 – 0,7.

Алгоритм, соответствующий предлагаемой методике проектирования геометрических параметров основных элементов ВГС, реализован в модернизированном программном комплексе формирования облика дирижабля нового поколения, который имеет Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015613625 от 19.03.2015 и внедрен в проектно-конструкторскую деятельность Научно-производственной фирмы «Аэростатика». На рисунке 4 пунктирной линией отмечена расширенная область функциональных возможностей блока аэростатики в модернизированном программном комплексе.

С помощью данного программного комплекса были проведены *многопараметрические исследования по зависимости основных элементов ВГС дирижабля* от его объема, высоты полета, скороподъемности, заданного уровня избыточного давления в ВГС, типа газа (воздух, гелий, флегматизированный водород) при подъеме и спуске дирижабля. Основные результаты исследований представлены в таблицах 1–3 и на рисунке 5.

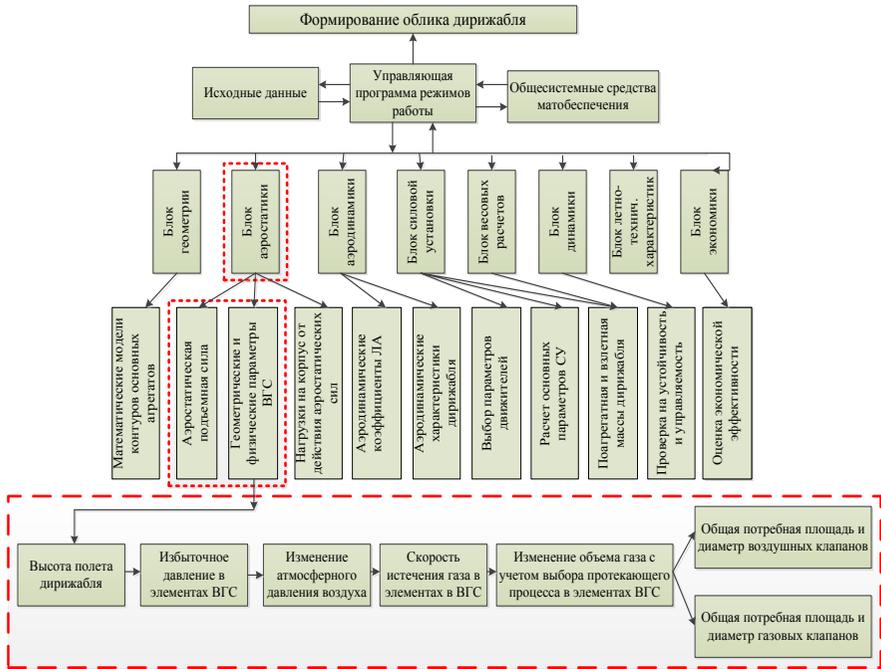


Рисунок 4 - Структурно-функциональная схема программного комплекса формирования облика дирижабля

Таблица 1 - Расчетные значения общей потребной площади воздушных нагнетателей при спуске дирижабля, m^2 ($V_y = 10m/c$)

Высота полета, км	Др, мм вод. ст.	Объем дирижабля, тыс. m^3					
		10	26	60	100	350	1000
0	100	0,30	0,78	1,79	2,99	10,47	29,92
	150	0,24	0,64	1,47	2,44	8,55	24,43
3	$100 \cdot \bar{\rho}$	0,36	0,93	2,14	3,57	12,49	35,68
	$150 \cdot \bar{\rho}$	0,29	0,76	1,75	2,91	10,2	29,13
7	$100 \cdot \bar{\rho}$	0,38	0,99	2,29	3,82	13,38	38,2
	$150 \cdot \bar{\rho}$	0,31	0,81	1,87	3,12	10,92	31,2
12	$100 \cdot \bar{\rho}$	0,51	1,33	3,06	5,1	17,86	51,02
	$150 \cdot \bar{\rho}$	0,42	1,08	2,5	4,17	14,58	41,67
15	$100 \cdot \bar{\rho}$	0,51	1,33	3,06	5,1	17,86	51,02
	$150 \cdot \bar{\rho}$	0,42	1,08	2,5	4,17	14,58	41,67
20	$100 \cdot \bar{\rho}$	0,51	1,33	3,06	5,1	17,86	51,02
	$150 \cdot \bar{\rho}$	0,42	1,08	2,5	4,17	14,58	41,67

Таблица 2 - Расчетные значения общей потребной площади газовых (гелий) клапанов при подъеме дирижабля, м² ($\Delta p = 20$ мм вод. ст.)

Высота полета, км	V_y , м/с	Объем дирижабля, тыс. м ³					
		10	26	60	100	350	1000
0	10	0,21	0,54	1,26	2,10	7,33	20,95
	12,5	0,26	0,68	1,57	2,62	9,17	26,20
	15	0,31	0,82	1,89	3,14	11,01	31,45
3	10	0,19	0,50	1,14	1,90	6,66	19,04
	12,5	0,24	0,62	1,43	2,38	8,33	23,80
	15	0,29	0,74	1,71	2,86	10,00	28,57
7	10	0,17	0,44	1,01	1,69	5,90	16,86
	12,5	0,21	0,55	1,26	2,11	7,38	21,08
	15	0,25	0,66	1,52	2,53	8,86	25,30
12	10	0,13	0,34	0,79	1,31	4,60	13,14
	12,5	0,16	0,43	0,99	1,64	5,75	16,43
	15	0,20	0,51	1,18	1,97	6,90	19,72
15	10	0,10	0,27	0,62	1,04	3,63	10,38
	12,5	0,13	0,34	0,78	1,30	4,54	12,97
	15	0,16	0,41	0,93	1,56	5,45	15,58
20	10	0,07	0,18	0,42	0,70	2,44	6,98
	12,5	0,09	0,23	0,52	0,87	3,06	8,73
	15	0,10	0,27	0,63	1,05	3,67	10,48

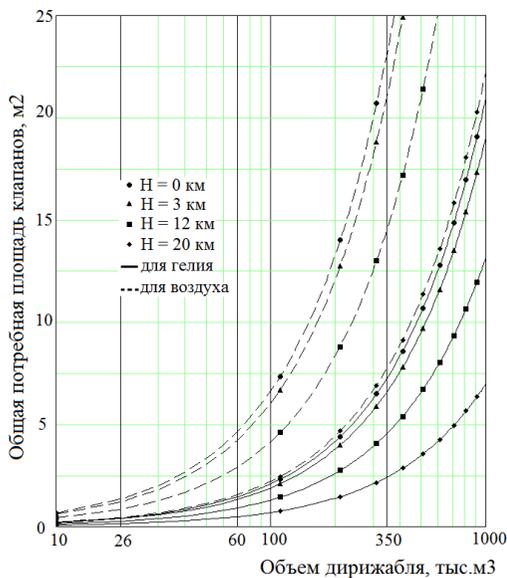


Рисунок 5 - Зависимости общей потребной площади воздушных и газовых (гелий) клапанов ВГС от объема и высоты полета дирижабля ($V_y = 10$ м/с, $\Delta p = 20$ мм вод. ст.)

Даны практические рекомендации по выбору геометрических параметров основных элементов ВГС дирижаблей:

- потребные значения площади газовых и воздушных клапанов ВГС находятся в прямо пропорциональной зависимости от объема дирижабля и его скороподъемности, причем потребная площадь воздушных клапанов более чем в 3 раза должна превышать общую площадь сечения гелиевых клапанов (при одном и том же заданном избыточном давлении Δp). Если несущим газом ЛА является флегматизированный водород, то площадь проходных сечений газовых клапанов может быть на 20% меньше, по сравнению со случаем, когда ВГС ЛА заправляется гелием;

- для воздушных и газовых клапанов расчетным случаем является высота на уровне моря. Для воздушных нагнетателей, наоборот, - максимальная высота полёта, так как создаваемое воздушными вентиляторами давление будет прямо пропорционально $\bar{\rho}$, равному отношению плотности воздуха на расчетной высоте к плотности воздуха на высоте на уровне моря;

- увеличение задаваемого избыточного давления Δp в ВГС уменьшает площадь газовых клапанов. Но, несмотря на такую зависимость, разработчики воздухоплавательной техники должны минимизировать этот показатель, так как от него существенно зависит масса газовых отсеков и внешней оболочки корпуса дирижабля.

Сравнительная оценка геометрических параметров основных элементов ВГС, рассчитанных по ранее используемой (S_1) и усовершенствованной методикам (S_2), показала, что предложенная в диссертационной работе методика позволяет минимизировать геометрические параметры основных элементов ВГС дирижаблей в диапазоне от 34% до 59% в зависимости от типа несущего газа (табл. 3).

Таблица 3 – Повышение точности расчета геометрических параметров основных элементов ВГС посредством усовершенствованной методики

Точность расчета	Основные элементы ВГС	Воздушные клапаны	Воздушные вентиляторы	Газовые клапаны	
				гелий	водород
$(S_1/S_2 - 1) * 100\%$		34,9%	34,4%	59,1%	37,5%

Третья глава диссертации посвящена разработке и оценке эффективности воздушно-тепловой ПОС дирижабля жесткого типа нового поколения.

Для оценки энергетических затрат, необходимых для эффективной работы ПОС дирижабля жесткого типа нового поколения, в диссертационной работе впервые была предложена методика, разработанная на основе применения воздушно-тепловых способы борьбы со снегом и состоящая из следующих этапов:

1. Расчет теплового потока, уносимого ветром с внешней поверхности корпуса дирижабля, в осесимметричной постановке при заданных температуре поверхности и скорости окружающего воздуха;

1.1. Оценка теплового потока, направленного на плавление снега;

1.2. Определение минимальной и максимальной тепловых мощностей с учетом выпадения снега на минимальную площадь (мидель) и максимальную площадь (в плане) дирижабля;

2. Выбор схемных вариантов ПОС;

3. Расчет движения снежинок вокруг дирижабля численным расчетом по лагранжевой модели частиц для уточнения площади зоны покрытия снегом;

4. Расчет теплового потока, уносимого ветром с внешней поверхности корпуса дирижабля, и распределения температуры по поверхности дирижабля для выбранных вариантов ПОС (с использованием программного комплекса FlowVision 2.5) в трехмерной постановке с учетом конструктивных особенностей системы нагрева и внутреннего объема дирижабля. В качестве расчетной области используется одна секция корпуса дирижабля, соответствующая размерам реальной секции в средней части корпуса. Расчетная область состоит из трех подобластей: корпуса дирижабля, подобласти газового мешка с гелием (воздухом) и внешней подобласти, моделирующей окружающую атмосферу (рисунок 6);

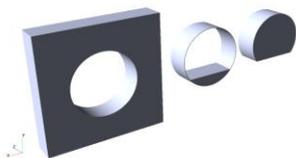


Рисунок 6 - Общий вид расчетной области в изометрии (слева – направо: внешняя среда, корпус, газовый мешок)

5. Проведение оценки потребной суммарной тепловой мощности для работы системы для лучшего варианта ПОС. Оценка потребной суммарной тепловой мощности для работы ПОС проводится при следующих предположениях: ПОС обеспечивает полное плавление снега на всей поверхности дирижабля за малый (порядка секунд) промежуток времени, то есть не происходит нарастания снежно-ледовой корки; при падении снега на корпус дирижабля тепло идет на нагрев снега, плавление снега и на нагрев полученной воды до температуры стенки; вода стекает струйками по поверхности дирижабля, тепло, уносимое водой с поверхности за время стекания, пренебрежимо мало (иными словами, температура воды не меняется за время стекания).

В диссертационной работе, с применением разработанной методики оценки энергетических затрат, необходимых для эффективной работы ПОС дирижабля жесткого типа нового поколения, были проведены *численные исследования вариантов системы обогрева корпуса дирижабля* при заданных исходных данных (табл. 4).

Таблица 4 – Исходные данные для проведения численного исследования

Параметр	Значение
Тип дирижабля	жесткий
Грузоподъемность дирижабля	средняя, до 10 тонн
Длина дирижабля	104 м
Объем дирижабля	26 тыс. м ³
Количество газовых секций ВГС	13
Размер зазора между внешней обшивкой и газовым мешком в дирижабле	0,2 м
Температура атмосферного воздуха	от 0 до – 10 °С
Скорость ветра	от 0 до 30 м/с
Температура внешней стенки корпуса дирижабля	≥ 2 °С

Численное моделирование ветрового обдува корпуса дирижабля в осесимметричной постановке задачи позволило предварительно оценить потребную тепловую мощность, необходимую для обеспечения работы ПОС, в диапазоне от 180 КВт до 2,4 МВт. При этом за минимальную площадь выпадения снега принималась площадь миделя, а за максимальную - площадь горизонтальной проекции дирижабля. На рисунке 7 представлены графические зависимости предварительно рассчитанных значений потребной мощности от скорости полета дирижабля, необходимых для обеспечения эффективной работы воздушно-тепловой ПОС корпуса дирижабля жесткого типа выше обозначенной размерности.

Далее в соответствии с предлагаемой методикой было проведено сравнение трех вариантов подачи теплого воздуха для нагрева внешней поверхности дирижабля:

- способ подачи теплого воздуха в нижний объем корпуса дирижабля, в каждую секцию (рисунок 8 а, б);
- способ подачи теплого воздуха снизу в зазор между внешней оболочкой и газовыми отсеками (рисунок 8 в);
- более сложный способ подачи теплого воздуха в верхнюю часть оболочки дирижабля (рисунок 9 а, б).

Численные эксперименты показали, что первый и второй способы (рисунок 8) неэффективны с точки зрения быстрого выхода верхней поверхности дирижабля на требуемый тепловой режим и расхода энергии. Схема подачи теплого воздуха сверху значительно более эффективна, так

как обеспечивает лучший подогрев верхней части корпуса, где нарастание снежно-ледового покрытия наиболее вероятно.

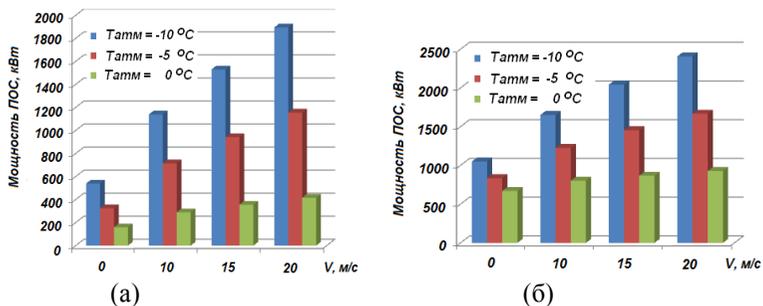


Рисунок 7 – Тепловая мощность, необходимая для обеспечения работы ПОС при минимальной (а) и максимальной (б) площади выпадения снега, температура внешней стенки 2 °С

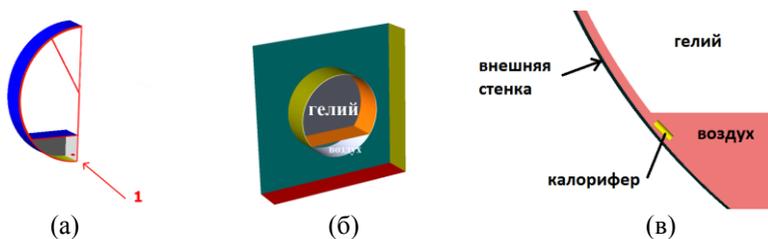


Рисунок 8 – Расчетная подобласть способа подачи теплого воздуха в нижний объем дирижабля в изометрии (1 – калорифер) (а). Одна секция корпуса дирижабля (б). Схема подачи теплого воздуха снизу (в)

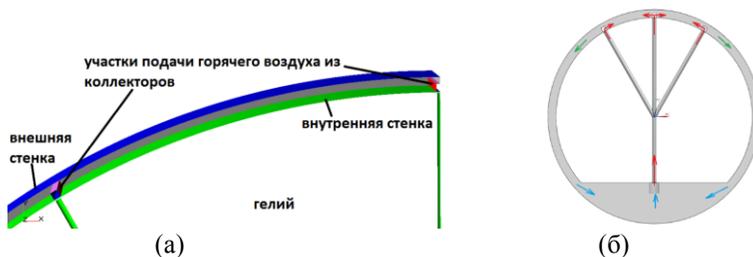


Рисунок 9 – Схема подачи теплого воздуха в верхнюю часть оболочки дирижабля

Численное моделирование выпадения снега на корпус дирижабля с использованием лагранжевой модели частиц (рисунок 10) показало, что максимальная концентрация выпавшего снега наблюдается в верхней части корпуса дирижабля в секторе около 60 градусов, что подтверждает принятую схему расположения коллекторов подвода теплого воздуха.

Вычислительные эксперименты показали, что в каждую секунду снег выпадает на площадь, равную 1/6 площади поверхности дирижабля и максимальное суммарное тепло на плавление снега составляет 0,21 МВт. На нагрев внутреннего объема дирижабля требуется 0,42 МВт.

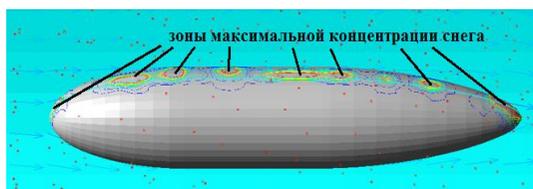


Рисунок 10 - Распределение концентрации выпавшего снега на поверхности корпуса дирижабля. Скорость ветра 15 м/с (поток течет слева направо)

Таким образом, при поддержании средней температуры стенки на уровне 2°С для обеспечения работы лучшего варианта ПОС (рисунок 9 а, б) дирижабля средней размерности достаточно максимальной тепловой мощности 2,74 МВт при температуре окружающего воздуха до -10° С и скорости ветра до 30 м/с. При менее жестких погодных условиях (температура окружающего воздуха -5 ° С, скорость ветра 20 м/с) потребная тепловая мощность ПОС будет вдвое меньше. То есть суммарной механической мощности маршевых двигателей, обеспечивающих максимальную крейсерскую скорость ЛА, достаточно для эффективной работы ПОС при всех ветровых режимах.

Вышеизложенные соображения можно распространить на дирижабли любой размерности, так как потребная мощность маршевой силовой установки и потребная тепловая мощность ПОС находятся в одной и той же зависимости от изменения линейного размера ЛА, а именно в квадратичной.

По результатам оценки энергетических затрат, необходимых для эффективной работы ПОС дирижабля жесткого типа нового поколения, в диссертационной работе предложены схемные решения воздушно-тепловой ПОС корпуса дирижабля жесткого типа: бортовая ПОС с теплообменниками на базе маршевой силовой установки (рисунок 11) и ПОС с пристыковываемым теплообменником (рисунок 12).

На рисунках 11, 12 изображены: 1 - съемная тепловая установка (теплообменник), 2 - радиальный воздухопровод, 3 - продольный воздухопровод, 4 - соединительное колено воздухопроводов, 5 - пространственный трехгранный стрингер, 6 - газовый мешок (отсек).

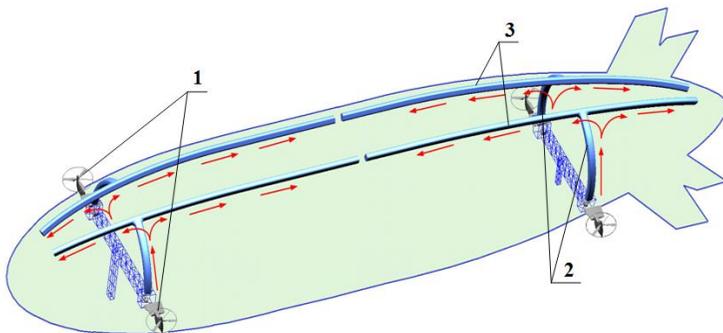


Рисунок 11 - Бортовая ПОС корпуса дирижабля жесткого типа с теплообменниками на базе маршевой силовой установки

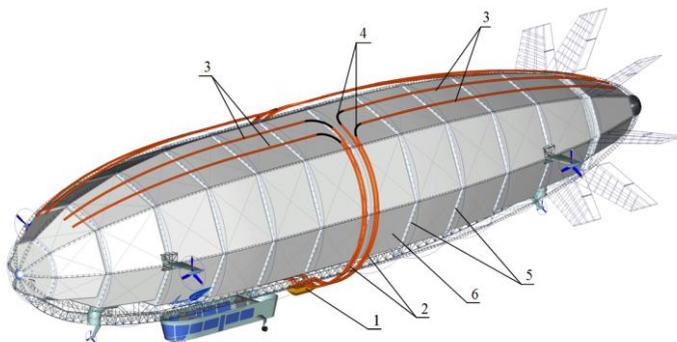


Рисунок 12 – Схема ПОС с пристыковываемым теплообменником

Реализация данных схемных решений ПОС предусматривает обязательное наличие воздушного зазора между внешней обшивкой и газовыми мешками.

Четвертая глава диссертации посвящена оценке возможности использования ВГС дирижабля в качестве воздушно-балластной системы высокого давления.

Идея использования в качестве основного и единственного балласта сжатого до нескольких атмосфер воздуха (в сочетании со сжатым несущим газом), закачанного в балластные емкости, является очень

заманчивой. Ее реализация позволила бы решить все проблемы балластировки транспортных дирижаблей, включая операции по снятию с борта ЛА коммерческих грузов на неподготовленных площадках. На рисунке 13 приведена схема воздушно-балластной системы высокого давления на примере самого большого жесткого дирижабля, построенного в США с 1940 года - прототипе Aerocraft компании Worldwide Aeros.

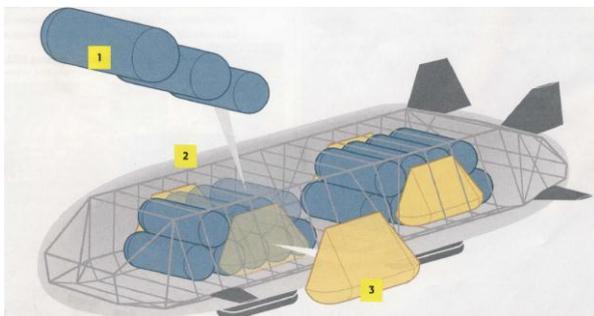


Рисунок 13 – Схема ВГС прототипа транспортных дирижаблей Aerocraft жесткого типа фирмы «Aeros» (США) (поз.1 – баллоны с гелием, поз.2 – наружная обшивка, поз.3 – воздушные резервуары)

Оценка массовой эффективности воздушно-балластной системы высокого давления производилась на основе *уравнения Лапласа*, которое связывает между собой геометрические, физические и массовые параметры газовых отсеков (оболочек):

$$\frac{\sigma_m}{\rho_m} + \frac{\sigma_t}{\rho_t} = \frac{p}{h}, \quad (4)$$

где σ_m – меридиальное напряжение, σ_t – окружное напряжение, ρ_m – меридиальный радиус кривизны, ρ_t – главный радиус кривизны, p – избыточное давление в оболочке, h - толщина стенки.

В миделевом сечении (цилиндрической части) оболочки действуют следующие напряжения

$$\sigma_m = \frac{p \cdot R}{2h}, \quad \sigma_t = \frac{p \cdot R}{h} \quad (5)$$

или погонные усилия (даН/м)

$$p_m = \frac{p \cdot R}{2}, \quad p_t = p \cdot R. \quad (6)$$

Из практики эксплуатации дирижаблей известно, что давление p в оболочке дирижабля не превышает 100 мм водного столба, что составляет

0,01 от атмосферного давления и приводит к относительной массе оболочки $\dot{m}_{об} = m_{об}/m_{взл} = 0,1 \div 0,25$.

Если в качестве балласта использовать только воздух, то необходимо довести уровень избыточного давления:

- в оболочке до $0,25 \div 0,4$ или

- в воздушных и газовых баллонетах до нескольких атмосфер, что при современном уровне развития материаловедения повлечет за собой увеличение массы оболочки в десятки раз. Это недопустимо с точки зрения массовой эффективности дирижаблей нового поколения.

В **заклЮчении** диссертации приведены основные положения диссертации, характеризующие ее научное содержание как разработку новых технических решений и методов проектирования ВГС дирижаблей нового поколения.

Приложения к диссертационной работе включают следующие материалы:

- копия акта внедрения результатов исследования;
- копия свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программный комплекс по формированию технико-экономических параметров транспортных дирижаблей нового поколения» № 2015613625 от 19.03.2015.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в диссертационной работе впервые комплексно рассмотрены наиболее проблемные и актуальные направления развития ВГС для дирижаблей жесткого типа нового поколения.

При проведении исследований и разработок по теме настоящей работы получены следующие результаты, обладающие научной новизной и практической ценностью:

1. Разработана усовершенствованная методика проектирования геометрических параметров основных элементов ВГС многоцелевых, транспортных и высотных (в том числе стратосферных) дирижаблей, расширяющая граничные условия для высоты функционирования дирижаблей и позволяющая минимизировать геометрические и весовые параметры основных элементов ВГС дирижаблей в диапазоне от 34% до 59% в зависимости от типа несущего газа.

2. Впервые предложена методика оценки энергетических затрат, необходимых для эффективной работы ПОС дирижабля жесткого типа нового поколения, разработанная на основе применения воздушно-теплого способа борьбы со снегом. Разработаны схемные решения ПОС дирижабля, повышающие эксплуатационные характеристики дирижабля,

позволяющие минимизировать энергетические затраты, необходимые для эффективной работы ПОС дирижабля, и обеспечивающие круглогодичную стоянку дирижабля под открытым небом.

3. На основе уравнения Лапласа проведена оценка возможности использования ВГС в качестве воздушно-балластной системы высокого давления в транспортных дирижаблях, которая показала, что данная идея при современном уровне развития материаловедения является неэффективной, так как приводит к многократному увеличению массы балластной системы дирижабля и значительному снижению весовой отдачи дирижабля по целевой нагрузке.

4. Усовершенствована технологическая база проектирования основных элементов ВГС дирижаблей нового поколения:

- алгоритм, соответствующий предлагаемой методике проектирования геометрических параметров основных элементов ВГС, реализован в модернизированном программном комплексе формирования облика дирижаблей различных типов, позволяющего повысить уровень точности и сократить время предварительных расчетов геометрических параметров основных элементов ВГС дирижабля;

- получены табличные и графические зависимости геометрических параметров элементов ВГС от размерности и скороподъемности ВПЛА, уровня избыточного давления в корпусе ЛА, типа рабочего газа (гелий, флегматизированный водород, воздух);

- даны практические рекомендации по заданию предпочтительных геометрических параметров основных элементов ВГС дирижаблей в зависимости от объема дирижабля, высоты полета, скороподъемности и типа газа, обеспечивающие максимальную эффективность функционирования ВГС.

5. Все поставленные в диссертационной работе задачи решены в полном объеме. Использование новых технических решений и разработанных методик проектирования ВГС позволит *повысить эффективность функционирования воздушно-газовой системы многоцелевых, транспортных и высотных дирижаблей жесткого типа нового поколения.*

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Основное содержание диссертации отражено в следующих публикациях.

Публикации в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов работ по диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук:

1. **Кирилин А.Н., Болдырева А.А.** Методическое обеспечение проектирования воздушно-газовой системы дирижаблей нового поколения – Вестник Дон. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 15, № 1 (80), DOI 10.12737/10392, ISSN 1992-5980 – С.93 - 102.
2. **Нейдорф Р.А., Болдырева А.А.** Объемный принцип управления подъемом / спуском челноков системы МААТ. – Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. - №7(144). Тематический выпуск Интеллектуальные САПР – С.184 - 190.

Публикации в зарубежных изданиях, индексируемых в базе данных Scopus:

3. **Kirilin A.N., Boldyreva A.A., Timushev S.F., Tsipenko A.V.** Thermal calculation of airship hull protection from snow. – Global Journal of Pure and Applied Mathematics. ISSN 0973-1768, Volume 12, Number 1(2016), pp. 603-615.
4. **Voloshin V., Chen Y., Neydorf R., Boldyreva A.** Aerodynamic characteristic study and possible improvements of MAAT feeder airships. – SAE 2013. AeroTech Congress & Exhibition [Электронный ресурс]. - Montreal (Quebec, Canada), 2013. - Режим доступа: <http://papers.sae.org/2013-01-2112>, doi: 10.4271/2013-01-2112.

Доклады в материалах международных и всероссийских научно-технических конференций, форуме и семинаре:

5. **Болдырева А.А.** Эффективность использования массы в летательных аппаратах аэростатного типа. - Перспективные системы и задачи управления: сб. материалов 7-ой Всерос. науч.-практ. конф. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2012. – С.112 - 117.
6. **Болдырева А.А.** Суточные температурные колебания высоты полета стратосферной платформы и методы их компенсации. – Системный анализ, управление и обработка информации: сб. тр. III Междунар. науч. семинара, п. Дивноморское, 27 сент. - 2 окт. [Электронный ресурс] / ДГТУ. – Ростов н/Д, 2012. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – С. 170 - 176.
7. **Нейдорф Р.А., Новиков С.П., Болдырева А.А.** Баллонетная подсистема управления состоянием дирижабля и ее математическая модель. - Инновация, экология и ресурсосберегающие технологии (ИнЭРТ-2012): тр. X Междунар. науч.-техн. форума [Электронный ресурс] / ДГТУ. - Ростов н/Д, 2012. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). - № гос. регистрации 0321203961. – С. 386 - 390.
8. **Нейдорф Р.А., Болдырева А.А.** Энергетические проблемы управления всплыванием челнока системы МААТ. - Материалы

восьмой научно-практической конференции "Перспективные системы и задачи управления" / ТТИ ЮФУ. - Таганрог, 2013.– С. 274 - 282.

9. **Нейдорф Р.А., Болдырева А.А.** Влияние конструктивных особенностей челнока системы МААТ на задачи и возможности управления. - Материалы восьмой научно-практической конференции "Перспективные системы и задачи управления" / ТТИ ЮФУ. - Таганрог, 2013. - С. 272 - 273.
10. **Kirilin A., Boldyreva A.** Functional capabilities of new generation transport airships gas-air system. – Proceedings of the 10th International Airship Convention & Exhibition [Электронный ресурс]. – Friedrichshafen (Germany), 2015. Режим доступа: http://www.airship-convention2015.org/nc/papers_download

Авторское свидетельство:

11. Программный комплекс по формированию технико-экономических параметров транспортных дирижаблей нового поколения: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015613625 А.Н. Кирилин, А. А. Болдырева. – Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 19.03.2015.

