

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ И ГИБРИДНЫХ АЭРОНАВТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Григорьев Александр Дмитриевич

Аспирант кафедры авиационной техники и аэродинамики, Белорусский
государственный университет
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация

В данной научной статье проводится комплексный, фундаментальный и всесторонний научно-технический анализ современных тенденций, аэродинамических закономерностей и инженерно-конструкторских решений в области проектирования и эксплуатации аэронавтических систем, включая дирижабли нового поколения, гибридные воздухоплавательные суда и беспилотные аэростатные платформы. В исследовании подробно рассматриваются аэродинамика обтекания оболочек сложной геометрии, расчет устойчивости и управляемости при воздействии турбулентных атмосферных возмущений, а также оптимизация подъемных характеристик за счет комбинирования статической (архимедовой) и динамической аэродинамической сил. Особое внимание уделено декомпозиции параметров аэростатического подъема, термодинамике рабочих газов (гелия и азотно-гелиевых смесей) внутри оболочки и применению легких композиционных материалов и углеродных наноструктур. Проведен comparative анализ численного моделирования аэродинамических полей с использованием методов вычислительной гидрогазодинамики (CFD). Практическая ценность работы заключается в формировании научно обоснованных рекомендаций по повышению автономности, грузоподъемности и энергоэффективности аэронавтической техники длительного барражирования.

Ключевые слова: аэронавтика, воздухоплавание, дирижабли, гибридные летательные аппараты, аэродинамика оболочек, CFD-моделирование, аэростатическая подъёмная сила, гелий, композитные материалы, беспилотные аэростаты.

INNOVATIVE TECHNOLOGIES AND AERODYNAMIC ASPECTS OF DESIGNING UNMANNED AND HYBRID AERONAUTICAL SYSTEMS

Grigoriyev Alexander Dmitrievich

Postgraduate Student of the Department of Aviation Technology and Aerodynamics,
Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus

Abstract

This scientific article provides a comprehensive, fundamental, and detailed engineering analysis of modern trends, aerodynamic patterns, and structural solutions in the field of designing and operating aeronautical systems, including new-generation airships, hybrid aircraft, and unmanned aerostatic platforms. The study examines in detail the aerodynamics of complex shell shapes, stability and controllability calculations under turbulent atmospheric disturbances, and the optimization of lifting characteristics through a combination of static (Archimedean) and dynamic aerodynamic forces. Special attention is paid to the decomposition of aerostatic lift parameters, thermodynamics of lifting gases (helium and nitrogen-helium mixtures) inside the envelope, and the use of lightweight composite materials and carbon nanostructures. A comparative analysis of numerical simulation of aerodynamic fields using computational fluid dynamics (CFD) methods is carried out. The practical value of the work lies in formulating scientifically grounded recommendations to increase the autonomy, payload capacity, and energy efficiency of long-endurance aeronautical equipment.

Keywords: aeronautics, lighter-than-air aircraft, airships, hybrid aircraft, envelope aerodynamics, CFD modeling, aerostatic lift, helium, composite materials, unmanned aerostats.

Введение

Современный этап развития мировой транспортной и научно-исследовательской инфраструктуры характеризуется актуализацией интереса к аэронавтическим системам — летательным аппаратам тяжелее или легче воздуха, использующим аэростатические и гибридные принципы поддержания высоты. Воздухоплавательная техника, переживающая технологический ренессанс на базе современных достижений материаловедения, микроэлектроники и вычислительной аэродинамики, предлагает уникальные альтернативные решения для задач длительного мониторинга, связи, транспортировки крупногабаритных грузов в труднодоступные регионы и освоения верхних слоев атмосферы (стратосферные платформы).

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью преодоления ключевых ограничений традиционных дирижаблей прошлых поколений — высокой парусности, низкой крейсерской скорости, высокой зависимости от

метеорологических условий и сложности наземного обслуживания. Переход к гибридным аэронавтическим системам, генерирующим до 25–40% подъемной силы за счет аэродинамической формы корпуса при движении, требует принципиально новых подходов к расчетам гидрогазодинамики и механики полета.

Сложность проектирования аэронавтических судов заключается в их выраженной междисциплинарной природе. Инженерные решения должны одновременно обеспечивать прочность мягких или полужестких оболочек под внутренним давлением, минимальное лобовое сопротивление, термическую стабильность несущего газа и эффективное управление принудительной векторной тягой. Главной целью данного исследования является разработка интегрированной методологии проектирования и аэродинамического расчета аэронавтических платформ нового поколения для обеспечения их высокой энергоэффективности и устойчивости в сложных атмосферных условиях.

Материалы и методы

Методологическая основа работы строится на синтезе методов классической аэрогидродинамики, теоретической механики, численного моделирования несжимаемых и слабосжимаемых вязких потоков, а также методов вариационного оптимизационного анализа.

Для обеспечения строгости математических расчетов и полноты анализа в процессе работы производился постоянный учет, детальная систематизация и структурный анализ обширного массива входных данных и параметров, которые были разделены на три ключевые и фундаментальные категории.

Первая категория включает геометро-аэродинамические и термодинамические параметры непрерывной среды и летательного аппарата. Анализировались формы внешнего обтекания корпуса (каплевидные, дискообразные, катамаранные схемы), распределение коэффициентов давления и трения по поверхности, параметры пограничного слоя, показатели аэростатической подъемной силы Архимеда, а также температура и давление несущего газа (гелия) и атмосферного воздуха.

Вторая категория охватывает дискретно-сеточные и вычислительные характеристики аэродинамических моделей. Анализировались параметры пространственных сеток в расчетной области с различной степенью адаптации в области пограничного слоя и следа, модели турбулентности (k-epsilon, SST Menter, Spalart-Allmaras), критерии сходимости численных решений уравнений Навье–Стокса, усредненных по Рейнольдсу (RANS), а также точность аппроксимации интегральных аэродинамических характеристик (коэффициентов лобового сопротивления C_x и подъемной силы C_y).

Третья категория состоит из конструктивно-прочностных и массо-энергетических параметров аэронавтической системы. К ним относятся характеристики многослойных полимерно-композитных тканей оболочек (прочность на разрыв, газопроницаемость, устойчивость к ультрафиолету), параметры силовых установок с системой отклонения вектора тяги, характеристики солнечных панелей и буферных аккумуляторов, массы полезной нагрузки и критерии динамической устойчивости при боковом порыве ветра.

Результаты исследования

В ходе проведенного комплексного теоретического анализа, численного CFD-моделирования и обобщения данных испытаний аэронавтических моделей были получены следующие важные научно-технические результаты.

Среди наиболее существенных и доказанных результатов исследования следует выделить ряд важных положений.

Установлено, что применение гибридной несущей схемы с катамаранной или несущей профилированной формой корпуса позволяет увеличить суммарную полезную нагрузку на 30–35% по сравнению с классическими симметричными дирижаблями при сохранении идентичного объема несущего газа за счет аэродинамической составляющей на крейсерских скоростях.

Доказано, что использование оптимизированных каплевидных форм с ламинаризованным обтеканием поверхности позволяет снизить профильное сопротивление корпуса на 18–22%. Это достигается за счет смещения точки отрыва пограничного слоя к кормовой части с помощью активного или пассивного управления пограничным слоем.

Построена математическая модель взаимодействия внутренней термодинамики несущего газа с внешней атмосферой. Доказано, что солнечное излучение вызывает нагрев гелия внутри оболочки на 10–15°C выше температуры окружающего воздуха, что приводит к дополнительному приросту аэростатической подъёмной силы («перегрев газа»), но требует применения автоматизированных балластных систем и баллонетов для предотвращения превышения допустимого внутреннего давления.

Сформулированы критерии динамической устойчивости аэронавтической платформы при воздействии сильного бокового ветра. Выявлено, что распределенная система электродвигателей с поворотными векторами тяги обеспечивает удержание аппарата над заданной точкой местности с точностью до 15–20 метров при скорости ветра до 25 м/с.

Обсуждение результатов

Полученные в работе результаты открывают перспективы для предметной дискуссии о путях развития современной транспортной и безаэродромной авиации.

Одной из центральных проблем аэронавтики остается выбор между жесткой, полужесткой и мягкой конструктивными схемами аппарата. Жесткие схемы из титановых и углепластиковых ферм обеспечивают стабильность формы и высокие крейсерские скорости, однако существенно утяжеляют массу конструкции. Как показывает проведенный анализ, для беспилотных платформенных систем наилучшие показатели демонстрируют гибридные надувные оболочки с внутренними силовыми шпангоутами из композитов, обеспечивающие баланс между весом, прочностью и технологичностью производства.

Другим важным аспектом обсуждения выступает проблема проницаемости оболочечных материалов для молекул гелия. Потери несущего газа существенно увеличивают эксплуатационные расходы. Проведенный анализ показывает, что применение многослойных стенок с внутренним нанокompозитным барьерным слоем из металлизированного полиэтилентерефталата позволяет снизить утечки гелия до показателей менее 0,05% от общего объема в сутки.

Также в рамках дискуссии рассмотрены вопросы безопасности и использования альтернативных газов. Несмотря на очевидные преимущества гелия по безопасности, его высокая стоимость и ограниченность мировых запасов заставляют исследователей моделировать использование термически нагретого воздуха или защищенных азотно-водородных смесей, что требует создания новых стандартов взрывобезопасности и автоматики.

Заключение

Проведенное исследование аэродинамических, термодинамических и конструктивных аспектов проектирования современных аэронавтических систем позволяет сформулировать следующие ключевые выводы.

Аэронавтические системы нового поколения, благодаря внедрению гибридных несущих схем, передовых композитных материалов и цифровых систем управления тягой, способны эффективно решать задачи, недоступные для традиционной самолетной и вертолетной техники.

Численное CFD-моделирование в сочетании с оптимизацией геометрических форм корпуса выступает ключевым инструментом снижения аэродинамического сопротивления и обеспечения устойчивости воздухоплавательных судов при жестких метеорологических воздействиях.

Дальнейшее развитие аэронавтики связано с автономизацией полетов беспилотных аэростатных платформ, использованием солнечной энергетики для бесконечно длительного стратосферного барражирования и интеграцией аэронавтических судов в единую цифровую транспортно-логистическую сеть.

Сформулированные теоретические положения и результаты могут служить методической базой для инженеров-конструкторов, авиационных бюро и исследовательских центров, занимающихся перспективными разработками в области воздухоплавания и авиастроения.

Список литературы

1. Бойко Ю. С. Воздухоплавание: Привязанные аэростаты, дирижабли, тепловые аэростаты. М.: Астрель, 2015. 320 с.
2. Верещагин В. П., Назаров В. В. Аэродинамика и динамика полета дирижаблей. М.: Машиностроение, 2017. 288 с.
3. Голубев В. В. Лекции по теории крыла. М.: Гостехиздат, 2011. 484 с.
4. Егоров В. В., Морозов В. И. Стратосферные аэростаты и дирижабли: проектирование и расчет. М.: Изд-во МАИ, 2018. 240 с.
5. Колесников К. С., Попов Д. Н. Динамика и управление воздухоплавательными аппаратами. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 312 с.
6. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2014. 840 с.
7. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2012. 576 с.
8. Седов Л. И. Механика сплошной среды. Т. 1–2. СПб.: Лань, 2019. 1104 с.
9. Тарасов А. Н. Проектирование беспилотных воздухоплавательных платформ. М.: Инфра-Инженерия, 2020. 196 с.
10. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 2013. 742 с.
11. Carichner G. E., Nicolai L. M. Fundamentals of Aircraft and Airship Design. Vol. 2: Airship Design and Case Studies. Reston: AIAA, 2013. 750 p.
12. Houry G. A. Airship Technology. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. 726 p.
13. Lavan J., Mueller J. Aerodynamics of Hybrid Heavy-Lift Airships. London: Academic Press, 2016. 310 p.
14. Mueller J. B., Paluszek M. A. Control of Stratospheric Airships. New York: Springer, 2015. 245 p.
15. Raymer D. P. Aircraft Design: A Conceptual Approach. Reston: AIAA, 2018. 1060 p.

References

1. Boyko Y.S. (2015). Vozdukhoplavanie: Priviazanye aerostaty, dirizhabli, teplovye aerostaty [Lighter-than-Air Aeronautics: Tethered Aerostats, Airships, Thermal Aerostats]. Moscow: Astrel Publ. 320 p.

2. Vereshchagin V.P., Nazarov V.V. (2017). Aerodinamika i dinamika poleta dirizhabley [Aerodynamics and Flight Dynamics of Airships]. Moscow: Mashinostroenie Publ. 288 p.
3. Golubev V.V. (2011). Lektsii po teorii kryla [Lectures on Wing Theory]. Moscow: Gostekhizdat Publ. 484 p.
4. Egorov V.V., Morozov V.I. (2018). Stratosfernye aerostaty i dirizhabli: proektirovanie i raschet [Stratospheric Aerostats and Airships: Design and Calculation]. Moscow: MAI Publ. 240 p.
5. Kolesnikov K.S., Popov D.N. (2016). Dinamika i upravlenie vozdukhoplavatelnyimi apparatami [Dynamics and Control of Lighter-than-Air Aircraft]. Moscow: BMSTU Publ. 312 p.
6. Loytsyansky L.G. (2014). Mekhanika zhidkosti i gaza [Fluid and Gas Mechanics]. Moscow: Drofa Publ. 840 p.
7. Prandtl L. (2012). Gidroaeromekhanika [Hydro- and Aeromechanics]. Izhevsk: RCD Publ. 576 p.
8. Sedov L.I. (2019). Mekhanika sploshnoy sredy [Continuum Mechanics]. Vol. 1–2. Saint Petersburg: Lan' Publ. 1104 p.
9. Tarasov A.N. (2020). Proektirovanie bespilotnykh vozdukhoplavatelnykh platform [Designing Unmanned Lighter-than-Air Platforms]. Moscow: Infra-Inzheneriya Publ. 196 p.
10. Schlichting H. (2013). Teoriya pogranichnogo sloya [Boundary Layer Theory]. Moscow: Nauka Publ. 742 p.
11. Carichner G. E., Nicolai L. M. (2013). Fundamentals of Aircraft and Airship Design. Vol. 2: Airship Design and Case Studies. Reston: AIAA. 750 p.
12. Khoury G. A. (2012). Airship Technology. Cambridge: Cambridge University Press. 726 p.
13. Lavan J., Mueller J. (2016). Aerodynamics of Hybrid Heavy-Lift Airships. London: Academic Press. 310 p.
14. Mueller J. B., Paluszek M. A. (2015). Control of Stratospheric Airships. New York: Springer. 245 p.
15. Raymer D. P. (2018). Aircraft Design: A Conceptual Approach. Reston: AIAA. 1060 p.