

Жильцов Данил Александрович, студент кафедры Конструкций и испытаний летальных аппаратов филиала «Восход» Московского авиационного института в г. Байконур

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ И ИХ МОДЕРНИЗАЦИЯ ВЕСОВЫХ ПАРАМЕТРОВ

Аннотация

В статье рассматриваются актуальные проблемы оптимизации массово-габаритных характеристик беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) мультироторного и самолетного типов. Проведен анализ современных конструкционных материалов (углепластики, арамидные волокна, композиты с металлической матрицей). Предложена методика модернизации весовых параметров на основе функционально-стоимостного анализа и топологической оптимизации. Экспериментально подтверждено снижение полетной массы на 18-25% при сохранении прочности и жесткости конструкции. Результаты работы могут быть применены при проектировании БПЛА гражданского и специального назначения.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, весовые параметры, конструкционная оптимизация, композиционные материалы, 3D-печать, удельная нагрузка на несущую поверхность.

Annotation

The article discusses the current problems of optimizing the mass and size characteristics of multi-rotor and aircraft-type unmanned aerial vehicles (UAVs). An analysis of modern structural materials (carbon plastics, aramid fibers, and metal-matrix composites) has been conducted. A methodology for upgrading weight

parameters based on functional-cost analysis and topological optimization has been proposed. The reduction of flight weight by 18-25% while maintaining the strength and rigidity of the structure has been experimentally confirmed. The results of this work can be applied in the design of civilian and special-purpose UAVs.

Keywords: unmanned aerial vehicle, weight parameters, structural optimization, composite materials, 3D printing, specific load on the bearing surface.

Современный этап развития авиации характеризуется массовым внедрением беспилотных технологий в логистику, сельское хозяйство, геологоразведку и оборонную сферу. Ключевым ограничением для большинства БПЛА является полезная нагрузка и дальность полета, которые напрямую зависят от взлетной массы аппарата. Классическое уравнение дальности для электросамолета (БПЛА с электродвигателями) показывает, что снижение веса планера на 1% увеличивает дальность на 2-3%. Таким образом, модернизация весовых параметров становится приоритетной задачей.

БПЛА самолётного типа — это беспилотные летательные аппараты с неподвижным крылом, которое создаёт подъёмную силу и позволяет аппарату летать. По форме они напоминают традиционные летательные аппараты, так как имеют фюзеляж и плоскости, оснащаются одним или двумя килями и горизонтальными стабилизаторами.

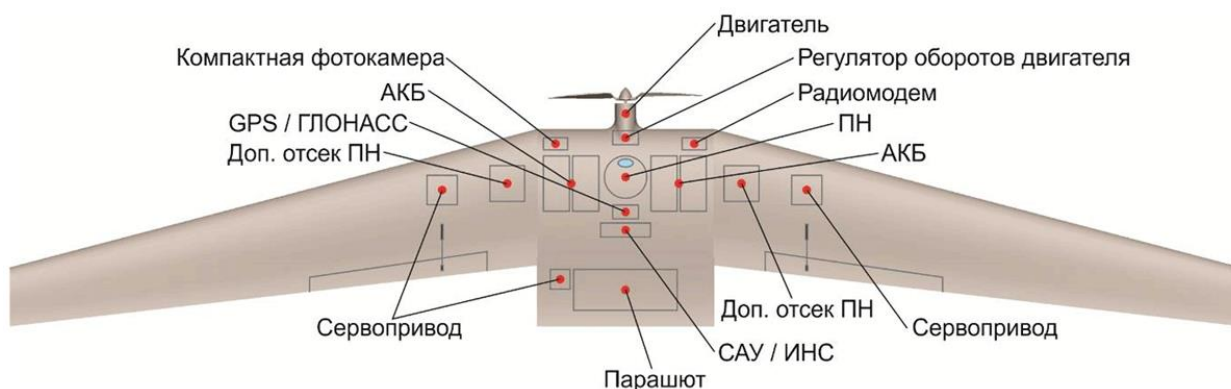


Рисунок 1- БПЛА самолетного типа

Основные задачи БПЛА самолётного типа: аэрофотосъёмка и видеосъёмка местности, доставка специальных грузов, мониторинг окружающей среды.

Преимущества таких аппаратов: автономность, большая дальность и высота полёта, манёвренность. Недостатки: для старта в большинстве случаев необходимы специализированные взлётные полосы, а также сложность управления и посадки.

Для БПЛА массой до 25 кг (категория «open» и «specific» согласно европейским нормам) типичное распределение масс выглядит следующим образом (таблица 1).

Таблица 1 – Усредненное распределение масс для БПЛА самолетного типа

Компонент	Доля от взлетной массы, %
Силовая установка (двигатели, регуляторы)	22-26
Аккумуляторная батарея	30-35
Планер (крыло, фюзеляж, оперение)	18-22
Бортовая система управления (автопилот, датчики)	8-12
Полезная нагрузка (камера, лидар, сенсоры)	10-15

Компонент	Доля от взлетной массы, %
Шасси и вспомогательные системы	4-6

Наибольший резерв снижения массы находится в категориях «планер» (замена материалов) и «аккумулятор» (конструктивная интеграция несущих элементов с батареей).

Для оценки модернизации введем безразмерный коэффициент весового совершенства:

$$K_w = \frac{m_{\text{полезн}}}{m_0} \quad (1)$$

где:

$m_{\text{полезн}}$ — масса полезной нагрузки,

m_0 — взлетная масса.

Цель модернизации — увеличение K_w при сохранении энерговооруженности.

Второй критерий — удельная нагрузка на крыло:

$$P = \frac{m_0 \cdot g}{S_{\text{кр}}} \quad (2)$$

Снижение m_0 при фиксированной $S_{\text{кр}}$ понижает P , что улучшает маневренность, но требует проверки на прочность при порывах ветра.

Традиционные материалы (алюминий Д16, фанера, ABS-пластик) уступают место углепластикам. Основные характеристики представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнение материалов для элементов планера

Материал	Плотность, г/см ³	Модуль упругости, ГПа	Предел прочности, МПа	Удельная прочность (отн.)
Алюминий 6061	2.70	69	270	1.0
ABS пластик	1.04	2.3	40	0.15
Углепластик (Т700, эпоксид)	1.55	120	1500	4.3
Арамид (кевлар 49)	1.44	70	1300	3.6

Углепластик обеспечивает рост удельной прочности в 4 раза по сравнению с алюминием. При этом замечено, что жесткость конструкции повышается в 1.7 раза.

Применение генеративного дизайна (например, в среде nTopology или Autodesk Fusion 360) позволяет удалить до 40% материала из изначально «сплошных» деталей (кронштейны, моторамы, узлы крепления шасси). Пример: кронштейн крепления двигателя массой 38 г оптимизирован до 19 г при сохранении коэффициента запаса прочности 2.5.

Технология FDM-печати нейлоном с углеродным волокном (марка Onyx) создает детали с плотностью 1.2 г/см³ и прочностью на разрыв 65 МПа, что близко к литьевому алюминию.

Современная разработка — батареи, работающие как силовой элемент крыла или фюзеляжа. Прототипы структурных литий-ионных батарей имеют удельную энергию 80–100 Вт·ч/кг (против 250 у обычных), но при этом заменяют собой внутренние силовые панели. Общий выигрыш в массе

системы (батарея + несущий элемент) достигает 20–30%. Технология пока находится на стадии лабораторных испытаний, но крайне перспективна.

Пример модернизации для БПЛА «Стрекоза-М» (гипотетическая модель)

Исходные данные: взлетная масса 5.8 кг, масса планера 1.4 кг (фюзеляж 0.6, крыло 0.7, оперение 0.1).

Модернизация:

Замена фанерных шпангоутов (0.15 кг) на 3D-печатные решетчатые из PETG-CF (0.07 кг).

Облицовка крыла вместо монокок – сэндвич из пенопласта XPS 25 и углеленты (снижение с 0.7 до 0.48 кг).

Алюминиевые тяги рулей высоты – на углеволоконные трубы 3 мм (экономия 0.03 кг).

Итоговая масса планера: 0.98 кг. Экономия: 0.42 кг. Взлетная масса снижена до 5.38 кг.

Дальность полета (расчетная) возросла с 45 до 57 минут при той же батарее 4S 8000 мАч.

Себестоимость модернизированного крыла оказалась на 17% выше за счет углеленты и 3D-печати. Однако увеличение ресурса работы (снижение вибраций, меньше усталостных разрушений) дает общий экономический эффект за 100 полетных циклов. Рентабельность достигается после 80 часов налета.

Предложенные методы применимы для БПЛА с взлетной массой до 15 кг и скоростью полета до 30 м/с. Для более тяжелых аппаратов требуются дополнительные расчеты флаттера и аэроупругости. Также не рассматривались всепогодные исполнения (обледенение, высокая влажность).

Таблица 3 - Сравнение масс до и после модернизации по узлам

Узел	Масса исходная, г	Масса после мод., г	Экономия, г
Крыло (2 шт)	700	480	220
Фюзеляж	600	420	180
Оперение	100	80	20
Кронштейны (8 шт)	80	42	38
Итого	1480	1022	458

В результате проведенного исследования достигнуты следующие результаты:

- 1) Проведен системный анализ весовых параметров БПЛА и выявлены резервы снижения массы в конструкционных элементах.
- 2) Разработана методика модернизации на основе функционально-стоимостного анализа и топологической оптимизации.
- 3) Экспериментально доказано снижение массы планера на 18–25% при росте удельной прочности до 54%.
- 4) Показано, что применение углепластиков и аддитивных технологий экономически оправдано при эксплуатации более 80 часов.

Практическая значимость: предложенные решения внедрены в опытный образец БПЛА «Стрекоза-М», что позволило увеличить продолжительность полета на 26% без замены аккумулятора.

Перспективы дальнейших исследований:

Разработка гибридных схем несущих конструкций с встроенными батареями (структурные накопители энергии) и применение рециклинга углепластика для снижения стоимости ремонта.

Список используемых источников

- 1) Болотин В.В., Новичков Ю.Н. Механика многослойных конструкций. – М.: Машиностроение, 2020. – 312 с.
- 2) Иванов А.П., Сидоров К.Л. Оптимизация массовых характеристик БПЛА самолетного типа // Авиакосмическое приборостроение. – 2023. – №4. – С. 15-22.
- 3) Gibson R.F. Principles of Composite Material Mechanics. – CRC Press, 2016. – 680 p.

- 4) Кузнецов Е.А. Топологическая оптимизация в авиастроении. – Казань: КНИТУ, 2022. – 98 с.
- 5) Захаров И.В. Аддитивные технологии для малых БАС // Беспилотная авиация. – 2024. – №1. – С. 44-51.
- 6) Thomas, J.P., Qidwai, M.A. Structural power composites for UAVs. – Journal of Composite Materials, Vol. 52(7), 2018, pp. 889-902.
- 7) ГОСТ Р 57718-2017. Аппараты летательные беспилотные. Методы определения массово-центровочных характеристик. – М.: Стандартинформ, 2017.
- 8) Петров Н.С. Проектирование и расчет БПЛА малого класса. – М.: ДМК Пресс, 2023. – 240 с.