

# Моделирование прочности и оптимизация конструкции малоразмерных транспортных систем\*

Николаева В.В., Дроботов А.В., Генералов И.А., Макаров А.М., Торубаров И.С.

ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

г. Волгоград, Российская Федерация

[rector@vstu.ru](mailto:rector@vstu.ru)

**Аннотация.** Современные малоразмерные транспортные системы находят широкое применение в различных сферах, от мониторинга до доставки грузов. Однако миниатюризация их конструкций ставит сложные инженерные задачи, связанные с обеспечением прочности, надежности и снижением массы. В данной статье исследуются методы моделирования и оптимизации конструкций малоразмерных БПЛА для сельского хозяйства с использованием аддитивных технологий и современных композитных материалов.

Основное внимание уделено анализу прочности рамы БПЛА, изготовленной из карбона, и сравнению её с конструкцией, созданной методом 3D-печати из пластика PETG. Проведено компьютерное моделирование в программах Autodesk Inventor и ANSYS, а также экспериментальные испытания на изгиб для оценки напряжений и деформаций конструкции. Результаты показали, что карбоновые рамы обладают высокой прочностью, но менее устойчивы к ударным нагрузкам, тогда как пластиковые конструкции демонстрируют большую деформацию и способны без разрушения противостоять ударным нагрузкам.

Особое внимание уделено оптимизации геометрии лучей рамы, в конструкции которых предложено использовать кольцевое сечение для снижения массы при сохранении прочности. Проведенные испытания подтвердили эффективность такого решения. В итоге применение аддитивных технологий для создания легких и надежных несущих конструкций для БПЛА представляется обоснованным.

**Ключевые слова:** конструкция сельскохозяйственного БПЛА, аддитивные технологии, оптимизация, карбон.

## ВВЕДЕНИЕ

Современные беспилотные летательные аппараты (БПЛА) прочно вошли как инструмент решения широкого круга задач – от военного применения до гражданских миссий мониторинга, картографии и доставки грузов [1]. Особую нишу в этом сегменте занимают малоразмерные БПЛА, которые благодаря компактным габаритам, высокой маневренности и относительно низкой стоимости производства получили широкое распространение. Однако, именно миниатюризация конструкции создает серьезные инженерные вызовы, связанные с обеспечением необходимой прочности и надежности при эксплуатации.

В настоящее время в сфере авиационного строения рассматривается применение новых материалов, а также проектирование конструкций, выигрывающих по легкости и прочности.

В выполнении полетных миссий самых различных сфер на первое место выходят FPV-дроны, сочетающие в себе набор компонентов, помогающих реализовать оператору управление с точки зрения пилота благодаря передаче изображения с камеры в реальном времени. Корпус такого БПЛА может иметь большой разброс размеров, поэтому и его рама может существенно варьироваться по конструкции [2]. Самым распространенной основой рам FPV-дронов являются плоские элементы из листовых материалов. Такая конструкция технологична, но обычно приспособлена для восприятия нагрузки лишь в одном направлении. Также простота соединений и открытая конструкция позволяют собрать и разобрать такую раму в сжатые сроки, что способствует ремонтпригодности. Грузоподъемность таких дронов достигает нескольких килограмм, однако основной задачей таких БПЛА является не перенос груза, а достижение высоких скоростей движения. Материалом для таких рам может служить пластик, фанера, зачастую применяют один из самых легких и прочных материалов – полимерный композит из переплетенных нитей углерода в матрице из полимерных смол – углепластик или карбон.

Применение карбона в конструировании БПЛА обусловлено тем, что углепластики отличаются низкой плотностью и высокими прочностными характеристиками, что позволяет их использовать при высоких нагрузках [3, 4]. Их производство требует конструирования отдельных форм для каждой детали, что влияет на итоговую цену изделия, поэтому материал зачастую применяют для укрепления уже готовых конструкций. На цену карбона также влияет применение более дорогих смол и оборудования, из-за чего его стоимость превышает стоимость стекловолокна и других аналогов, используемых в авиационной промышленности. Применение карбона не так широко распространено в более ответственных сферах из-за быстрого изнашивания от точечных ударов и невозможности восстановления после повреждений [5, 6].

Развитие аддитивных технологий открывает новые перспективы для создания оптимальных конструкций. 3D-печать позволяет не только быстро создавать прототипы деталей со сложной геометрией, но и целенаправленно варьировать их механические характеристики за счет изменения внутренней структуры и направления укладки материала. Однако эффективное использование этих возможно-

\* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и администрации Волгоградской области № 24-29-20242, <https://rscf.ru/project/24-29-20242/>. Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции Автоматизация, <https://rusautocon.org>

стей требует глубокого понимания взаимосвязи между технологическими параметрами печати и конечными эксплуатационными свойствами изделий.

Не менее важным аспектом является выбор материалов для конструкции БПЛА. Наряду с традиционными решениями (алюминиевые сплавы, стеклопластики) все большее распространение получают современные композиты на основе углеволокна и высокопрочные полимеры [7]. Каждый из этих материалов имеет свои преимущества и ограничения, а их оптимальное применение требует комплексного учета таких факторов как удельная прочность, ударная вязкость, устойчивость к вибрациям и технологичность изготовления.

Особого внимания заслуживают вопросы обеспечения надежности крепежных узлов и мест соединения элементов конструкции. Практика показывает, что именно эти участки часто становятся слабым звеном, определяющим общую надежность БПЛА. Современные подходы к проектированию предусматривают как совершенствование геометрии соединений, так и применение новых принципов силового взаимодействия элементов конструкции.

Все эти аспекты делают проблему моделирования и оптимизации конструкций малоразмерных БПЛА чрезвычайно актуальной как с научной, так и с практической точки зрения. Поиск оптимальных решений в этой области требует междисциплинарного подхода, сочетающего достижения материаловедения, компьютерного моделирования и современных производственных технологий.

#### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В корпусах беспилотных летательных аппаратов на протяжении всей истории использовались самые различные материалы, в том числе композитные материалы и пластики. Для производства конструктивных элементов из пластика в настоящее время используют аддитивное производство [8]. 3D-печать позволяет индивидуально подобрать необходимую конфигурацию для определенной задачи конструкции корпуса беспилотного аппарата и воспроизвести модель в короткие сроки без применения сложных и дорогих технологий. Физико-механические свойства некоторых материалов для аддитивного производства не исследованы, и спрогнозировать, как именно будет выдерживать нагрузки готовая конструкция невозможно, поэтому прочность корпусных элементов малогабаритных беспилотных летательных аппаратов исследуется статическими и динамическими способами анализа [9]. Для элементов, изготовленных посредством применения аддитивных технологий, существуют отдельные способы анализа прочностных характеристик [10, 11], так как композитные материалы отличаются волокнистой структурой и анизотропией свойств из-за расположения слоев. Существует ряд испытаний на испытательных машинах/стендах, благодаря которым можно выявить более точные физико-механические свойства материалов и конструкций. Отдельные стенды включают в себя различные устройства крепления, тиски, зажимы. Типовые исследования прочностных характеристик проводятся по ГОСТу 4651-82 [12].

Физико-механические свойства зависят также от вида конструированного изделия и способов его проектирования. Данные, полученные благодаря испытаниям материалов, можно использовать в компьютерном моделировании. Для наиболее точного анализа конструкции перед ее непосред-

ственным производством используются различные программные пакеты. Моделирование и анализ напряжений производится в CAD-программах: Компас 3D, Autodesk Inventor, SOLIDWORKS, ANSYS, COMSOL Multiphysics [13].

В процессе проектирования конструкции БПЛА может производиться моделирование нагрузок и оптимизация конструкции, что существенно снижает финансовые и временные затраты на разработку и производство.

Для корпусов всех типов летательных аппаратов предъявляются требования по минимальной массе при достаточно высоких характеристиках прочности и жесткости [14, 15]. Данные требования, как правило, являются взаимоисключающими, поэтому при проектировании корпусов БПЛА возникают задачи оптимизации [16]. Максимальное снижение массы корпуса при обеспечении необходимых жесткости и прочности изделия является целью оптимизации при решении таких задач. Это противоречие особенно остро проявляется в элементах, подверженных наибольшим нагрузкам – рамах, лучах и узлах крепления двигателей.

В данной работе предлагается оптимизация конструкции БПЛА с точки зрения технологичности производства аддитивными методами и ее веса при сохранении прочности и летных характеристик. Для подтверждения результатов предполагается сравнение прочности новой конструкции с уже существующей распространенной конструкцией методом прочностного анализа частей корпуса, подверженных разрушению при ударных нагрузках (при столкновениях).

Чаще всего нагрузке подвергаются лучи БПЛА и его опоры, т.к. именно они первые контактируют с препятствиями и испытывают изгибающие нагрузки. Конструкция луча при этом будет одним из решающих факторов распределения нагрузок.

Напряжение, воздействующее на тело при воздействии на него сил, определяется по выражению (1) [17, 18].

$$S = \frac{dR_0}{dA}, \quad (1)$$

где  $S$  – напряжение;  $dR_0$  – равнодействующая всех сил на бесконечно малом элементе;  $dA$  – элементарная площадка.

В таком случае для достижения наиболее выгодного воздействия сил, нужно сделать сечение как можно больше. Для такой задачи подходит кольцевое сечение (см. рис. 1).

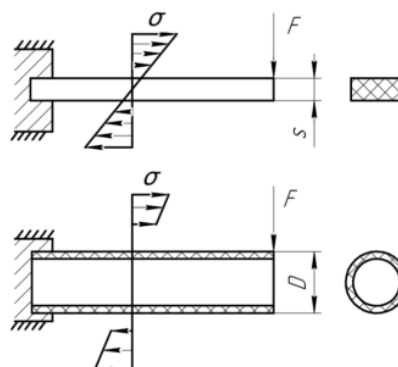


Рис. 1. Распределение сил в балках разных сечений при консольном нагружении

При воздействии изгибающей нагрузки на лучи БПЛА разных форм – прямоугольной толщиной  $s$  (изготовленного из листового материала), показанного на рисунке 1 вверху и луча с кольцевым сечением диаметром  $D$ , показанного на рисунке 1 внизу, то напряжения внутри таких лучей будут существенно отличаться. Сила  $F$  создает изгибающий момент, поэтому по всей длине возникают напряжения  $\sigma$ .

При изгибе слои материала, которые находятся с противоположной стороны от воздействия силы сжимаются, а слои со стороны силы растягиваются. Средняя же плоскость при этом испытывает минимальную или даже нулевую нагрузку. Так как среднее сечение подвержено минимальным деформациям, оптимальнее бы было иметь полость внутри луча для снижения массы. Однако произвести такую конструкцию традиционными методами оказывается не технологично.

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ РАМЫ ИЗ КАРБОНА

При проектировании БПЛА основной задачей является снижение его массы и повышение прочности конструкции. Однако из-за высоких аэродинамических нагрузок в полете и необходимости при этом обеспечивать низкую стоимость изготовления летательного аппарата выполнение данной задачи представляется очень сложным.

Существующие корпуса БПЛА имеют различные виды: от открытых конструкций с плоскими элементами, до полностью закрытых корпусов самолетного типа. Для задач, предъявляющих требования к прочности БПЛА, чаще всего используются аппараты с карбоновой рамой, поэтому для сравнительного анализа была рассмотрена конструкция карбоновой рамы 9 MARK4-V2, представленная на рис. 2.



Рис. 2. Внешний вид рамы БПЛА из листового композита MARK4-V2 размером 9''

На основе данной рамы был смоделирован корпус, в программе Autodesk Inventor. Его модель представлена на рис. 3.

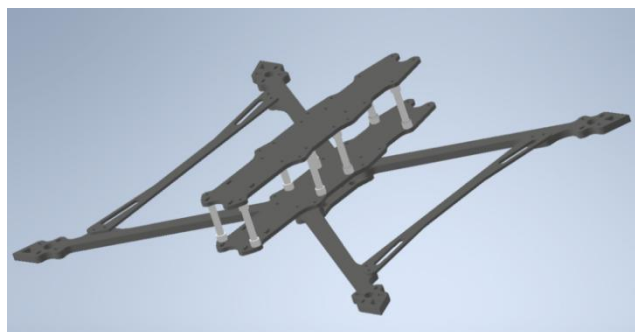


Рис. 3. 3D-модель рамы БПЛА из листового композита размером 9''

Карбоновая рама 9 дюймов X модификации с креплениями VTX 20x20 и 30x30 мм включает в себя 4 луча толщиной 6 мм, две нижние пластины 3 мм, верхнюю пластину 2 мм, а также дополнительные пластины для стабилизации положения камеры. Для исключения вибраций в конструкции присутствуют тяги между лучами, а толщина лучей составляет 6 мм. Размеры и положение отверстий 3D-модели были взяты с рамы 9 MARK4-V2, сопряжения и несущие размеры также сохранены, однако исследуемая 3D-модель не содержит дополнительных элементов для крепления FPV-камеры, так как в работе будут анализироваться только несущие части конструкции. Опорным местом в данном случае будет выступать центр фюзеляжа. Места нагружения (приложения нагрузки) – места крепления двигателей на противоположно расположенных лучах. Нагрузка на плоский луч распределяется по всему сечению, но напряжение в середине луча при воздействии изгибающего момента будет минимальным. Однако такой вид луча обуславливается простотой его производства методами аддитивных технологий.

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ РАМЫ БПЛА

Для оптимизации конструкции нами предложена модель, представленная на рис. 4.

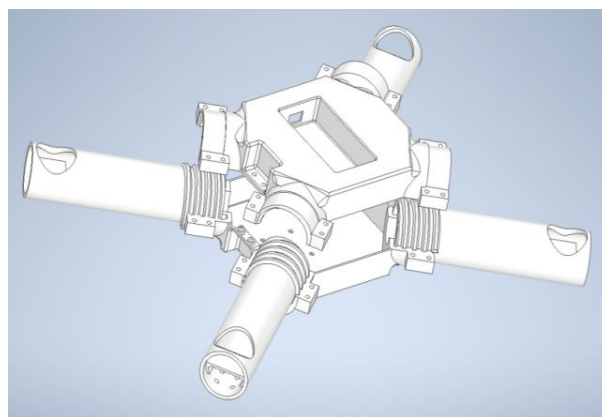


Рис. 4. 3D-модель закрытого пластикового корпуса

Данная конструкция состоит из верхней и нижней частей корпуса, соединяющихся между собой винтами. Фиксация луча в корпусе также обеспечивается винтовым креплением. Зажимы корпуса в местах крепления предотвращают выкручивание луча. Электрические компоненты располагаются внутри корпуса, и также могут быть размещены в цилиндрических полостях лучей. Закрытая конструкция защищает электронику от попадания мелких частиц, загрязнения, а также поломки в случае столкновения с препятствиями. Защита электроники позволяет предотвратить короткое замыкание, пробой компонентов, снизить скорость окисления контактов.

Полость в верхней части корпуса предназначена для аккумулятора БПЛА, который должен быстро извлекаться для замены, и охлаждаться для предотвращения перегрева [19]. Двигатели закреплены на концах лучей на специальном креплении. Все провода расположены в полости корпуса и внутри лучей.

Данный корпус при изготовлении аддитивным образом с заданным процентом заполнения пластиком равным 30% будет весить 210 грамм. Данного заполнения хватит, чтобы выдержать основные нагрузки и повысить летные характеристики корпуса. Конструкция должна выдерживать падение с высоты, поэтому в испытании к креплениям двигателей прикладывалась нагрузка 100 Н. Запаса коэффициента прочности при этом получается достаточно во всех точках конструкции. Места, которые больше всего испытывают нагрузку – крепления двигателей, внешняя резьба луча и места крепления к корпусу (см. рис. 5). Полочки в данных местах могут быть не критичными, так как крепление двигателя слишком мало, и его замена не принесет никаких неудобств, а дефекты резьбы приведут только к замене луча, и защитят внутреннюю электронику от возможных дефектов. Однако данное предположение должно подкрепляться и в реальной жизни, поэтому предлагается испытать лучи на изгиб.

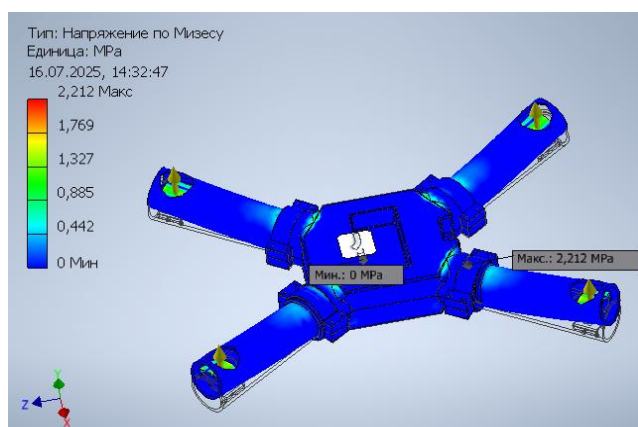


Рис. 5. Моделирование напряжений по Мизесу в 3D-печатном пластиковом корпусе

Для сравнения было проведено моделирование прочности серийно изготавливаемого корпуса из листового композита (рис. 2). Такая же нагрузка величиной 100 Н была приложена также к местам креплений двигателей, которые находятся на самом плоском луче. Нагруженная модель представлена на рис. 6.

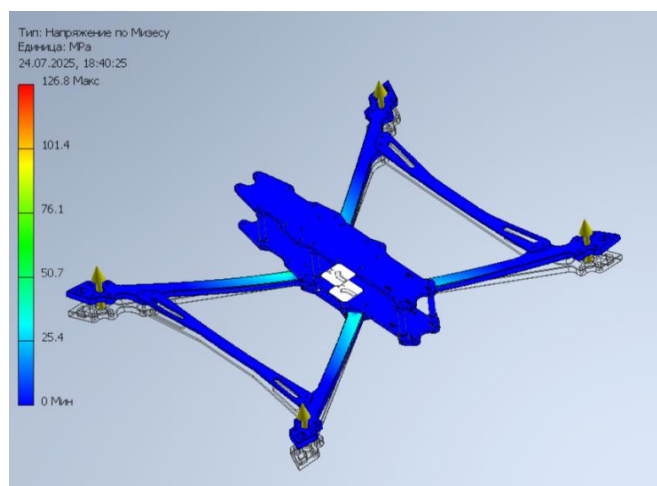


Рис. 6. Моделирование напряжений по Мизесу корпуса БПЛА из листового композита

По результатам моделирования напряжений самыми опасными местами являются основания лучей, что соответствует опытным данным, так как конструкция большинства беспилотников сделана так, что основные механические характеристики и аэродинамические нагрузки принимают на себя лучи. Они также являются главными несущими элементами беспилотника. Обе модели хорошо распределяют нагрузку, но у корпуса с плоскими элементами в лучах при такой нагрузке коэффициент запаса прочности не является достаточным (см. рис. 7). Нехватка коэффициента запаса прочности может привести к деформации, поломкам и аварии. При неоптимальной геометрии конструкции слабые места в узлах будут претерпевать большие деформации, которые приведут к повреждению корпусных элементов и внутренних компонентов БПЛА.

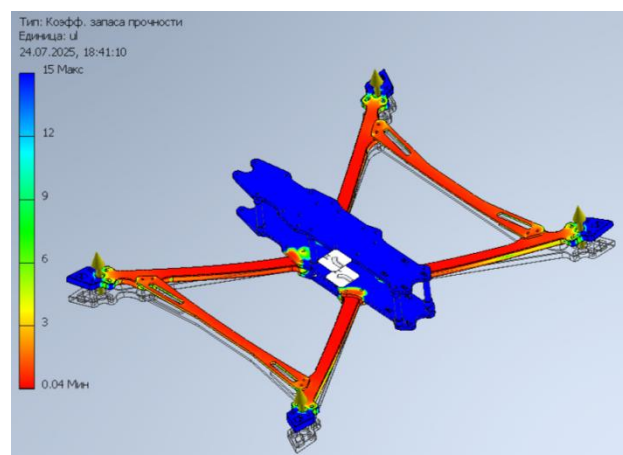


Рис. 7. Коэффициент запаса прочности корпуса БПЛА из листового композита

Обе конструкции имеют опасные сечения в лучах, поэтому для получения достоверного результата требуется исследовать данные элементы на испытательном стенде. В качестве пластика для печати корпусных элементов, было рассмотрено несколько видов материалов. Характеристики некоторых пластиков представлены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства материалов для аддитивных технологий

Название	Технические характеристики			
	модуль упругости при сжатии, ГПа	предел прочности при растяжении, МПа	коэффициент Пуассона	модуль Юнга, ГПа
ТПУ (REC Easy Flex)	0,044	27,96	0,45	0,074
Углеродное волокно ВТкУ-3	150	1700	0,22	110
PETG	1,85	66	0,38	2100
ABS	1,71	50	0,37	2,4
PLA	3,5	34,8	0,35	3,5
EASY FLEX	0,044	27,96	-	0,044
RELAX	1,81	36,5	-	-
Нейлон 6.6	3	82,7	0,39	1,4
Полиамид 6	2,4	85	0,375	2,2
Полиамид 12	1,35	35	0,2	1,35
AEROTEX	-	51	-	-

Приведенные в табл. 1 материалы широко распространены или в области аддитивных технологий, или в области авиастроения. Материал должен обладать рядом свойств: он должен быть достаточно прочным, но при этом легким. Одним из самых важных критериев выбора являются низкие температурные деформации материала, хорошая межслойная прочность и удобство печати, поэтому для печати прототипов выбран пластик PETG. Трехосевая печать для луча подобной формы будет слишком затратной из-за большого количества поддержек, поэтому для производства была выбрана пятиосевая печать.

Испытания на изгиб проводились на универсальной испытательной машине ТРМ-С 10 А1 с дополнительной оснасткой для исследования прочностных характеристик по требованиям ГОСТ 4548-2014 [20]. Для наиболее точного сравнения испытание лучей двух сечений были проведены в одних и тех же условиях и использовался нестандартный метод исследования пластиковой конструкции. Сила действовала лишь на один конец луча, другой был жестко закреплен в разработанной оснастке. Детали из карбона выдержали большую нагрузку, однако сломались с меньшей деформацией. Лучи с кольцевым сечением выдержали большую деформацию, за счет их формы изгиб происходил более плавно, и основная деформация концентрировалась в местах луча, отдаленных от электрических компонентов и местах крепления двигателя (см. рис.8).

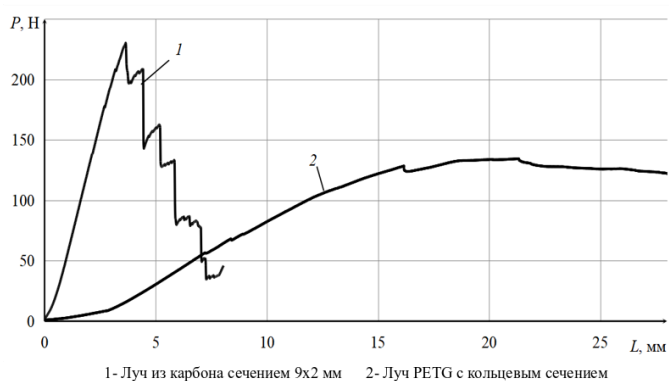


Рис. 8. Зависимость деформации  $S$  от силы  $F$  при испытаниях на изгиб лучей из карбона и пластика PETG

Следует отметить, что два образца 3D печатного луча воспринимали нагрузку по-разному. Это обусловлено настройкой печати и укладкой слоев пластика. Луч, в котором нагрузка в основном шла на резьбу сломался быстрее, чем тот, который испытывал большую деформацию.

Различие в максимальной нагрузке у лучей с кольцевым сечением показывает, что при проектировании корпуса БПЛА требуется такая конструкция, которая будет предсказуемо вести себя при 3-х осевой и 5-ти осевой печати. При аддитивном производстве луча с винтовым креплением наплавление материала в местах резьбы может быть неравномерным из-за отклонений оснастки по длине луча. При этом в каждом месте слой будет ложиться неидеально, что приведет к неравномерной нагрузке на луч и его поломке именно в месте крепления. По результатам испытаний было выявлено, что такой луч выдерживает меньшую нагрузку, поэтому было предложено изменить винтовое крепление луча на крепление с пазом по всему диаметру

(см. рис. 9). Внутри корпуса, состоящего из двух половин, спроектирован паз, в котором будет закрепляться такой луч. Сила трения в таком случае будет больше и корпус должен выдерживать большие нагрузки.

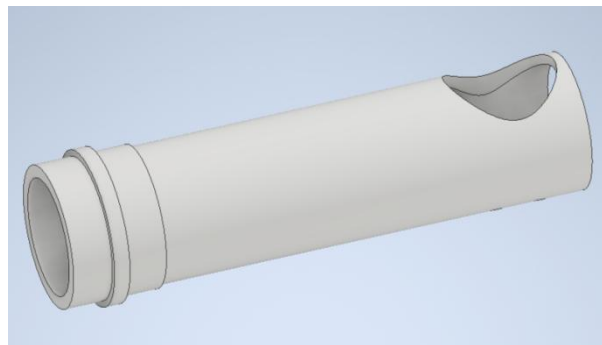


Рис. 9. Доработанная конструкция пластикового луча

Еще одним преимуществом кольцевого крепления является точность и простота установки, так как крепление винтового вида требует точного совпадения начала резьбы. Такая конструкция, как показывает моделирование, выдерживает большую нагрузку (см. рис. 10).

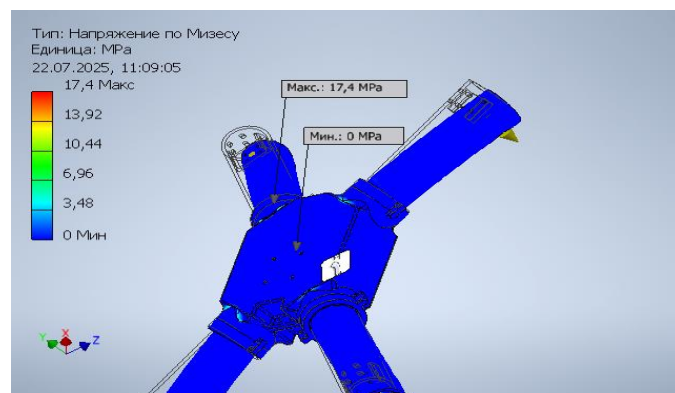


Рис. 10. Моделирование напряжений по Мизесу в 3D-печатном пластиковом корпусе с модифицированными лучами

Масса нового луча меньше по сравнению с прошлым вариантом конструкции, за счет уменьшения количества материала и изменений параметров печати.

При нагружении опасными местами будут являться место крепления луча из-за его относительно малых размеров, однако напряжения будут более равномерно распределяться по длине луча, что позволит выдержать ему большее усилие. Такая конструкция также удовлетворяет условиям коэффициента запаса прочности (см. рис. 11).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Моделирование БПЛА является одной из самых ключевых стадий в проектировании, испытании и эксплуатации беспилотных систем. САД-программы позволяют проанализировать и оптимизировать параметры конструкции без трудоемких экспериментов. Оптимизация в программных пакетах позволяет ускорить процесс разработки и повысить надежность беспилотных систем. В работе были приведены сравнительные характеристики двух моделей рам БПЛА. По результатам моделирования была предложена

конструкция, масса которой близка массе рамы из листового композита. В соответствии с данными испытаний было выявлено, что карбон имеет большую прочность на разрыв, но из него сложно воспроизвести более сложную форму, а простые формы не способны эффективно противостоять нагрузкам на изгиб. Конструкция закрытого корпуса из пластика выдерживает меньшую нагрузку, но может сильнее деформироваться, поэтому для ее разрушения требуется потратить больше энергии, то есть может выдержать удар с большим импульсом. Таким образом, БПЛА, созданные посредством аддитивных технологий, могут предназначаться для выполнения длительных заданий, которые требуют надежность системы. Также предложенный корпус является полностью закрытым, благодаря чему повышается защита компонентов от внешних воздействий и увеличивается срок службы оборудования.

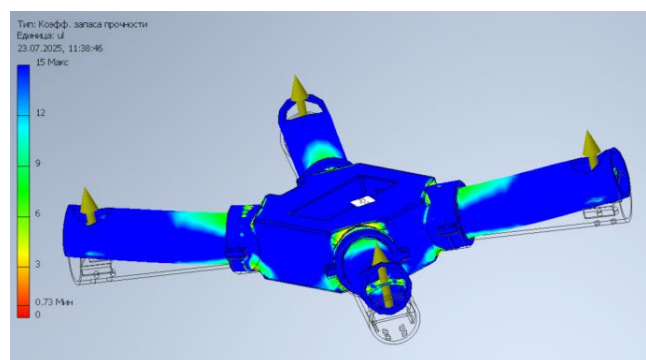


Рис. 11. Коэффициент запаса прочности в 3D-печатном пластиковом корпусе с модифицированными лучами

#### ЛИТЕРАТУРА

- Лихтин С.С. Анализ конструкций БПЛА и выбор метода управления в условиях ветровых возмущений // Фундаментальные и прикладные аспекты компьютерных технологий и информационной безопасности : Сборник статей Всероссийской научно-технической конференции 18., Таганрог, 10–15 апреля 2023 года. – Таганрог: Южный федеральный университет, 2023. – С. 161-163.
- Мишкин С.И. Применение углепластиков в конструкциях беспилотных аппаратов (обзор) // Труды ВИАМ. – 2022. – № 5(111). – С. 87-95. DOI 10.18577/2307-6046-2022-0-5-87-95.
- Иванов А.Л. FPV-дроны / А.Л. Иванов, В.Ю. Морозов, А.А. Соловьев, Р.Ю. Сухарев // Флагман науки. – 2024. – № 10(21). – С. 256-258. DOI 10.37539/2949-1991.2024.21.10.003.
- Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023621325 Российская Федерация. «БПЛА коптерного типа с внешним источником питания» : № 2023620395 : заявл. 13.02.2023 : опублик. 26.04.2023 / С.Н. Салтыков, А.Н. Липин, Б.Ч. Аюров и др.; заявитель Федеральное государственное автономное учреждение «Военный инновационный технополис «ЭРА».
- Сенюшкин Н.С. Применение композиционных материалов в конструкции БПЛА / Н.С. Сенюшкин, Р.Р. Ямалиев, Л.Р. Ялчибаева // Молодой ученый. – 2011. – № 4-1. – С. 59-61.
- Раскутин А.Е. Стратегия развития полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. – 2017. – № 5. – С. 344-348. DOI 10.18577/2071-9140-2017-0-5-344-348.
- Павлов Е.В. Применение композиционных материалов в конструкции БПЛА // XXIV Тулолевские чтения (школа молодых ученых): тексты докладов участников Международной молодёжной научной конференции, в 6 т., Казань, 07–08 ноября 2019 года. Том I. – Казань: Издательство ИП Сагиева А.Р., 2019. – С. 470-474.
- Гращенко Д.В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов / Д.В. Гращенко, Л.В. Чурсова // Авиационные материалы и технологии. – 2012. – № 5. – С. 231-242.
- Андреев Ю.В. Проблемы нормирования прочности конструкций БПЛА / Ю.В. Андреев, В.И. Бирюк, А.И. Блинов и др. // Прочность конструкций летательных аппаратов: Сборник статей научно-технической конференции, приуроченной к 110-летию со дня рождения академика А.И. Макаревича, Жуковский, 23–24 апреля 2014 года. – Жуковский: Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского, 2015. – С. 69-78.
- Каменских И.Н.В. Весовой подход в оценке совершенства конструкции БПЛА / И.Н.В. Каменских, А.В. Бобков // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: Материалы всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов: в 2 частях, Комсомольск-на-Амуре, 09–20 апреля 2018 года. Том Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, 2018. – С. 480-481.
- Сагдиев А.Р. Анализ моделей и методов оценки прочностных характеристик полимерных композиционных материалов / А.Р. Сагдиев, В.В. Некрасов // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2025. – № 1-3(100). – С. 220-224. DOI 10.24412/2500-1000-2025-1-3-220-224.
- ГОСТ 4651-82. Пластмассы. Метод испытания на сжатие [Текст]. – Введ. 1983-07-01. – М.: Стандартинформ, 1982. – 16 с.
- Хасенов И.М. Моделирование динамики систем твёрдых и упругих тел: обзор пакетов моделирования / И.М. Хасенов, В.В. Титов, А.В. Сергеев // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2024. – Т.17, № 8. – С. 1100-1115.
- Кулаков К. С. Применение аддитивных технологий для прототипирования и изготовления составных частей БПЛА / К.С. Кулаков, Ю.П. Крылов, В.И. Красников // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. – 2024. – № 5-6(191-192). – С. 130-136. DOI 10.53816/23061456\_2024\_5-6\_130.
- Байгутина И.А. Испытания новых типов БПЛА // Практические аспекты применения современных беспилотных летательных аппаратов. – Бургаз: Институт за гуманитарные науки, экономика и информационные технологии, 2022. – С. 168-186. EDN YBQMBQ.
- Огнев Ю.Ф. Результаты отработки технологических исследований в конструкции БПЛА / Ю.Ф. Огнев, О.Ш. Бердиев, Ю.П. Денисенко // Наука в центральной России. – 2012. – № 18. – С. 47-51.
- Витюнин М.А. Соппротивление материалов: Учебное пособие / М.А. Витюнин, О.А. Чикова. – Екатеринбург: Уральский государственный педагогический университет, 2014. – 136 с. EDN UOLFMTM.

18. Павлов М.С. Оптимальное проектирование корпуса беспилотного летательного аппарата / М.С. Павлов, А.К. Каравацкий, К.В. Костюшин и др. // Вестник Томского государственного университета. – 2021. – № 73. – С. 71-80.  
19. Тыныбаев С.К. Оценка и выбор источников питания беспилотных летательных аппаратов / С.К. Тыныбаев, Г.Н.

Байсеитов, Д.О. Тойбазаров // E-Scio. – 2020. – № 4(43). – С. 458-465.

20. ГОСТ 4548-2014. Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб [Текст]. – Введ. 2015-07-01. – М. : Стандартинформ, 2014. – [IV], 12 с

DOI: 10.24892/RIJIE/20260110

# Modeling and Optimization of Small Unmanned Aerial Vehicle Designs

Nikolaeva V.V., Drobotov A.V., Generalov I.A., Makarov A.M., Torubarov I.A.

Volgograd State Technical University  
Volgograd, Russian Federation  
[rector@vstu.ru](mailto:rector@vstu.ru)

**Abstract.** Modern small unmanned aerial vehicles (UAVs) are widely used in various fields, from monitoring to cargo delivery. However, the miniaturization of their designs poses complex engineering challenges related to ensuring strength, reliability, and weight reduction. This article explores methods for modeling and optimizing small UAV designs using additive technologies and modern composite materials.

The main focus is on the analysis of the strength of the UAV frame made of carbon and its comparison with the design created by 3D printing from PETG plastic. Computer modeling was carried out in Autodesk Inventor and ANSYS, as well as experimental bending tests to assess the distribution of loads and deformations. The results showed that carbon frames have high strength, but are

less resistant to long-term loads, while plastic structures demonstrate better resistance to deformations and can be more reliable for long-term missions.

Particular attention is paid to optimizing the geometry of the frame beams, where a ring section is proposed to reduce weight while maintaining strength. The tests conducted confirmed the effectiveness of this solution. In conclusion, a conclusion is made about the prospects of using additive technologies to create lightweight and reliable UAV designs, especially in conditions where resistance to long-term loads is important.

**Keywords:** UAV design, additive technologies, optimization, carbon.

## Библиографическое описание статьи

Николаева В.В. Моделирование прочности и оптимизация конструкции малоразмерных транспортных систем / В.В. Николаева, А.В. Дроботов, И.А. Генералов, А.М. Макаров, И.С. Торубаров // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2026. – Т.13, №1. – С. 58-64. DOI: 10.24892/RIJIE/20260110

## Reference to article

Nikolaeva V.V., Drobotov A.V., Generalov I.A., Makarov A.M., Torubarov I.A. Modeling and optimization of small unmanned aerial vehicle designs, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2026, vol.13, no.1, pp. 58-64. DOI: 10.24892/RIJIE/20260110