

Научная статья  
УДК 629.7.02  
URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188037>  
EDN: <https://www.elibrary.ru/TAXCEY>



## Оптимизационный подход к проектированию рамы БПЛА с защитой от обледенения

Станислав Львович Калюлин<sup>1✉</sup>, Иван Евгеньевич Черепанов<sup>2</sup>, Владимир Яковлевич Модорский<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Российская Федерация

<sup>1</sup> [ksl@pstu.ru](mailto:ksl@pstu.ru)✉

<sup>2</sup> [cherepanovie@sbiw.ru](mailto:cherepanovie@sbiw.ru)

**Аннотация.** Представлены результаты оптимизационного проектирования силовой рамы беспилотного летательного аппарата (БПЛА) мультироторного типа с защитой от обледенения. По результатам многокритериальной многопараметрической оптимизации масса конструкции луча снижена на 18%, прогиб при нагружении в продольной плоскости БПЛА уменьшился в два раза, прогиб при нагружении в поперечной плоскости уменьшился в 1,4 раза. Конструкция рамы имеет усиленные ребрами жесткости лучи, материал конструкции — полиамид с дискретными частицами углеволокна. Корпусные детали имеют закрытый усиленный контур по периметру, защищающий от внешних метеоусловий, в том числе от дождя, снега, ледяного дождя и ультрафиолета. Применение аддитивных технологий при изготовлении силовой рамы БПЛА позволяет интегрировать в конструкцию противообледенительную систему в процессе печати для снижения образования ледяных наростов при эксплуатации в зимних условиях.

**Ключевые слова:** оптимизационное проектирование силовой конструкции рамы БПЛА, численное моделирование обледенения силовой рамы, отечественное программное обеспечение многокритериальной многопараметрической оптимизации, защита рамы от внешних метеоусловий, рама беспилотной авиационной системы из полиамида с дискретными частицами углеволокна

**Финансирование:** работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 24-79-00203.

**Для цитирования:** Калюлин С.Л., Черепанов И.Е., Модорский В.Я. Оптимизационный подход к проектированию рамы БПЛА с защитой от обледенения // Вестник Московского авиационного института. 2026. Т. 33. № 2. С. 63–74. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188037>

Original article

## An Optimization Approach to the UAV Frame Designing with Icing Protection

Stanislav L. Kalyulin<sup>1✉</sup>, Ivan E. Cherepanov<sup>2</sup>, Vladimir Ya. Modorsky<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

<sup>1</sup> [ksl@pstu.ru](mailto:ksl@pstu.ru)✉

<sup>2</sup> [cherepanovie@sbiw.ru](mailto:cherepanovie@sbiw.ru)

© Калюлин С.Л., Черепанов И.Е., Модорский В.Я., 2026

**Abstract**

Optimization approach to the unmanned aerial vehicles (UAV) allows achieving the most profitable weight-and-size and aerodynamic characteristics. Both genetic and gradient algorithms, neuron networks, topological and parametric optimization are being used herewith.

The UAV universality enhancement allows expanding areas and scenarios of their application. The UAV structure proposed in this article was being fabricated with additive technologies application from the polymer composite material, namely polyamide with the carbon fiber particles. In contrast to laser cutting of the carbon fiber-reinforced plastic plates, manufactured by the prepreg technology, this technology for the multi-rotor type frames manufacturing allows producing reinforcement ribs and the UAV case protection from the external impact. Concurrently with this, the frame should be rather simple for assembling, manufacturable for the batch production and competitive in the market.

The purpose of the presented article consists in developing the multi-rotor type UAV load-bearing structure from the polymer composite materials, adapted for fabrication by the additive technologies, possessing icing protection and designed base on the optimization approach with operational loads imitation.

The frame structure contains beams reinforce by the reinforcement ribs. The case-shaped parts have closed reinforced contour over their perimeter, protecting from external meteorological conditions, including rain, snow, ice rain and ultraviolet.

Application of the optimization approach based on the IOSO PM domestic software for multi-criteria multi-parameter optimization allowed performing 480 computations of the stressed-deformed state with the operational load imitation for various geometric parameters of the UAV load-bearing frame structure. From the optimization results, the weight of the structure was reduced by 18%, deflection while loading in the UAV longitudinal plane halved, and deflection in while loading in the UAV transverse decreased by 1.4 times.

Numerical modeling of icing of the UAV load-bearing frame optimal from the viewpoint of the weight-and-rigid characteristics of the structure was performed for the two modes, namely hoarfrost and ice rain. It was revealed that icing of the internal zones of the frame, where elements of electronics located, did not occur. The front fairing of the base casing is most susceptible to ice formation. The shape of the ice coating herewith is equidistant to the fairing shape, which unessentially affects the aerodynamic quality degradation of the load-bearing structure.

Application of additive technologies while the UAV load-bearing frame manufacturing allows integrating the anti-icing system during the printing process to reduce the ice bodies growth while operation under winter conditions.

**Keywords:** optimization designing of the UAV frame load-bearing structure, numerical modeling of the load-bearing frame icing, domestic software for multi-criteria multi-parameter optimization, frame protection from the external weather conditions, unmanned aerial system frame from polyamide with discrete carbon fiber particles

**Funding:** the work was financed by the Russian Science Foundation grant No. 24-79-00203.

**For citation:** Kalyulin S.L., Cherepanov I.E., Modorsky V.Ya. An Optimization Approach to the UAV Frame Designing with Icing Protection. *Aerospace MAI Journal*. 2026;33(2):63–74. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=188037>

**List of Figures**

Fig. 1. The UAV design: 1 – bottom part; 2 – top part; 3 – Arms; 4 – threaded studs; 5 – mounting screws

Fig. 2. The UAV load-bearing structure internal part

Fig. 3. Variable beam design parameters

Fig. 4. Computational schemes of loading during optimization

Fig. 5. Results of frame optimization in the *IOSO PM*

Fig. 6. Pareto set of optimal solutions

Fig. 7. The optimal beam design sketch

Fig. 8. Mesh model of the aerodynamic region

Fig. 9. Air velocity distribution fields near the UAV frame

Fig. 10. Results of the UAV frame icing for the most probable conditions for the glacial-hoar frost deposits (frost) forming

Fig. 11. Results of the UAV frame icing for the most hazardous conditions for the glacial-hoar frost deposits (freezing rain) forming

**List of Tables**

Table 1. Parameter variation ranges

Table 2. Pareto set of optimal solutions

Table 3. Boundary conditions for the two icing modes

## Введение

Оптимизационный подход к проектированию конструкций БПЛА позволяет достигать наивыгоднейших массогабаритных и аэродинамических характеристик, при этом используются генетический и градиентный алгоритмы, нейронные сети, топологическая и параметрическая оптимизация [1–4].

Учеными из университета Крэнфилда [5] продемонстрировано применение нейронных сетей к междисциплинарному концептуальному проектированию БПЛА. Цель заключалась в улучшении процесса проектирования за счет использования искусственного интеллекта (ИИ) для оптимизации различных характеристик: аэродинамической эффективности, малозаметности и массы конструкции. С использованием многоцелевого генетического алгоритма оптимизации, интегрированного с моделями на основе ИИ, исследовано пространство изменения проектных параметров и определен набор оптимальных конфигураций БПЛА. Авторы отмечают, что применение ИИ в процессе проектирования БПЛА позволяет значительно сократить время вычислений и повысить гибкость при исследовании сложных многопараметрических систем.

В статье [6] рассматривается разработка и производство деталей для мультироторных БПЛА с использованием аддитивных технологий. Рассматриваются различные недорогие и эффективные методы соединения, используемые в 3D-печати. Отмечено, что применение композитных материалов для 3D-печати может обеспечить наилучшие механические характеристики.

Авторами из Египта [7] представлена методика проектирования, изготовления и испытаний БПЛА с электрическим двигателем, обеспечивающего взлет, крейсерский полет, безопасную посадку и необходимую полезную нагрузку. Методика включает в себя несколько этапов: проектирование, прочностной анализ, анализ аэродинамических характеристик, выбор материалов, изготовление и испытания летательного аппарата. В статье [8] представлен подход к проектированию и оптимизации БПЛА, работающего на солнечной энергии и адаптированного для сценариев городского наблюдения. В работе [9] проведен сравнительный прочностной анализ компоновок силовых рам мультироторных БПЛА с габаритными размерами в диапазоне от 12 до 24 дюймов: рассмотрено пять различных компоновочных схем, изготавливаемых на базе тканых и нетканых структур упрочняющих волокон на основе углеволокна, стекловолокна, кевлара, а также силовых рам из алюминия.

Повышение универсальности конструкции БПЛА позволяет расширить области и сценарии их применения [10]. Предлагаемая в настоящей статье конструкция БПЛА изготовлена с применением аддитивных технологий [11] из полимерного композиционного материала [12] — полиамида с дискретными частицами углеволокна. Такая технология изготовления рам мультироторного типа, в отличие от лазерной резки углепластиковых пластин, изготовленных по препреговой технологии, позволяет использовать ребра жесткости и защиту корпуса БПЛА от внешнего воздействия. Одновременно с этим, рама должна быть достаточно проста в сборке и технологична для серийного изготовления и конкурентоспособности на рынке.

Целью настоящей работы является разработка силовой конструкции БПЛА мультироторного типа из полимерных композиционных материалов, адаптированной для изготовления аддитивными технологиями, обладающей защитой от обледенения и спроектированной на базе оптимизационного подхода с имитацией эксплуатационных нагрузок.

## Объект исследования

Объектом исследования является разработанная в Центре высокопроизводительных вычислительных систем ПНИПУ силовая конструкция БПЛА размером 11 дюймов из полиамида PA CF30 [0x90] (с 30% содержанием дискретных частиц углеволокна) и повышенной защитой от внешних метеоусловий, в том числе от дождя, снега, ледяного дождя и ультрафиолета (рис. 1). Изготовление всех элементов рамы предполагается с применением аддитивных технологий.

Центральные элементы конструкции — верхняя 1 и нижняя 2 корпусные детали — являются связующими для других элементов рамы и базой для установки систем управления, электропитания,

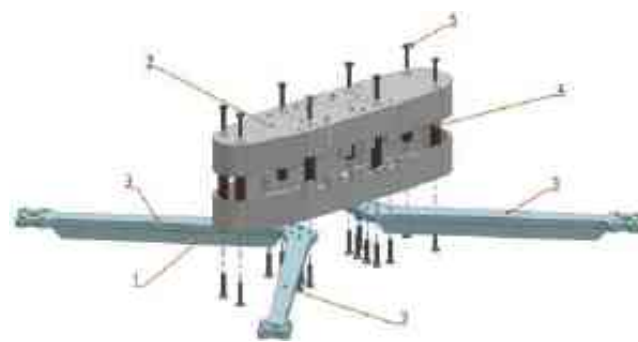


Рис. 1. Силовая конструкция БПЛА:  
1 — нижняя корпусная деталь;  
2 — верхняя корпусная деталь; 3 — лучи;  
4 — резбовые стойки; 5 — крепежные винты

винтомоторной группы, FPV-камеры и другой полезной нагрузки. Электродвигатели устанавливаются на лучи 3. Соединение элементов рамы осуществляется при помощи резьбовых стоек 4 и крепежных винтов 5. Конструкция рамы имеет усиленные ребрами жесткости лучи. Корпусные детали имеют закрытый усиленный контур по периметру (рис. 2).

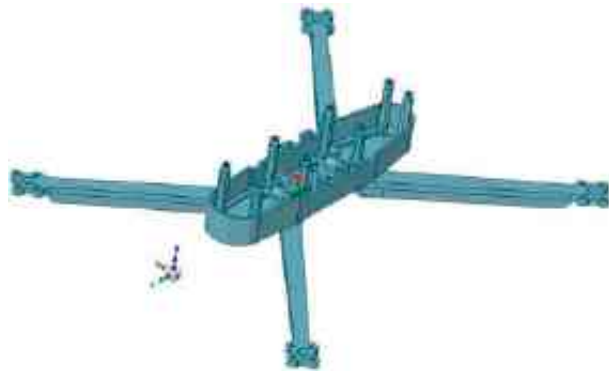


Рис. 2. Внутренняя часть силовой конструкции БПЛА

Физико-механические характеристики полиамида PA-CF30 [0x90]: модуль упругости  $E = 7,25$  ГПа; коэффициент Пуассона  $\nu = 0,14$ ; плотность  $\rho = 1010$  кг/м<sup>3</sup>; предел прочности на растяжение  $\sigma_b = 91$  МПа.

**Задача оптимизации силовой конструкции БПЛА**

Для решения многопараметрической многокритериальной задачи оптимизации использован отечественный программный продукт IOSO PM [13 14], основанный на поиске множества Парето оптимальных решений.

Множество Парето представляет собой множество альтернатив, обладающих следующим свойством: любая из альтернатив, входящих во множество Парето, хотя бы по одному критерию лучше любой другой альтернативы, входящей в это множество. Все альтернативы попарно сравниваются друг с другом по всем критериям. Если при сравнении каких-либо альтернатив оказывается, что одна из них не лучше другой ни по одному критерию, то она исключается из рассмотрения. Исключенную альтернативу не требуется сравнивать с другими альтернативами, так как она явно неперспективна [15].

В качестве оптимизируемого элемента рамы БПЛА выбран луч, предназначенный для крепления винтомоторной группы к корпусу. В отличие от корпуса, геометрические параметры которого в основном определяются необходимостью крепления системы управления, аккумулятора и иной полез-

ной нагрузкой, силовой луч в процессе эксплуатации испытывает наибольшие силовые нагрузки. В первую очередь это изгибные усилия, возникающие в результате создания тяги воздушными винтами. С другой стороны, в случае столкновения БПЛА с преградой и/или падения, луч воспринимает основную динамическую нагрузку, и от его надежности зависит сохранность переносимой полезной нагрузки. Кроме этого, жесткость конструкции луча значительным образом сказывается на управляемости БПЛА, в том числе влияет на энергоэффективность. При недостаточной жесткости в конструкции возникают низкочастотные колебания, создающие помехи в системе управления, которая будет пытаться их скомпенсировать изменением тяги воздушных винтов, что приведет к дополнительным затратам энергопотребления.

В качестве варьируемых параметров при решении оптимизационной задачи рассматривались (рис. 3):

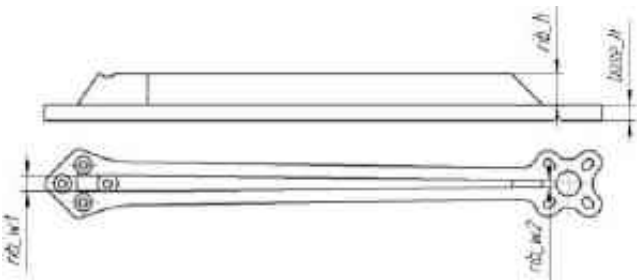


Рис. 3. Варьируемые параметры конструкции луча

- толщина основания луча  $base\_h$ ;
- высота ребра жесткости луча  $rib\_h$ ;
- толщина ребра жесткости луча вблизи места крепления к корпусу БПЛА  $rib\_w1$ ;
- толщина ребра жесткости луча вблизи места установки электродвигателя  $rib\_w2$ .

Диапазоны варьирования параметров в процессе оптимизации представлены в табл. 1.

Таблица 1. Диапазоны варьирования параметров

| Параметр | Диапазон изменения параметра [мм] |
|----------|-----------------------------------|
| base_h   | 2 ... 10                          |
| rib_h    | 5 ... 15                          |
| rib_w1   | 2 ... 8                           |
| rib_w2   | 2 ... 8                           |

При проведении оптимизации рамы БПЛА и определения напряженно-деформированного состояния конструкции одновременно рассматривались два расчетных случая, имитирующих эксплуатационные нагрузки – изгиб рамы БПЛА в продольной и поперечной плоскостях (рис. 4):

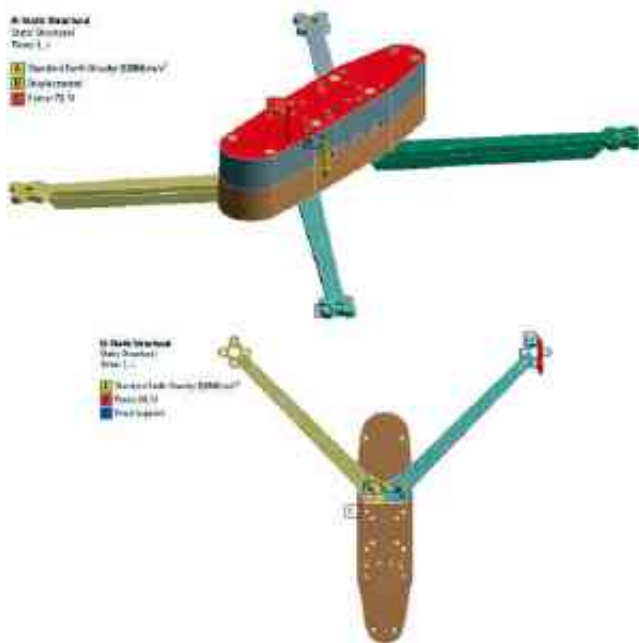


Рис. 4. Расчетные схемы нагружения при оптимизации

*Расчетная схема нагружения 1:* закрепление в виде свободного опирания по нижней границе площадок четырех лучей в местах установки электродвигателей. На верхнюю корпусную деталь задавалась распределенная нагрузка 70 Н (имитация груза массой 7 кг), направленная перпендикулярно вниз. На все элементы конструкции задается сила тяжести.

*Расчетная схема нагружения 2:* жесткое закрепление центральной части поверхности нижней корпусной детали в местах крепления полетного контроллера (четыре внутренних отверстия). К верхней площадке луча задается динамически возрастающая нагрузка в направлении, противоположном направлению полета, равная 20 Н. Таким образом, относительно оси луча нагрузка направлена под углом 45°. На все элементы конструкции задается сила тяжести. Данный тип нагружения моделирует ударное взаимодействие с преградой.

В качестве трех целевых функций (критериев оптимизации) выбраны:

- 1) масса луча  $m$  (нахождение минимума функции);
- 2) величина изгиба в поперечной плоскости рамы БПЛА для расчетной схемы 1  $\Delta_1$  (нахождение минимума функции);
- 3) величина изгиба в продольной плоскости рамы БПЛА для расчетной схемы 2  $\Delta_2$  (нахождение минимума функции).

В качестве ограничений оптимизационного алгоритма выбрана величина эквивалентных напряжений по Мизесу (1), (2), возникающих в конструкции луча в результате изгиба для двух случаев нагружения:

$$\sigma_{\max 1} \leq \frac{[\sigma_B]}{k_1 k_2}; \quad (1)$$

$$\sigma_{\max 2} \leq \frac{[\sigma_B]}{k_1 k_2}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{\max 1}$  — эквивалентные напряжения по Мизесу при изгибе в продольной плоскости;  $\sigma_{\max 2}$  — эквивалентные напряжения по Мизесу при изгибе в поперечной плоскости;  $[\sigma_B]$  — предел прочности материала РА CF30 [0x90], равный 91 МПа;  $k_1 = 1, 2$  — коэффициент запаса прочности;  $k_2 = 1,5$  — коэффициент динамичности.

Всего проведено 240 итераций оптимизационного алгоритма для различных конструктивных вариантов лучей в составе рамы БПЛА, в каждой из которой рассчитывалось напряженно-деформированное состояние для двух схем нагружения силовой рамы, определялись масса, максимальные перемещения и максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу.

В качестве аппаратного обеспечения для численного моделирования использовались ресурсы Центра высокопроизводительных вычислительных систем ПНИПУ.

Общий вид программной реализации задачи в комплексе IOSO PM и распределение итераций алгоритма в зависимости от критериев оптимизации представлены на рис. 5.

На рис. 6 и в табл. 2 представлено множество Парето оптимальных решений для геометрических параметров рамы БПЛА.

Оптимальным вариантом конструкции луча БВС принят расчетный случай № 141 как наиболее удовлетворяющий всем критериям оптимизации и соответствующий установленным ограничениям.

По результатам оптимизации масса конструкции луча снижена на 18%, прогиб при нагружении в продольной плоскости БПЛА уменьшился в два раза, прогиб при нагружении в поперечной плоскости уменьшился в 1,4 раза. Эскиз оптимальной конструкции луча показан на рис. 7.

### Расчет обледенения рамы БПЛА

На следующем этапе оптимальная с точки зрения минимизации массы и прогиба рама, удовлетворяющая условиям прочности, рассчитана на обледенение.

В диссертационной работе Леонова И.И. [16] и работе [17] приводятся основные благоприятные условия для образования гололедно-изморозевых отложений (ГИО): удельная и относительная влажность воздуха, температура воздуха, скорость и направление ветра, а также размер капель в облаках.

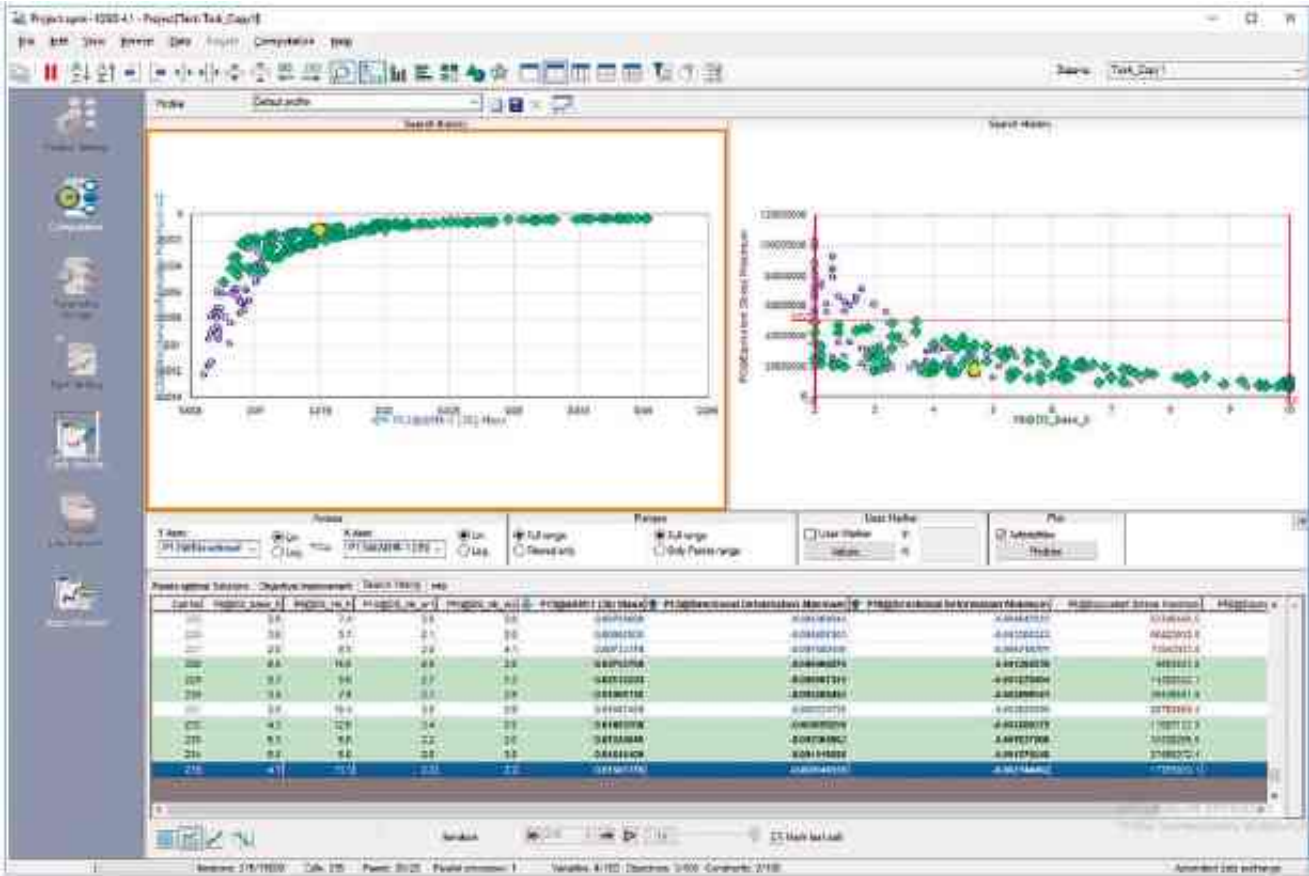


Рис. 5. Результаты оптимизации рамы в IESO PM

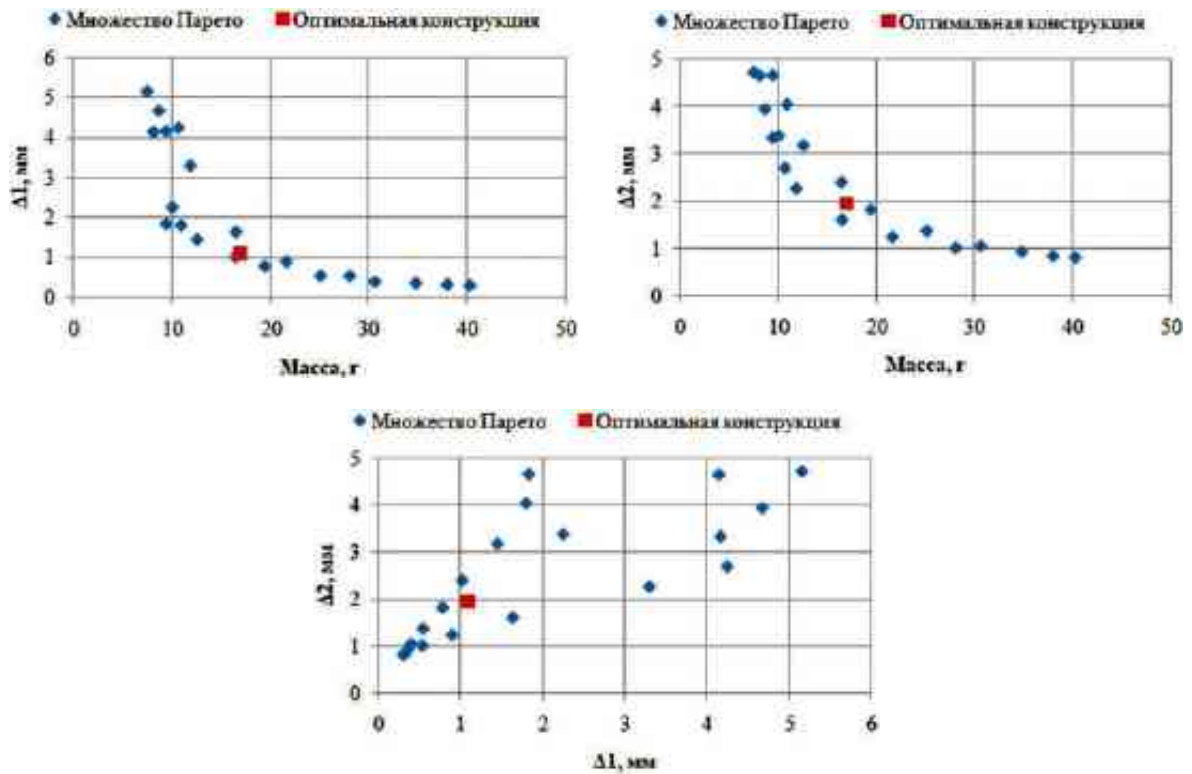


Рис. 6. Множество Парето оптимальных решений

Таблица 2. Множество Парето оптимальных решений

| №   | base_h, мм | rib_h, мм | rib_w1, мм | rib_w2, мм | m, г | $\Delta_1$ , мм | $\Delta_2$ , мм | $\sigma_{\max 1}$ , МПа | $\sigma_{\max 2}$ , МПа |
|-----|------------|-----------|------------|------------|------|-----------------|-----------------|-------------------------|-------------------------|
| 12  | 9,9        | 5,0       | 6,7        | 7,4        | 28,1 | 0,53            | 1,01            | 9,48                    | 7,77                    |
| 34  | 10,0       | 14,2      | 2,6        | 5,3        | 30,6 | 0,39            | 1,05            | 9,04                    | 9,21                    |
| 47  | 9,5        | 12,3      | 7,4        | 7,0        | 34,8 | 0,36            | 0,93            | 7,12                    | 8,09                    |
| 61  | 7,2        | 14,0      | 4,0        | 4,6        | 25,1 | 0,54            | 1,37            | 10,03                   | 12,05                   |
| 76  | 3,9        | 14,6      | 3,6        | 3,6        | 16,5 | 1,01            | 2,40            | 15,63                   | 20,36                   |
| 87  | 4,5        | 5,0       | 2,0        | 2,0        | 11,9 | 3,30            | 2,26            | 39,09                   | 17,44                   |
| 95  | 2,9        | 6,6       | 3,3        | 2,3        | 9,4  | 4,16            | 3,33            | 45,62                   | 26,95                   |
| 96  | 2,3        | 15,0      | 2,0        | 3,6        | 10,9 | 1,80            | 4,03            | 20,36                   | 31,89                   |
| 98  | 2,0        | 7,8       | 3,0        | 2,0        | 7,5  | 5,16            | 4,71            | 49,53                   | 40,14                   |
| 99  | 2,9        | 11,8      | 2,0        | 2,0        | 10,1 | 2,25            | 3,38            | 26,42                   | 25,81                   |
| 125 | 6,5        | 5,0       | 2,0        | 2,0        | 16,5 | 1,63            | 1,61            | 22,57                   | 13,62                   |
| 141 | 5,0        | 10,0      | 5,0        | 2,0        | 17,0 | 1,09            | 1,93            | 17,51                   | 14,79                   |
| 129 | 5,3        | 13,4      | 4,5        | 2,7        | 19,4 | 0,78            | 1,82            | 12,05                   | 14,50                   |
| 141 | 10,0       | 15,0      | 8,0        | 8,0        | 40,3 | 0,30            | 0,82            | 6,33                    | 7,17                    |
| 162 | 2,4        | 7,2       | 3,1        | 2,9        | 8,7  | 4,67            | 3,94            | 47,38                   | 33,61                   |
| 169 | 3,7        | 5,0       | 2,2        | 3,9        | 10,7 | 4,25            | 2,69            | 49,67                   | 19,22                   |
| 172 | 10,0       | 12,9      | 8,0        | 8,0        | 38,0 | 0,32            | 0,84            | 6,47                    | 7,87                    |
| 181 | 8,6        | 5,0       | 2,0        | 2,8        | 21,6 | 0,89            | 1,24            | 13,50                   | 9,89                    |
| 198 | 2,0        | 8,8       | 3,0        | 2,5        | 8,1  | 4,15            | 4,64            | 42,72                   | 39,43                   |
| 200 | 2,0        | 15,0      | 2,5        | 2,0        | 9,4  | 1,83            | 4,65            | 22,14                   | 37,93                   |
| 202 | 3,0        | 14,9      | 2,2        | 3,4        | 12,6 | 1,44            | 3,17            | 18,08                   | 24,40                   |

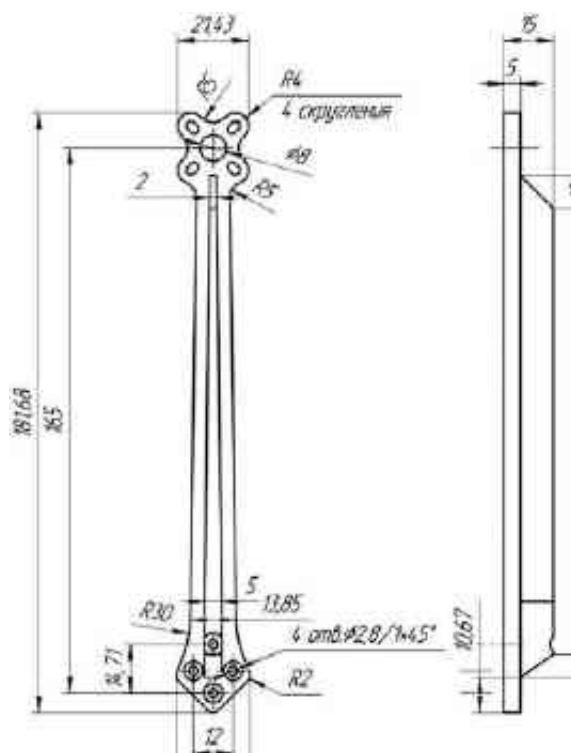


Рис. 7. Эскиз оптимальной конструкции луча

Наиболее активно процесс обледенения происходит в диапазоне понижения температуры от 0 до  $-5^{\circ}\text{C}$ . Этот диапазон является переходным, при котором происходит интенсивное обледенение. При условиях ледяного дождя температура воздуха при обледенении поверхностей может опускаться до  $-10^{\circ}\text{C}$ , а иногда до  $-15^{\circ}\text{C}$ . Одновременно следует заметить, что диапазон температур обледенения может расширяться и при увеличении скорости ветра. В нормальном узком диапазоне от 0 до  $-10^{\circ}\text{C}$  обледенение наступает достаточно стабильно при 75–77 % влажности воздуха.

Наиболее вероятные условия для ГИО (изморозь):

- среднемедианный диаметр капель в условиях облачности составляет 20 мкм согласно требованиям Авиационных правил. Часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории (утв. Постановлением 28-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства от 11.12.2008 г.) для значений среднемедианного диаметра капель в условиях облачности [18];

- водность воздуха  $\text{LWC} = 0,1 \dots 0,5 \text{ г/м}^3$ .

В качестве усугубляющих факторов можно рассматривать дождь или ледяной дождь. Согласно публикации разработчиков отечественного программного комплекса по обледенению [19] имеются исходные данные для стояночного обледенения самолета в условиях ледяного дождя: водность воздуха  $\text{LWC} = 1 \dots 5 \text{ г/м}^3$ , среднемедианный диаметр капель  $D = 526 \text{ мкм}$ .

В табл. 3 представлены граничные условия для двух режимов обледенения рамы БВС: наиболее вероятные условия для образования ГИО (изморозь) и наиболее опасные условия (ледяной дождь).

Математическая модель, применяемая при расчете процесса обледенения оптимальной конструкции силовой рамы БПЛА с защитой от внешних метеоусловий, в том числе от дождя, снега, ледяного дождя и ультрафиолета, представлена в диссертации [20].

Сеточная модель рассматриваемой аэродинамической области для моделирования обледенения состоит из 7,4 млн конечных элементов и представлена на рис. 8.

На рис. 9 представлены поля распределения скорости воздуха вблизи рамы БПЛА при  $T = -10^{\circ}\text{C}$ ,

$V = 30 \text{ м/с}$ ,  $p = 1 \text{ атм.}$ ,  $\alpha = 0^{\circ}$ . За счет аэродинамической формы корпуса рамы в аэродинамическом следе за корпусом отсутствуют крупные отрывные вихри.

На рис. 10 представлены результаты обледенения рамы БПЛА для наиболее вероятных условий для образования ГИО (изморозь):  $T = -10^{\circ}\text{C}$ ,  $V = 30 \text{ м/с}$ ,  $p = 1 \text{ атм.}$ ,  $\alpha = 0^{\circ}$ ,  $\text{LWC} = 0,5 \text{ г/м}^3$ ,  $D = 20 \text{ мкм}$ ,  $t = 10 \text{ мин}$ .

На рис. 11 представлены результаты обледенения рамы БПЛА для наиболее опасных условий для образования ГИО (ледяной дождь):  $T = -10^{\circ}\text{C}$ ,  $V = 30 \text{ м/с}$ ,  $p = 1 \text{ атм.}$ ,  $\alpha = 0^{\circ}$ ,  $\text{LWC} = 5,0 \text{ г/м}^3$ ,  $D = 526 \text{ мкм}$ ,  $t = 10 \text{ мин}$ .

Суммарная масса льда за 10 минут намерзания для наиболее вероятных условий для образования ГИО (изморозь) составила 14,4 г при собственной массе рамы 150 г. Соответственно за 1 час полета в условиях обледенения масса льда составит 86,4 г.

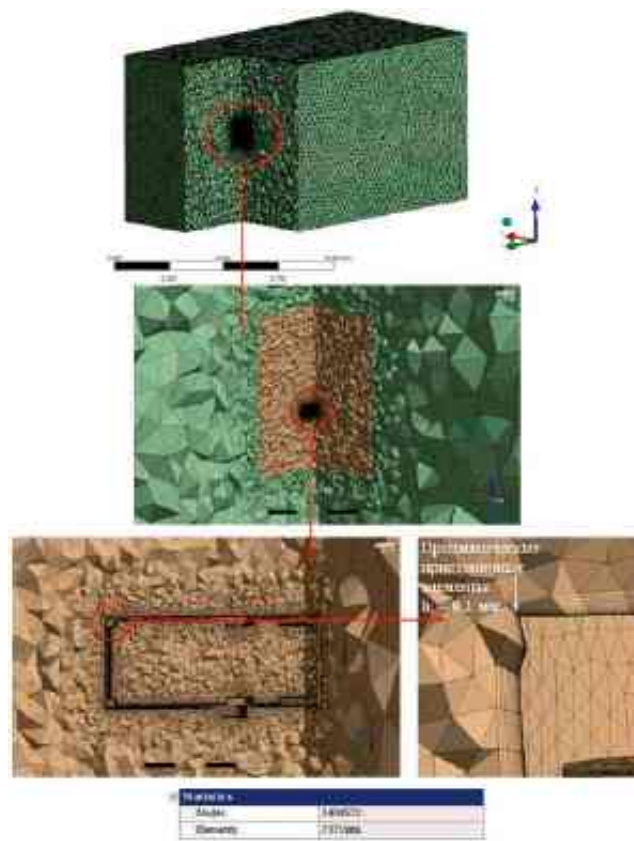


Рис. 8. Сеточная модель аэродинамической области

Таблица 3. Граничные условия для двух режимов обледенения

| Условия обледенения | Водность потока $\text{LWC}$ , $\text{г/м}^3$ | Среднемедианный диаметр капель $D$ , $\text{мкм}$ | Время обледенения $t$ , мин | Скорость набегающего потока $V$ , $\text{м/с}$ | Статическое давление $p$ , Па | Угол атаки $\alpha$ , $^{\circ}$ |
|---------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|
| Изморозь            | 0,5                                           | 20                                                | 10                          | 30                                             | 101325                        | 0                                |
| Ледяной дождь       | 5,0                                           | 526                                               |                             |                                                |                               |                                  |

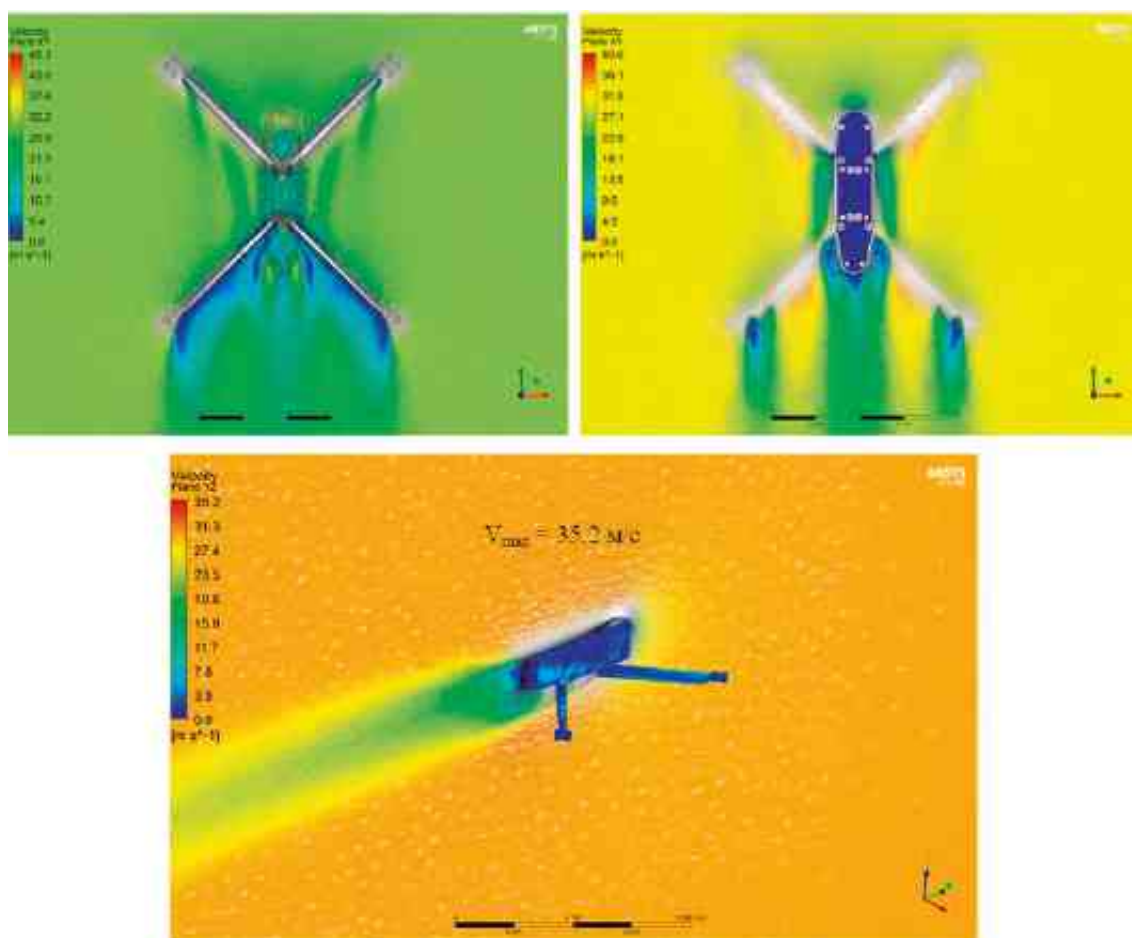


Рис. 9. Поля распределения скорости воздуха вблизи рамы БПЛА



Рис. 10. Результаты обледенения рамы БПЛА для наиболее вероятных условий для образования ГИО

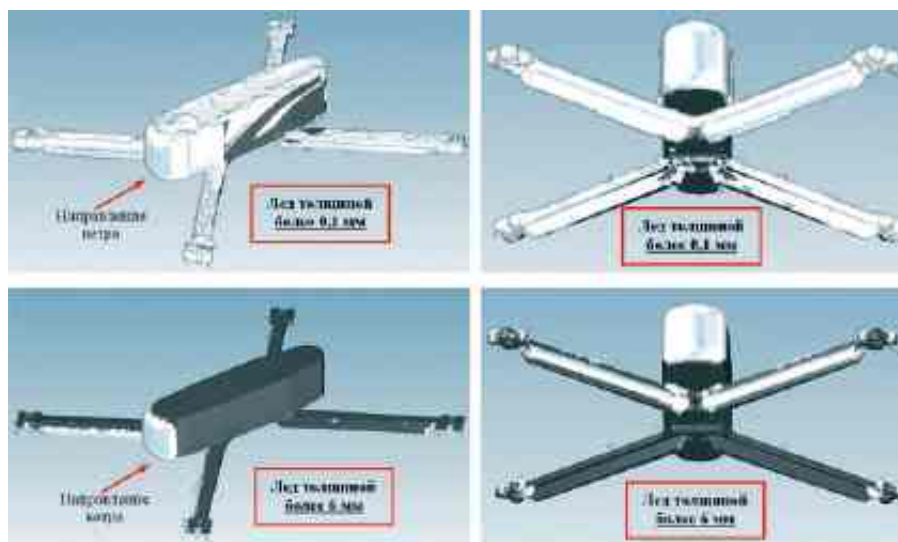


Рис. 11. Результаты обледенения рамы БПЛА для наиболее опасных условий для образования ГИО (ледяной дождь)

Наледь толщиной более 1 мм образуется на ребрах лучей рамы, переднем обтекателе кожуха основания, площадках под электродвигатели, внешних ребрах верхнего основания.

Суммарная масса льда за 10 минут намерзания для наиболее опасных условий для образования ГИО (ледяной дождь) составила 97,3 г при собственной массе рамы 150 г. Наледь толщиной более 3 мм образуется на лучах рамы и на переднем обтекателе кожуха основания, при этом обледенения внутренних зон рамы не происходит.

## Выводы

Разработана силовая конструкция БПЛА мультироторного типа из полиамида PA CF30 [0x90], адаптированная для изготовления аддитивными технологиями без необходимости удаления поддержек. Тридцатипроцентное содержание дисперсных частиц углеволокна обеспечивает предел прочности материала на растяжение  $\sigma_b = 91$  МПа, модуль упругости  $E = 7,25$  ГПа. Конструкция рамы имеет усиленные ребрами жесткости лучи. Корпусные детали имеют закрытый усиленный контур по периметру, защищающий от внешних метеоусловий, в том числе от дождя, снега, ледяного дождя и ультрафиолета.

Применение оптимизационного подхода на базе отечественного программного комплекса много-

критериальной многопараметрической оптимизации IOSO PM позволило провести 480 расчетов напряженно-деформированного состояния с имитацией эксплуатационных нагрузок для различных геометрических параметров силовой конструкции рамы БПЛА. По результатам оптимизации масса конструкции луча снижена на 18%, прогиб при нагружении в продольной плоскости БПЛА уменьшился в два раза, прогиб при нагружении в поперечной плоскости уменьшился в 1,4 раза.

Проведено численное моделирование обледенения, оптимальное с точки зрения массоэнергетических характеристик, конструкции силовой рамы для двух режимов: изморозь и ледяной дождь. Выявлено, что обледенение внутренних зон рамы, где располагаются элементы микроэлектроники, не происходит. Наиболее подвержен образованию льда передний обтекатель кожуха основания. При этом форма наледи эквидистантна форме обтекателя, что несущественным образом влияет на снижение аэродинамического качества силовой конструкции.

Применение аддитивных технологий при изготовлении силовой рамы БПЛА позволяет интегрировать в конструкцию противообледенительную систему в процессе печати для снижения образования ледяных наростов при эксплуатации в зимних условиях.

## Конфликт интересов / Conflict of Interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no relevant conflict of interests

## Список источников / References

1. Абдуллин И.Н., Чэнь Ф., Тарантаева А.Р. Оптимизация облегченной конструкции композитного крыла беспилотного летательного аппарата на основе алгоритма роя частиц // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 3. С. 29–38. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=185664>

- Abdullin IN, Chen F, Tarantaeva AR. Optimization of the Unmanned Aerial Vehicle Composite Wing Lightweight Design Based on the Particle Swarm Algorithm. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(3):29-38. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/eng/publications.php?ID=185664>
2. Чэнь Л., Стрелец Д.Ю. Исследование применения суррогатной модели в задаче геометрической оптимизации крыла с учетом флаттера // Вестник Московского авиационного института. 2025. Т. 32. № 1. С. 102-111. URL: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=184453>
- Chen L, Strelets DY. Studying Surrogate Model Application in the Problem of the Wing Geometrical Optimization Problem Considering Flutter. *Aerospace MAI Journal*. 2025;32(1):102-111. (In Russ.). URL: <https://vestnikmai.ru/eng/publications.php?ID=184453>
3. Лысенков А.В., Ореховский В.В., Кажан Е.В. и др. Методика расчета аэродинамических характеристик и оптимизация профилей для воздушных винтов с использованием численных методов, основанных на решении уравнений Рейнольдса // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 3. С. 23-33.
- Lysenkov AV, Orekhovskii VV, Kazhan EV, et al. A Technique for Aerodynamic Characteristics Computing and Profile Optimization for Air Propellers by Numerical Methods Based on Solving Reynolds Equations. *Aerospace MAI Journal*. 2024;31(3):23-33. (In Russ.).
4. Пхио А., Семенов В.Н., Федулов Б.Н. Оптимизация трансформируемых конструкций летательных аппаратов // Вестник Московского авиационного института. 2024. Т. 31. № 1. С. 32-40.
- Phyo A, Semenov VN, Fedulov BN. Optimization of transformable aircraft structures. *Aerospace MAI Journal*. 2024;31(1):32-40. (In Russ.).
5. Karali H, Inalhan G, Tsourdos A. Advanced UAV Design Optimization Through Deep Learning-Based Surrogate Models. *Aerospace*. 2024;11(8):669. DOI: 10.3390/aerospace11080669
6. Krznar N, Piljek P, Keran Z. Multirotor UAV Design and Development – Case Study. *Tehnički glasnik*. 2023;17(4):588-593. DOI: 10.31803/tg-20220909092242
7. El Adawy M, Abdelhalim EH, Mahmoud M, et al. Design and fabrication of a fixed-wing Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Ain Shams Engineering Journal*. 2023;14(9):102094. DOI: 10.1016/j.asej.2022.102094
8. Khaneghaei M, Asadi D, Ebrahimi B, et al. A unified and experimentally validated design framework for long-endurance solar UAVs using model-based multi-objective multidisciplinary optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2026;69(1):3. DOI: 10.1007/s00158-025-04194-6
9. Kumar VA, Sivaguru M, Rohini Janaki B, et al. Structural optimization of frame of the multi-rotor unmanned aerial vehicle through computational structural analysis. *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1849, 2nd National Conference on Recent Advancement in Physical Sciences (NCRAPS; December 19-20, 2020, Uttarakhand, India): 012004. DOI: 10.1088/1742-6596/1849/1/012004
10. Lu S, Rodriguez A, Tsakalis K, et al. Design and Characteristics of a New Transformable UAV with both Coplanar and Omnidirectional Features. *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS; June 21-24, 2022; Dubrovnik, Croatia)*. p. 831-838. DOI: 10.1109/ICUAS54217.2022.9836144
11. Parandha SM, Li Z. Design and Analysis of 3d Printed Quadrotor Frame. *International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology*. 2018;5(4):66-73. DOI: 10.17148/IARJSET
12. Путилина П.М., Куцевич К.Е., Исаев А.Ю. Полимерные композиционные материалы на основе углеродных и стеклянных волокон для изготовления деталей беспилотных летательных аппаратов и перспективы их развития // Труды ВИАМ. 2023. № 8(126). С. 85-99. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-8-85-99
- Putilina PM, Kutsevich KE, Isaev AY. Carbon fiber-reinforced and glass fiber-reinforced polymer composites for the manufacture of components for unmanned aerial vehicles and their developing prospects. *Trudy VIAM*. 2023(8):85-99. (In Russ.).
13. Zubanov V, Volkov A, Matveev V, et al. Optimization of fuel two-stage screw centrifugal pump of rocket powerful turbopump unit. *ASME Turbo Expo: Turbomachinery Technical Conference and Exposition (June 11-15, 2018; Oslo, Norway)*. GT2018-76400. DOI: 10.1115/GT2018-76400
14. Жуматий С.А., Соболев С.И., Стефанов К.С. Решение оптимизационных гидродинамических задач в распределенной среде на основе вычислительных ресурсов МГУ // Вычислительные методы и программирование. 2010. Т. 11. № 3. С. 66-68.
- Zhumatiy SA, Sobolev SI, Stefanov KS. Solving of optimization hydrodynamic problems using the distributed computing resources of Moscow University. *Numerical Methods and Programming*. 2010;11(3):66-68. (In Russ.).
15. Marchukov EYu, Egorov IN. Gas Dynamic Modernization of Axial Uncooled Turbine by Means of CFD and Optimization Software. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;302(1):012027. DOI: 10.1088/1757-899X/302/1/012027
16. Леонов И.И. Структура атмосферы при формировании высокоинтенсивных гололедно-изморозевых отложений: Дисс. ... канд. техн. наук. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2023. 121 с.
- Leonov II. *The structure of the atmosphere during the formation of high-intensity icy-frost deposits*. PhD thesis. Moscow: Lomonosov Moscow State University; 2023. 121 p. (In Russ.).
17. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. М.: Изд-во МГУ, 1986. 327 с.

- Hrgian AH. *Physics of the atmosphere*. Moscow: Moscow State University; 1986. 327 p. (In Russ.).
18. Нормы летной годности самолетов транспортной категории НЛГ 25 (Часть 25). М.: Федеральное Агентство воздушного транспорта, 2022. 355 с.  
*Standards of airworthiness of NLG 25 transport category aircraft*. Moscow: Federal'noe Agentstvo vozdushnogo transporta; 2022. 355 p. (In Russ.).
19. Сорокин К.Э., Аксенов А.А., Жлуктов С.В. и др. Методика расчета обледенения воздушных судов в широком диапазоне климатических и скоростных параметров. Применение в рамках норм летной годности НЛГ-25 // Компьютерные исследования и моделирование. 2023. Т. 15. № 4. С. 957-978. DOI: 10.20537/2076-7633-2023-15-4-957-978  
Sorokin KE, Aksenov AA, Zhluktov SV, et al. Methodology of aircraft icing calculation in a wide range of climate and speed parameters. Applicability within the NLG-25 airworthiness standards. *Computer Research and Modeling*. 2023;15(4):957-978. (In Russ.).
20. Калюлин С.Л. Расчетно-экспериментальное моделирование процессов обледенения элементов авиационных двигателей при вибрациях: Дисс. ... канд. техн. наук. Пермь: ПНИПУ, 2023. 121 с.  
Kalyulin SL. *Computational and experimental modeling of the processes of icing of aircraft engine elements during vibrations*. PhD thesis. Perm: PNRPU; 2023. 121 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию / Received 12.03.2026  
Одобрена после рецензирования / Revised 20.03.2026  
Принята к публикации / Accepted 25.03.2026