

На правах рукописи



Кисин Иван Дмитриевич

**МЕТОДИКА ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО УРОВНЯ ИНТЕГРАЛЬНОСТИ  
КОНСТРУКЦИИ АГРЕГАТОВ ПЛАНЕРА ВЕРТОЛЕТА  
ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 2.5.13.

«Проектирование, конструкция, производство, испытания и эксплуатация  
летательных аппаратов»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2025

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

**Научный руководитель:** **Завалов Олег Анатольевич,**  
кандидат технических наук, доцент.

**Официальные оппоненты:** **Халиулин Валентин Илдарович,**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой производства летательных аппаратов, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ» (КНИТУ-КАИ), г. Казань.

**Ефимов Вадим Викторович,**  
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры аэродинамики, конструкции и прочности летательных аппаратов, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА), г. Москва.

**Ведущая организация:** Акционерное общество «АэроКомпозит», г. Москва.

Защита состоится «25» декабря 2025 года в 14:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.09, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», по адресу: 125993, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МАИ и на сайте МАИ по ссылке: [https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT\\_ID=186248](https://mai.ru/events/defence/?ELEMENT_ID=186248)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 24.2.327.09

кандидат технических наук



Д.Ю. Стрелец

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования** определена возрастающим применением в вертолетостроении интегральных конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ) нового поколения, при этом отсутствием у разработчиков инструмента для выбора уровня интегральности и определения рациональных параметров подобных конструкций на ранних стадиях их проектирования.

В настоящее время для проектирования агрегатов планера вертолета из ПКМ, в распоряжении разработчиков в основном имеются оценки только качественного характера.

Такое положение дел можно объяснить недостаточной изученностью конструкций интегрального типа с применением ПКМ нового поколения и отсутствием методик количественной оценки уровня интегральности.

В настоящем исследовании в качестве основного параметра, определяющего уровень интегральности агрегата вертолета из ПКМ, предлагается использовать количество его составных частей. Чем меньше количество частей в агрегате, тем большей степенью интегральности они обладают как в отдельности, так и конструкция агрегата в целом.

При этом решается задача, на какое количество частей (основных деталей) следует разделить агрегат из ПКМ, чтобы его конструкция обладала наилучшими показателями совершенства по заданным критериям.

Для ее решения разработана методика определения рационального уровня интегральности на основе метода сравнения показателей совершенства проектируемого изделия с аналогом на примере конструкции кабины пилотов вертолета. Базовые показатели, спроектированной кабины пилотов из ПКМ сравнены с базовыми показателями аналога из металлических сплавов.

**Степень разработанности темы исследования** заключается в исследованиях в области применения и проектирования интегральных конструкций из полимерных композиционных материалов в летательных аппаратах, а также разработке интегральных конструкций под целевую задачу, и отображается в работах ряда отечественных авторов, таких как: М.Н. Тищенко, А.В. Некрасов, А.С. Радин, О.А. Завалов, С.В. Михеев, Е.А. Башаров, А.Ю. Вагин, В.И. Халиуллин, И.М. Колганов, П.В. Дубровский, А.Н. Архипов, А.Г. Братухин, Гудимов М.М., Гуняев Г.М., И.М. Буланов, В.В. Воробей, Бондалетов В.Г., Юрьев В.Л., Ершова И.В., Колганов И.М., Агамиров Л.В., Вестяк В.А., Орлов А.И., Соловьёв Д.С., Немировский Ю.В., Янковский А.П.

Проведенный анализ публикаций, о методиках проектирования агрегатов летательных аппаратов из композиционных материалов, и ПКМ, в частности, позволяет выделить основной принцип разработанных методик проектирования —

проектирование под целевую задачу, выделенную перед конструктором в качестве приоритета.

При анализе публикаций, особое внимание уделено поиску примеров решения задач, связанных с разработкой и использованием алгоритмов количественной оценки уровня интегральности конструкций из ПКМ, и анализу взаимосвязи с их характеристиками.

Разрозненная и весьма ограниченная информация по обозначенным вопросам свидетельствует о сложности и актуальности их решения в рамках данного диссертационного исследования.

**Целью исследования** является разработка методики выбора рационального уровня интегральности конструкции агрегата планера вертолета из ПКМ и определения на ее основе наилучшего конструктивного решения с целью снижения массы.

**Задачи исследования**, решение которых необходимо для достижения поставленных целей:

1. Провести анализ практик проектирования интегральных конструкций из ПКМ и оценки уровня интегральности конструкции в агрегатах планера вертолетов;
2. Разработать математическую модель количественной оценки уровня интегральности конструкции из ПКМ и выбора рационального конструктивного решения;
3. Провести параметрическое исследование определения рационального уровня интегральности конструкции агрегата планера вертолета из ПКМ;
4. Провести оценку эффективности внедрения разработанной методики.

**Объектом исследования** является интегральная конструкция агрегата планера вертолета из ПКМ на примере каркаса фонаря кабины пилотов проектируемого вертолета Ми-171А3.

**Предметом исследования** диссертационной работы является методика количественного определения значений рационального уровня интегральности конструкций агрегатов планера из ПКМ и выбор соответствующих этому уровню параметров разрабатываемой конструкции.

**Научная новизна** исследования заключается во впервые разработанной методике выбора рационального уровня интегральности конструкции агрегатов планера вертолета из ПКМ как решение многопараметрической задачи с учетом особенностей разрабатываемой конструкции, а именно:

- в системном подходе к проектированию конструкции агрегата планера вертолета интегрального типа из ПКМ;
- в разработке математической модели количественной оценки уровня интегральности конструкции агрегата планера вертолета из ПКМ через

комплексный критерий совершенства на примере каркаса фонаря кабины пилотов вертолета Ми-171А3;

— в разработке алгоритма выбора рационального конструктивного решения.

**Теоретическая значимость работы** заключается в разработке методики выбора рационального уровня интегральности конструкций из ПКМ и определении ее параметров для выбора наилучшего конструктивного решения при проектировании агрегатов планера вертолета на ранних этапах разработки.

**Практическая значимость работы** заключается в валидации методики при выборе рационального конструктивного решения во время разработки интегральной конструкции каркаса фонаря кабины пилотов из ПКМ вертолета Ми-171А3 на базе АО «Национальный центр вертолетостроения им. М.Л. Миля и Н.И. Камова».

**Методология и методы исследования** базируются на научных трудах отечественных и зарубежных ученых в области проектирования конструкций летательных аппаратов из полимерных композиционных материалов, методе нормализации показателей, методе весовых коэффициентов, методе вариации произвольных постоянных, методе сравнительного анализа, методе системного анализа, классификационном методе, а также практический опыт работы в опытно конструкторском бюро. Информационные источники научного исследования:

- научные источники в виде данных и сведений из книг, журнальных статей, научных докладов, материалов научно-технических конференций;
- официальные документы: положения, ГОСТ, СТО и ПИ;
- результаты собственных разработанных конструкций и расчетов.

**Положения, выносимые на защиту** диссертационной работе, состоят из:

1. Методики определения рационального уровня интегральности конструкции из ПКМ;
2. Параметрического исследования определения рационального уровня интегральности конструкции на примере каркаса фонаря кабины пилотов вертолета Ми-171А3;
3. Выбор параметров проектируемой конструкции из ПКМ на основе разработанной методики.

**Степень достоверности полученных результатов** в диссертационной работе обеспечивается:

- валидацией методики при проектировании агрегатов планера вертолета в АО «НЦВ Миль и Камов»;
- решением задачи по проектированию конструкции носовой части опытного вертолета Ми-171А3, а именно каркаса фонаря кабины пилотов из ПКМ;

— проектировочными решениями, с использованием коммерческого программного комплекса автоматизации проектно-конструкторских работ, валидацией аналитических и численных результатов.

**Апробация результатов исследования** обеспечивается основными положениями и результатами по материалам диссертационного исследования отраженными в патенте, под названием «Обтекатель носовой авиационный RU215413U1» и затрагиваются в 2-х печатных трудах из Перечня ВАК Минобрнауки России, а также в докладах на 4-х международных и всероссийских научных конференциях, указанных в Таблице 1.

Таблица 1 – Доклады на международных и российских конференциях

| Год  | Название конференции   |
|------|--|
| 2023 | «Международный конгресс по аэронавтике 2023», ФАУ «ЦАГИ», г. Москва, 4-5 декабря 2023 г.                                 |
|      | Конференция «Современные технические решения для испытаний вертолетной техники», ГК «МЕРА», г. Мытищи, 16 ноября 2023 г. |
| 2021 | 47-я Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения - 2021», МАИ, г. Москва, 20-23 апреля 2021 г.      |
| 2020 | 46-я Международная молодёжная научная конференция «Гагаринские чтения - 2020», МАИ, г. Москва, 14-17 апреля 2020 г.      |

**Личный вклад соискателя** в диссертационное исследование заключается в разработке математического аппарата, алгоритмов для расчета и выбора рационального уровня интегральности и параметров конструкции агрегатов планера вертолета из ПКМ.

Результаты, полученные при непосредственном участии соискателя, заключается в проектировании конструктивных решений конструкции каркаса фонаря кабины пилотов из ПКМ вертолета Ми-171А3.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и приложений с актом внедрения результатов исследования. Общий объем диссертации составляет 121 страницу, работа содержит 62 рисунка, 16 таблиц. Список публикаций соискателя и использованных источников включает 63 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы и приведен обзор литературы по изучаемой проблеме, сформулирована цель, описаны задачи, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы.

**В первой главе** проводится анализ практик проектирования агрегатов планера вертолета из ПКМ и ставится задача выбора методики количественной оценки уровня интегральности конструкции. Анализ практики проектирования интегральных конструкций агрегатов из ПКМ выполнен исходя из неразрывности его составляющих при создании: материала – технологии – конструкции, взаимосвязь которых должна найти отражение в методике проектирования.

С появлением полимерных композиционных материалов нового класса на основе углерода, обладающих повышенными физико-механическими характеристиками, расширилось применение интегральных конструкций, и обозначилась объективная необходимость в адаптации к новым условиям и сложившейся практики проектирования.

Под интегральными конструкциями можно понимать изделия, состоящие из разных по геометрическим характеристикам и функциональному назначению элементов, объединенных в единое целое без соединительных швов.

В качестве предмета исследования рассматривается конструкция каркаса фонаря кабины пилотов вертолета из ПКМ. Согласно техническому заданию (ТЗ) на разработку конструкции определен автоклавный метод формования для изготовления деталей из ПКМ.

Для сравнительного анализа в качестве модернизируемого агрегата взят каркас фонаря кабины пилотов среднего многоцелевого гражданского вертолета семейства Ми-171, разработанного опытным конструкторским бюро имени Михаила Леонтьевича Миля в 1991 году, в конструкции которого используются детали из металлов. Перечень его ключевых характеристик представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Ключевые характеристики конструкции каркаса фонаря кабины пилотов вертолета Ми-171

| Характеристика                        | Значение |
|---------------------------------------|----------|
| Количество деталей, ед.               | 250      |
| Количество соединений, ед.            | 632      |
| Количество крепежных изделий, ед.     | 1220     |
| Количество металлических деталей, ед. | 451      |
| Количество композитных деталей, ед.   | 0        |
| Масса конструкции, кг                 | 72       |
| Трудоемкость изготовления, н-ч.       | 288      |

В качестве основного показателя уровня интегральности конструкции агрегата из ПКМ используется величина количества деталей -  $k_{дет}$ , поскольку она является определяющим параметром конструкций интегрального типа, исходя из определения, приведенного в работах ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ и ЦКТ КНИТУ-КАИ.

Для количественной оценки совершенства интегральной конструкции агрегата примем следующий набор ключевых характеристик:

1. Количество соединений;
2. Количество крепежа;
3. Масса конструкции;
4. Трудоемкость изготовления.

Следует отметить, что принимаемый набор ключевых характеристик для оценки совершенства интегральной конструкции агрегата может меняться в зависимости от типа рассматриваемого агрегата, назначения вертолета на котором он установлен, условий применения вертолета, условий производства и прочих факторов.

Для выбора наилучшего конструктивного решения предварительно разрабатывается несколько вариантов конструкций агрегата из ПКМ. Затем по предлагаемой методике производится их сравнительный анализ.

В качестве показателя совершенства интегральной конструкции сравниваемых вариантов агрегата предлагается использовать комплексный критерий, определяемый по формуле:

$$I_i = \sum_{j=1}^m I_{ij}, \quad (1)$$

где  $I_i$  – комплексный критерий совершенства  $i$ -го конструктивного решения;

$I_{ij}$  – критерий совершенства  $j$ -ой ключевой характеристики  $i$ -го конструктивного решения;

$j = 1, \dots, m$  – индекс ключевой характеристики;

$i = 1, \dots, n$  – индекс конструктивного решения.

С учетом направления предпочтительности нормированный частный критерий совершенства  $I_{ij}^{\min}$  ключевой характеристики, определяющейся наилучшими свойствами при наименьших значениях, рассчитывается по формуле:

$$I_{ij}^{\min} = \lambda_j \cdot \frac{P_{\max j} - P_{calci j}}{P_{\max j} - P_{\min j}}, \quad (2)$$



где  $P_{calci j}$  – значение  $j$ -ой ключевой характеристики  $i$ -го расчетного конструктивного решения;

$P_{\min j}$  – минимальное значение  $j$ -ой ключевой характеристики;

$P_{\max j}$  – максимальное значение  $j$ -ой ключевой характеристики;

$\lambda_j$  – весовой коэффициент  $j$ -ой ключевой характеристики.

Критерий совершенства  $I_{i j}^{\max}$  ключевой характеристики, определяющей наилучшими свойствами при наибольших значениях, рассчитывается по формуле:

$$I_{i j}^{\max} = \lambda_j \cdot \frac{P_{calci j} - P_{\min j}}{P_{\max j} - P_{\min j}}, \quad (3)$$

Для удобства проведения расчета комплексного критерия совершенства конструкции  $I_i$  с автоматическим выбором условия свойств ключевой характеристики используется обобщенная формула:

$$I_i = \sum_{j=1}^m \lambda_j \cdot \frac{(1 - s_j)(P_{calci j} - P_{\min j}) + s_j(P_{\max j} - P_{calci j})}{P_{\max j} - P_{\min j}}, \quad (4)$$

где  $s_j \in \{0, 1\}$  – логический индикатор  $j$ -ой ключевой характеристики:

$s_j = 0$  – наилучшие свойствами  $j$ -ой ключевой характеристики при наибольших значениях;

$s_j = 1$  – наилучшие свойствами  $j$ -ой ключевой характеристики при наименьших значениях;

Величина  $\lambda_j$  определяет важность ключевой характеристики и задает в количественном измерении предпочтение  $j$ -ой ключевой характеристики над другими. Весовые коэффициенты  $\lambda_j$  также должны удовлетворять

условию  $\sum_{j=1}^m \lambda_j = 1$ . Для определения значений  $\lambda_j$  – коэффициента степени влияния

(весовых коэффициентов) представляется возможным использование, как статистических данных, так и расчетных.

Статистические данные предложено формировать на основе анализа конструкций существующих вертолетов, научных публикаций о влиянии критериев оценки на эффективность ЛА, экспертных оценок эксплуатантов вертолетной техники. Расчет коэффициентов степени влияния в диссертационной работе проведен посредством коэффициента вариации, как безразмерного показателя, применяемого при сравнении изменчивости разных ключевых характеристик, и рассчитан

по формуле:

$$CV_j = \frac{\sigma_j}{\mu_j}, \quad (5)$$

где  $CV_j$  – коэффициент вариации  $j$ -ой ключевой характеристики;

$\sigma_j$  – стандартное отклонение  $j$ -ой ключевой характеристики;

$\mu_j$  – среднее значение  $j$ -ой ключевой характеристики по всем  $i$ -м конструктивным решениям;

$j = 1, \dots, m$  – индекс ключевой характеристики.

Расчет весовых коэффициентов проведен по формуле:

$$\lambda_j = \frac{CV_j}{\sum_{j=1}^m CV_j}, \quad (6)$$

Основа метода экспертных оценок заключается в использовании прикладных знаний людей и статистических данные, на основе опыта работы в профильной области, а также в способности поиска и нахождения решения слабо формализованных задач методом приписывания баллов.

Метод приписывания баллов основывается на оценке экспертами важности ключевых характеристик по шкале от 1 до 10 баллов. При этом допускается оценка важности дробными величинами или приписыванием одной и той же величины из выбранной шкалы нескольким критериям.

Для каждой ключевой  $j$ -ой ключевой характеристики рассчитывается сумма оценок от всех экспертов по формуле:

$$r_j = \sum_{k=1}^q b_{kj}, \quad (7)$$

где  $r_j$  – сумма оценок от всех экспертов по  $j$ -ой ключевой характеристике;

$b_{kj}$  – балльная оценка важность  $k$ -м экспертом  $j$ -ой ключевой характеристики;

$k = 1, \dots, q$  – индекс эксперта;

$j = 1, \dots, m$  – индекс ключевой характеристики.

Расчет весовых коэффициентов проведен по формуле:

$$\lambda_j = \frac{r_j}{\sum_{j=1}^m r_j}, \quad (8)$$

Использование предлагаемой методики определения рационального уровня интегральности конструкции агрегатов планера вертолета из ПКМ, продемонстрировано на примере каркаса фонаря кабины пилотов вертолета Ми-171А3. Для этого автором разработано несколько вариантов данной конструкции (см. глава 2).

Алгоритм расчета комплексного критерия совершенства конструкции фонаря кабины пилотов и последующего выбора рационального уровня интегральности среди разработанных вариантов представлен на рис. 1.

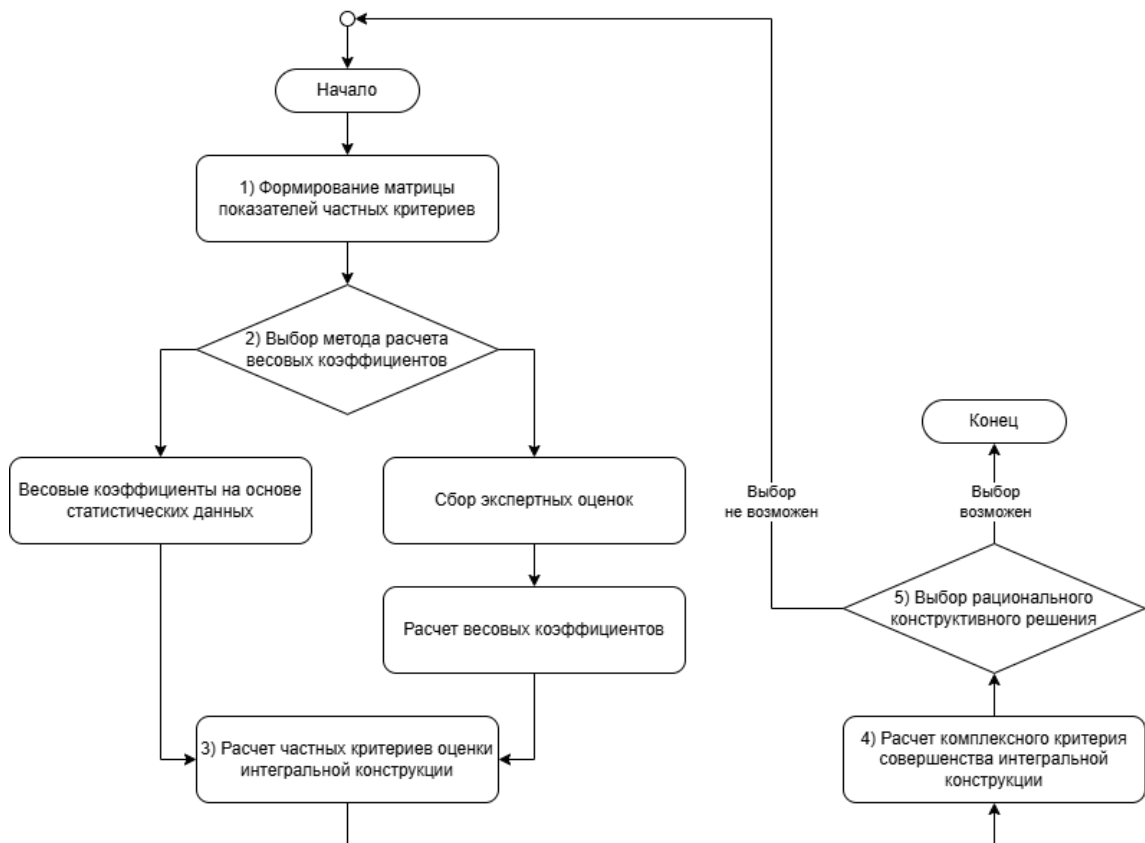


Рисунок 1 – Блок-схема методики выбора рационального уровня интегральности

**Во второй главе** проводится моделирование и анализ, с учетом возможных конструктивных решений каркаса фонаря кабины пилотов вертолета Ми-171А3 из ПКМ. Проектирование возможных вариантов конструкции кабины вертолета проведено в CAD-системе.

Процесс проектирования, представлен в виде блок-схемы (рисунок 2).

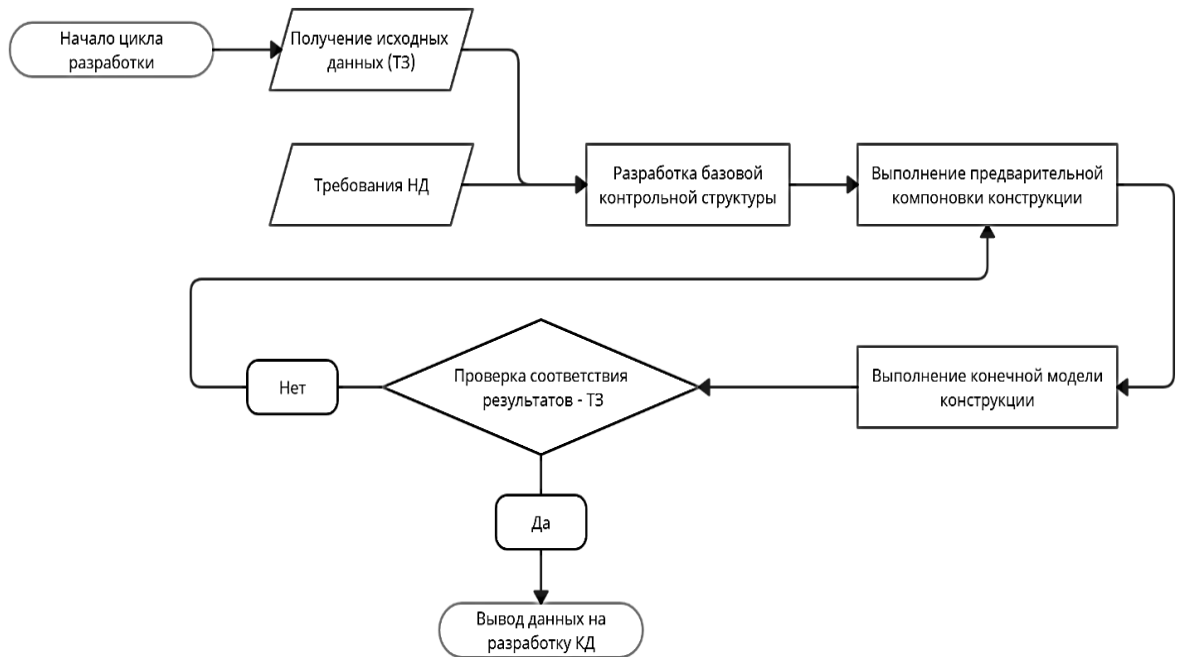


Рисунок 2 – Упрощенный алгоритм проектирования интегральной конструкции из ПКМ

После разработки конечной модели конструкции в системе САД в первую очередь проводится анализ ее соответствия техническому заданию (рисунок 3).



Рисунок 3 – Блок-схема проверки условия соответствия конструкции техническому заданию

Для последующего сравнительного анализа ниже представлены разработанные автором три варианта каркаса фонаря кабины пилотов вертолета из ПКМ.

#### **Каркас фонаря кабины пилотов из двух сэндвич-панелей (1 вариант)**

Конструкция представляет из себя 2 сэндвич-панели, каждая из которых формируется в едином технологическом цикле. Отдельно изготавливаются

конструктивные элементы, такие как кожух верхнего электропульта, бокового электропульта, воздухопроводы для обдува лобового остекления и различными жесткостями, а также окантовкой проема люка лаза. Металлические детали в конструкции фонаря представлены в основном в виде закладных титановых пластин, формируемых совместно с сэндвич-панелями, стальной центральной стойкой остекления, закрепленной механическим крепежом, центральной жесткостью в виде тавра и стыковочными кронштейнами.

Полученные при проектировании в CAD системе основные характеристики конструкции данного варианта конструкции представлены в таблице 3.

### **Фонарь кабины пилотов из единовременно формируемого каркаса с устанавливаемыми конструктивными элементами (2 вариант)**

Конструкция представляет из себя многослойную сэндвич-панель каркаса фонаря, которая формируется в едином технологическом цикле. Отдельно изготавливаются конструктивные элементы, такие как кожух верхнего электропульта, бокового электропульта, воздухопроводы для обдува лобового остекления и различными жесткостями. Металлические детали в конструкции фонаря представлены в основном в виде закладных титановых пластин, формируемых совместно с сэндвич-панелями и стальной центральной стойкой остекления, закрепленной механическим крепежом.

### **Цельно-композитный фонарь кабины пилотов (3 вариант)**

Конструкция представляет из себя многослойную сэндвич-панель каркаса фонаря, которая формируется в едином технологическом цикле. Конструктивные элементы, такие как кожух верхнего электропульта, бокового электропульта, воздухопроводы для обдува лобового остекления и различные жесткости формируются совместно с каркасом. Металлические детали в конструкции фонаря представлены в основном в виде закладных титановых пластин, формируемых совместно с сэндвич-панелями и композитной центральной стойкой.

Полученные при проектировании в CAD системе ключевые характеристики трех вариантов конструкции фонаря кабины вертолета представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Ключевые характеристики трех вариантов конструкции каркаса фонаря кабины вертолета из ПКМ

| Характеристика:                       | 1 вариант | 2 вариант | 3 вариант |
|---------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Количество деталей в агрегате, шт.    | 31        | 23        | 1         |
| Количество соединений в агрегате, шт. | 80        | 62        | 58        |
| Количество крепежных элементов, шт.   | 989       | 843       | 826       |
| Масса конструкции, кг                 | 61,13     | 58,33     | 57,98     |

Прогнозная оценка трудоемкости изготовления агрегатов из ПКМ основана на использовании геометрических характеристик изделия и эмпирически определённого значения относительной трудоёмкости для каждого типа технологической операции и имеет вид:

$$T_l = k_{cl} \cdot t_{отн} \cdot A, \quad (9)$$

где  $T$  – прогнозная трудоёмкость изготовления, ч;  
 $l = 1, \dots, s$  – индекс расчетного элемента конструкции;  
 $k_{cl}$  – коэффициент сложности;  
 $t_{отн}$  – удельная (относительная) трудоёмкость;

Средний габаритный размер изделия:

$$A = \frac{L + W + H}{3}, \quad (10)$$

где  $L$  – длина детали, мм;  
 $W$  – ширина детали, мм;  
 $H$  – высота детали, мм.

Расчет относительной трудоемкости  $t_{отн}$  производится по формуле:

$$t_{отн} = \frac{T_c}{A}, \quad (11)$$

где  $T_c$  – статистическая трудоемкость, ч.

В качестве статистической трудоемкости ( $T_c$ ) используется фактическая трудоемкость производственной операции, полученная при изготовлении детали – образца. Исходя из того, что процесс изготовления детали является многоэтапным, то для каждого этапа рассчитывается своя  $T_l$ . Формула расчета общей трудоемкости изготовления примет вид:

$$T = \sum_{l=1}^s T_l \quad (12)$$

где  $T$  – суммарная трудоемкость расчетного агрегата.

Для формирования базы эталонных значений относительной трудоёмкости отобраны типовые операции, характерные для производства деталей из ПКМ. В таблице 4 приведены значения эталонной трудоемкости ( $T_c$ ) и габаритных размеров.

Таблица 4 – Значения статистической трудоемкости

| Операция                | Габариты (мм) | $T_c$ , ч | $A$ , мм | $t_{отн}$ , ч/мм |
|-------------------------|---------------|-----------|----------|------------------|
| Механическая обработка  | 1225×1034×393 | 5.00      | 884.0    | 0.005            |
| Мехобработка пенопласта | 1015×364×995  | 9.75      | 791.3    | 0.012            |
| Мехобработка сот        | 215×86×62     | 2.00      | 121.0    | 0.016            |
| Трёхслойная конструкция | 1011×988×372  | 34.05     | 790.3    | 0.043            |
| Монолитная деталь       | 1225×1034×39  | 32.50     | 766.0    | 0.042            |

Трудоемкость изготовления каркаса фонаря кабины пилотов вертолета – прототипа, изготовленного из металлов, приводится на основе статистических данных общей трудоемкости изготовления вертолета данного и процентного соотношения изготовления носовой части вертолета. Точные значения трудоемкости изготовления не приводятся исходя из открытости диссертационного исследования.

**В третьей главе** представлено параметрическое исследование, выполненное с целью определения рационального уровня интегральности конструкции на примере каркаса фонаря кабины пилотов для вертолета Ми-171А3 путем сравнительного анализа трех разработанных конструктивных решений с использованием созданной автором методики.

При расчете комплексного критерия совершенства сравниваемых вариантов конструкции рассматривались весовые коэффициенты, полученные путем экспертных оценок, так и полученные на основе статистических данных.

На начальном этапе сформирована матрица включающая в себя значения ключевых характеристик исходной металлической конструкции ( $KP_{исход}$  – исходное конструктивное решение) и значения ключевых характеристик трех вариантов разработанных автором конструкций фонаря кабины из ПКМ ( $KP_1$ ,  $KP_2$ ,  $KP_3$  – конструктивное решение первого, второго и третьего вариантов). Данная матрица представлена в таблице 5.

Таблица 5 – Матрица значений ключевых характеристик интегральной конструкции

| Конструктивное решение | $k_{дет}$ | $P_1$ | $P_2$ | $P_3$ | $P_4$ |
|------------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|
| $KP_{исход}$           | 250       | 632   | 1220  | 72    | 288   |
| $KP_1$                 | 31        | 80    | 989   | 61,13 | 243   |
| $KP_2$                 | 23        | 62    | 843   | 58,33 | 215   |
| $KP_3$                 | 1         | 58    | 826   | 57,98 | 241   |

где  $k_{дет}$  – количество деталей в конструкции, шт.;

$P_1$  – количество соединений в конструкции, шт.;

$P_2$  - количество крепежных элементов в конструкции, шт.;

$P_3$  - масса конструкции, кг;

$P_4$  - трудоемкость изготовления, н-ч.

На рисунках 4-7 дано графическое представление значений ключевых характеристик  $P_j$  для четырех рассматриваемых вариантов конструкции каркаса фонаря кабины пилотов. Каждый вариант определяется количеством деталей  $k_{дети}$  в рассматриваемом конструктивном решении.

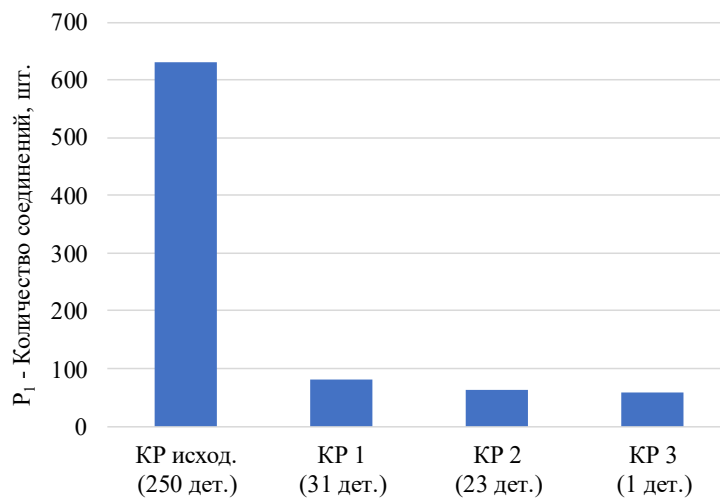


Рисунок 4 – Количество соединений в сравниваемых вариантах конструкции каркаса фонаря кабины вертолета

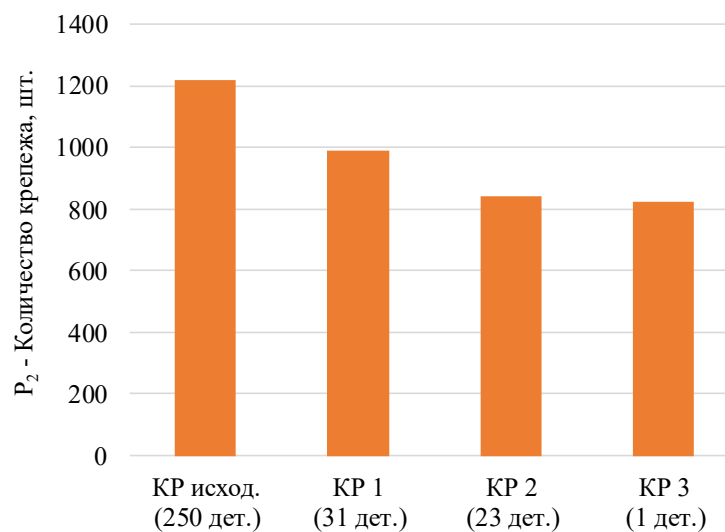


Рисунок 5 – Количество крепежных элементов в сравниваемых вариантах конструкции каркаса фонаря кабины вертолета



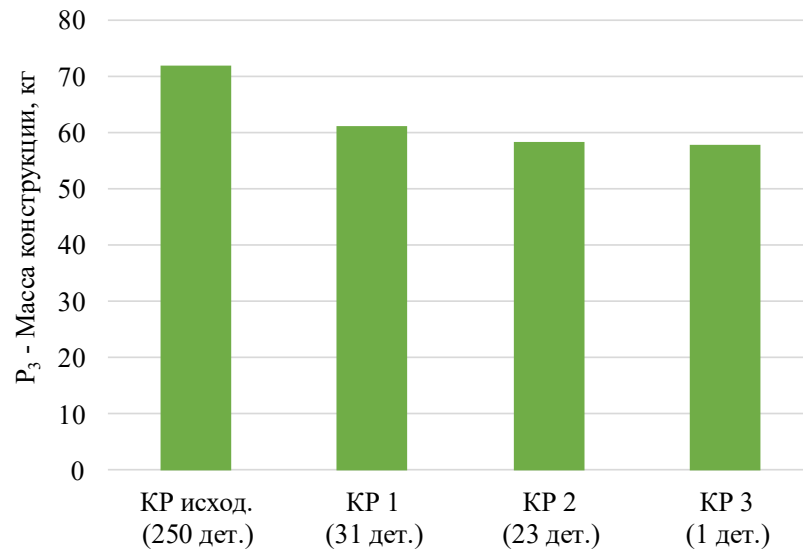


Рисунок 6 – Масса сравниваемых вариантов конструкции каркаса фонаря кабины вертолета

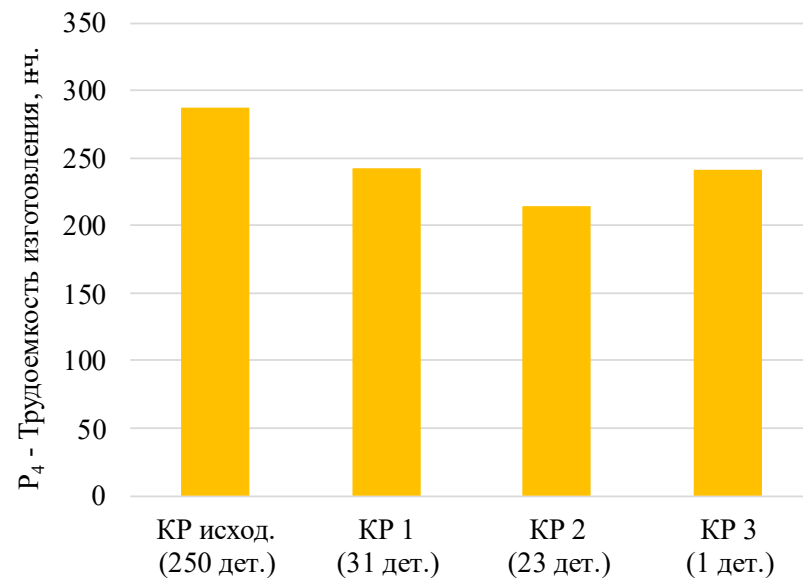


Рисунок 7 – Трудоемкость изготовления сравниваемых вариантов конструкции каркаса фонаря кабины вертолета

Из представленных гистограмм следует, что с повышением уровня интегральности конструкции агрегата при уменьшении количества деталей в его составе, большая часть ключевых характеристик (количество соединений, количество крепежных деталей и масса конструкции) снижается. В то время как трудоемкость изготовления первоначально снижается, но в последнем варианте конструкции, состоящей из одной детали, возрастает. Это объясняется тем, что в этом

варианте увеличивается сложность технологической оснасти и трудоемкость самого процесса изготовления каркаса фонаря кабины пилотов.

При проведении анализа результатов расчета по предлагаемой методике следует учитывать требования технического задания на разработку агрегата. В частности, в соответствии с заданием на разработку фонаря кабины пилотов в техническом задании указано на необходимость снизить массу конструкции в сравнении с исходной не менее чем на 15%, т.е. исходя из начальной массы агрегата 72 кг она должна быть не больше 61,2 кг. Этому условию соответствуют все три варианта конструкции фонаря кабины, изготавливаемых из полимерных композиционных материалов.

Для определения рационального уровня интегральности конструкций изначально проводится сбор экспертных оценок и на их основе рассчитывались весовые коэффициенты  $\lambda_j$ , рассчитанные по формуле (5, 6) и используемые в формуле (4). Также проведен расчет весовых коэффициентов  $\lambda_j$ , рассчитанных по формулам (7, 8) на основе сбора статистических данных. Результаты этих расчетов для каждой ключевой характеристики  $P_j$  представлены в Таблице 6.

Таблица 6 – Весовые коэффициенты  $\lambda_j$

| Ключевая характеристика                     | $P_1$ | $P_2$ | $P_3$ | $P_4$ |
|---|-------|-------|-------|-------|
| $\lambda_j$ на основе экспертных оценок     | 0,137 | 0,177 | 0,331 | 0,355 |
| $\lambda_j$ на основе статистических данных | 0,201 | 0,078 | 0,554 | 0,167 |

Расчет весовых коэффициентов на основе статистических данных проводилось через нахождение коэффициента вариации ввиду небольшой выборки конструктивно подобных образцов конструкций.

Расчет комплексного критерия совершенства ( $I_i$ ) конструктивных решений агрегата из ПКМ с использованием ключевых характеристик ( $P_j$ ) проведен по формуле (4) с автоматическим выбором условия свойств ключевой характеристики.

Логический индикатор ( $s_j \in \{0,1\}$ )  $j$ -ой ключевой характеристики будет равен  $s_j=1$  исходя из того, что все ключевые характеристики, представленные в диссертационном исследовании, демонстрируют наилучшие свойства при наименьших значениях.

В таблице 7 приведены результаты расчета критериев совершенства конструкции ключевых характеристик ( $P_j$ ) с использованием весовых коэффициентов ( $\lambda_j$ ), полученных методом экспертных оценок.

Таблица 7 – Значения критериев совершенства ключевых характеристик конструктивных решений на основе экспертных оценок

| Критерий совершенства конструкции | $k_{дет}$ | Ключевая характеристика |          |          |          |
|-----------------------------------|-----------|-------------------------|----------|----------|----------|
|                                   |           | $P_{i1}$                | $P_{i2}$ | $P_{i3}$ | $P_{i4}$ |
| $I_{исход.j}$                     | 250       | 0,000                   | 0,000    | 0,000    | 0,000    |
| $I_{1j}$                          | 31        | 0,132                   | 0,104    | 0,256    | 0,219    |
| $I_{2j}$                          | 23        | 0,136                   | 0,170    | 0,355    | 0,355    |
| $I_{3j}$                          | 1         | 0,137                   | 0,177    | 0,331    | 0,228    |

В таблице 8 приведены результаты расчета критериев совершенства ключевых характеристик ( $P_j$ ) с использованием весовых коэффициентов ( $\lambda_j$ ), полученных на основе статистических данных.

Таблица 8 – Значения критериев совершенства ключевых характеристик конструктивных решений на основе статистических данных

| Критерий совершенства конструкции | $k_{дет}$ | Ключевая характеристика |          |          |          |
|-----------------------------------|-----------|-------------------------|----------|----------|----------|
|                                   |           | $P_{i1}$                | $P_{i2}$ | $P_{i3}$ | $P_{i4}$ |
| $I_{исход.j}$                     | 250       | 0,000                   | 0,000    | 0,000    | 0,000    |
| $I_{1j}$                          | 31        | 0,193                   | 0,005    | 0,429    | 0,103    |
| $I_{2j}$                          | 23        | 0,200                   | 0,007    | 0,540    | 0,167    |
| $I_{3j}$                          | 1         | 0,201                   | 0,008    | 0,554    | 0,108    |

Значения комплексных критериев совершенства интегральной конструкции получаемых сложением нормированных ключевых характеристик с учетом весовых коэффициентов, полученных на основе экспертных оценок и статистических данных, представлены в таблице 9.

Таблица 9 – Значения комплексного критерия совершенства интегральной конструкции

| Конструктивное решение | $k_{дет}$ | Комплексный критерий совершенства |                                 |
|------------------------|-----------|-----------------------------------|---------------------------------|
|                        |           | На основе экспертных оценок       | На основе статистических данных |
| $KP_{исход}$           | 250       | 0,000                             | 0,000                           |
| $KP_1$                 | 31        | 0,710                             | 0,730                           |
| $KP_2$                 | 23        | 0,983                             | 0,914                           |
| $KP_3$                 | 1         | 0,874                             | 0,870                           |

На рисунках 8, 9 представлены полученные в результате расчета показатели комплексного критерия совершенства трех вариантов конструктивных решений каркаса фонаря кабины пилотов вертолета, выполненного из ПКМ на основе экспертных оценок и статистических данных.

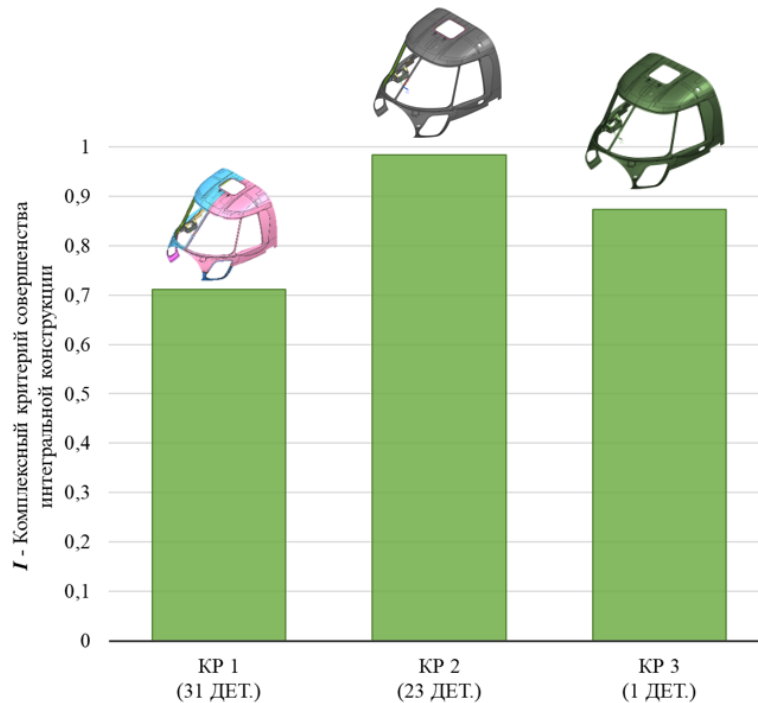


Рисунок 8 – Показатели комплексного критерия совершенства трех вариантов конструктивных решений каркаса фонаря кабины пилотов на основе экспертной оценки

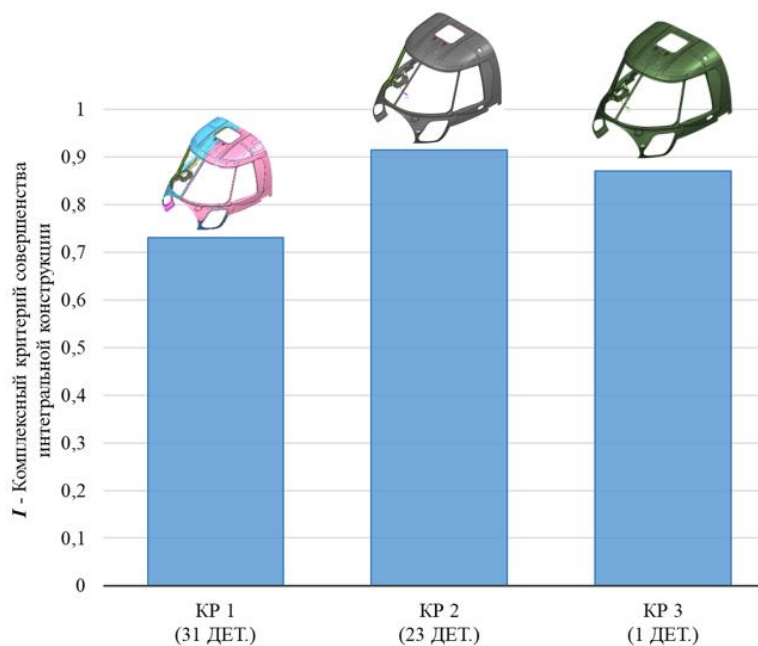


Рисунок 9 – Показатели комплексного критерия совершенства трех вариантов конструктивных решений каркаса фонаря кабины пилотов на основе статистических данных

Из представленных данных следует, что первоначально с увеличением уровня интегральности конструкции фонаря кабины вертолета при уменьшении количества входящих в нее деталей комплексный критерий совершенства конструкции увеличивается и во втором варианте он достигает значения 0,983 на основе экспертных оценок и значения 0,914 на основе статистических данных. Затем он начинает снижаться. Последнее объясняется проявлением фактора увеличения трудоемкости изготовления конструкции. При этом количество соединений, крепежных элементов и масса конструкции меняются незначительно.

Из проведенного анализа следует, что из рассмотренных конструктивных решений наиболее рациональным является второй вариант конструкции (КР<sub>2</sub>).

В результате расчета для дальнейшей разработки РКД в качестве рационального проектно конструкторского решения выбран фонарь кабины пилотов из единовременно формуемого каркаса с устанавливаемыми конструктивными элементами. В 2023 году вертолет Ми-171А3 представлен на XII Петербургском международном газовом форуме.

В целях определения прогнозной эффективности применения новой методики с целью снижения массы выбрана модель, основанная на масштабировании подхода, к оптимизации массы каркаса фонаря кабины пилотов из ПКМ на номенклатуру крупногабаритных агрегатов представленных в Таблице 109.

Таблица 10 – Масса крупногабаритных агрегатов планера вертолетов из металлических и композитных элементов

| Агрегат                      | Ми-171А2<br>(металл) масса, кг | Ми-171А3<br>(ПКМ) масса, кг | $\Delta G$ , кг |
|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------|
| Обтекатель                   | 5                              | 4                           | 1               |
| Обтекатель                   | 5                              | 4                           | 1               |
| Люк аварийный                | 15                             | 12                          | 3               |
| Дверь в кабину пилотов       | 10                             | 8                           | 2               |
| Дверь сдвижная               | 24                             | 19,2                        | 4,8             |
| Панель боковая левая         | 70                             | 56                          | 14              |
| Панель боковая правая        | 60                             | 48                          | 12              |
| Каркас фонаря кабины пилотов | 72                             | 58                          | 14              |
| Зашивка грузовых створок     | 87                             | 69,6                        | 17,4            |
| $\Sigma$                     | 348                            | 278,8                       | 69,2            |

В соответствии с научными работами уровень снижения массы для других агрегатов планера рассчитан при значении 20%. Таким образом сравнительный анализ массовых характеристик агрегатов из ПКМ, с аналогичными агрегатами, изготовленными из металлов, свидетельствует о прогножном снижении массы в абсолютном значении на 69,2 кг.

Прогнозная оценка стоимости летного часа с учетом достигнутой массы агрегатов планера из ПКМ при использовании методики определения рационального уровня интегральности рассчитана исходя из следующих допущений:

- Масса каркаса фонаря кабины пилотов определена расчетом
- Масса пустого вертолета Ми-171 ( $m_{пуст}$ ) – 6800 кг
- Стоимость летного часа Ми-171 ( $C_{лч}$ ) – 245629 руб.
- Затраты на 1 кг массы пустого вертолета ( $F_{пуст/1кг}$ ) – 34 руб.
- Годовой налет вертолета ( $t_{год}$ ) – 500 час.

Экономия на стоимости летного часа пустого вертолета ( $E_y$ ) с учетом годового налета рассчитана по формуле:

$$\begin{aligned} E_y &= t_{год} \cdot (C_{лч\ пуст1} - C_{лч\ пуст2}) = \\ &= t_{год} \cdot ((m_{пуст} \cdot F_{пуст/1кг}) - ((m_{пуст} - 69,2) \cdot F_{пуст/1кг})) = \\ &= 500 \cdot (231200 - 228847) = 500 \cdot 2353 = 1176400 \text{ руб.} \end{aligned} \quad (13)$$

Исходя из открытых источников в 2021 году ПАО «Газпром» подписал договор на поставку 16 вертолетов марки Ми-171А3. С учетом средней продолжительности жизненного цикла вертолета в парках отечественных эксплуатантов длительностью в 25 лет экономия на стоимости летного часа 1 176 400 руб. в год на парке из 16 вертолетов составит 470 560 000 руб.

**Заключение** диссертации состоит из шести основных новых научных результатов, отражающих решения задач, сформулированных для достижения цели исследования. Отражены перспективы дальнейшей разработки темы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**В результате проведенного исследования разработана методика выбора рационального уровня интегральности конструкции агрегатов планера вертолета из полимерных композиционных материалов.**

**Основные новые научные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:**

1. Разработана методика определения количественной взаимосвязи уровня интегральности с основными критериями совершенства конструкции и рассчитаны их значения для выбора проектного решения;
2. Сформулированы технические рекомендации, применяемые при проектировании агрегатов планера вертолета из ПКМ, в том числе конструктивного решения каркаса фонаря кабины пилотов вертолета Ми-171А3;
3. Разработан алгоритм проектирования конструкций агрегатов планера вертолета из ПКМ в программном комплексе Siemens NX и смоделированы,

на его основе три различных по параметрам конструктивных решения каркаса фонаря кабины пилотов вертолета Ми-171А3;

4. Разработана методика предварительного расчета трудоемкости изготовления деталей из полимерных композиционных материалов;
5. Разработан алгоритм проектирования конструкций агрегатов планера вертолета из ПКМ в программном комплексе Siemens NX и смоделированы, на его основе три различных по параметрам конструктивных решения каркаса фонаря кабины пилотов вертолета Ми-171А3;

В результате анализа с использованием разработанной методики в качестве наилучшего конструктивного решения выбрана цельно-композитная конструкция каркаса фонаря кабины пилотов ( $KP_2$ ) с отдельно устанавливаемыми конструктивными элементами. По сравнению с исходной цельнометаллической конструкцией ( $KP_{исход}$ ) она имеет на 90% меньше количество соединений, на 31% меньше количество крепежных элементов, на 19% меньшую массу и на 25% меньшую трудоемкость изготовления;

6. Прогнозная экономия на стоимости летного часа пустого вертолета, за счет снижения массы агрегатов планера с учетом годового налета (500 час.) составит 1 176 400 руб. в год на один борт. За 25 лет в парке из 16 машин экономия составит порядка 470 560 000 руб.

**Перспективы дальнейшей разработки темы**, представленной в диссертационной работе модели определения рационального уровня интегральности при проектировании агрегатов планера вертолетов с использованием комплексного критерия совершенства конструкций из ПКМ позволяет конструкторам определять лучшее конструктивное решение на ранних этапах разработки исходя не из личного опыта или традиционно применяемых практик, а из многокритериальной оценки конструкции.

Разработанная методика позволяет оценить проектируемую конструкцию не только по представленным в примере параметрического исследования ключевым характеристикам, но также рассматривать вводить новые переменные, присущие той или иной конструкции, которые можно выразить в числовом значении. Причем сравниваемые конструктивные решения из ПКМ с конструкцией, изготовленной

из металлов, допускается сравнивать также с исходной композитной конструкцией в целях улучшения уже разработанного решения.

Решена аналитическая задача, которая дает основания для решения задачи синтеза в дальнейшем. Расчет уровня интегральности конструкций и нахождение рационального конструктивного решения в рамках диссертационной работы проводились вручную, однако представленная модель позволяет в дальнейшем

разработать программу на базе таких языков программирования, как MatLab, Python, Fortran, C.

**В ПРИЛОЖЕНИИ** к диссертации представлен акт о внедрении результатов диссертационной работы в ОКБ АО «НЦВ Миль и Камов».

**Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем ученой степени**

*Научные статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в Перечень Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации*

**Специальность 2.5.13**

1. Кисин И.Д., Завалов О.А. Методика определения рационального уровня интегральности при проектировании агрегатов планера вертолетов из полимерных композиционных материалов. Инженерный журнал: наука и инновации, 2025. вып. 10 (166). EDN [TKEQZE](#)
2. Кисин И.Д., Завалов О.А. Метод количественной оценки уровня интегральности композитных конструкций агрегатов планера вертолета в зависимости от их проектных параметров. Инженерный журнал: наука и инновации, 2025. вып. 2 (158). EDN [ULJGRX](#)

*Патенты в перечне Федеральной службой по интеллектуальной собственности Российской Федерации*

1. Патент RU 215413 U1. Обтекатель носовой авиационный. Заявитель: Калинин Д.В., Зайцев О.В., Семенцова А.Н., Телегина А.В., Кисин И.Д.; опуб. 12.12.2022. Бюл. №35.

*Материалы международных и всероссийских конференций*

1. Кисин И.Д. Разработка подхода к созданию критерия для определения оптимального уровня интегральности агрегатов планера вертолета из ПКМ // Международный конгресс по аэронавтике. Сборник тезисов. - М.: Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, 2023. - С. 894-896.
2. Кисин И.Д. Разработка методики проектирования деталей ЛА из полимерных композиционных материалов // Сборник тезисов работ международной молодежной научной конференции XLVII Гагаринские чтения 2021. - М.: Издательство «Перо», 2021. - С. 42-44.
3. Кисин И.Д. Разработка методики проектирования деталей ЛА из полимерных композиционных материалов // «Гагаринские чтения – 2020»: Сборник тезисов докладов. - М.: МАИ, 2020. - С. 67-68.