

Методика определения рационального уровня интегральности при проектировании агрегатов планера вертолетов из полимерных композиционных материалов

© И.Д. Кисин¹, О.А. Завалов²

¹АО «Национальный центр вертолетостроения им. М.Л. Миля и Н.И. Камова», г. Люберцы, рп. Томилино, 140070, Российская Федерация

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Российская Федерация

На примере проектируемого из полимерных композиционных материалов (ПКМ) каркаса фонаря кабины пилотов для вертолета Ми-171А3 представлен подход и комплекс мер, принятых для разработки методики определения рационального уровня интегральности при проектировании агрегатов планера вертолетов из ПКМ. Актуальность решения данной задачи можно обосновать тем, что несмотря на общую тенденцию расширения области применения конструкций интегрального типа из ПКМ в вертолетной технике, расчетная база для определения рационального уровня интегральности исследована недостаточно. Анализ научных работ свидетельствует о том, что оценка интегральности конструкций из ПКМ в настоящее время проводится эмпирически. В качестве объекта исследования авторами был выбран каркас фонаря кабины пилотов для вертолета Ми-171А3. Представленная методика учитывает частные критерии конструкции. Проведен расчет комплексного критерия совершенства проектируемой конструкции из ПКМ для определения рационального уровня интегральности посредством представленного математического аппарата на ранних этапах разработки вертолета.

Ключевые слова: планер вертолета, композитные интегральные конструкции, методы экспертной оценки, проектирование конструкции вертолета, композитные авиационные конструкции, определение уровня интегральности авиационных конструкций

Введение. При формировании плана разработки методики определения рационального уровня интегральности при проектировании агрегатов планера вертолетов из полимерных композиционных материалов (ПКМ) учитывался опыт применения данных конструкций в отечественном и зарубежном вертолетостроении, а также практика выбора рационального конструктивного решения, основанного на наилучшем сочетании его показателей.

При проектировании агрегатов планера вертолетов [1, 2] из ПКМ характерным признаком является вариативность и многокритериальность инженерной процесса, когда разработчик сталкивается с необходимостью решения целого ряда задач [3]. Помимо соблюдения предъявляемых требований и учета ограничений к главным характеристикам по обеспечению минимальной массы и заданной прочности, отраженным в техническом задании (ТЗ), разработчику необходимо учитывать,

что проектируемый агрегат должен быть технологичным в исполнении и удовлетворять экономическим требованиям.

Решение такой многокритериальной [4] задачи осложняется и тем, что для части ключевых характеристик проектируемой конструкции одновременное достижение рассчитанных значений становится маловероятным или просто невозможным. В этих случаях прибегают к поиску оптимальных компромиссных решений, которые, как правило, принимаются разработчиками на основе индивидуальной оценки проектной ситуации и собственного опыта. Отмеченные особенности и проблемы в большей степени проявляются при проектировании многокомпонентных интегральных конструкций из ПКМ.

Изложенные выше причины дают основание полагать, что одной из наиболее актуальных задач при создании агрегатов вертолета из ПКМ с требуемыми свойствами является разработка методики определения рационального уровня интегральности при проектировании на ранней стадии агрегатов планера таких вертолетов.

В развитие идей, содержащихся в работе [3], был подготовлен и реализован план разработки указанной методики при проектировании агрегатов планера вертолетов из ПКМ на примере крупногабаритного агрегата вертолета семейства МИ. В качестве объекта исследования была выбрана конструкция каркаса фонаря кабины пилотов для вертолета Ми-171А3 в трех конструктивных решениях.

Цель работы — повышение технико-экономических показателей конструкции агрегата планера вертолета из ПКМ путем выбора рационального уровня интегральности конструкции на основе разработанной авторами методики.

Объект исследования. В качестве рассматриваемого объекта исследования в данной статье представлен каркас фонаря кабины пилотов для среднего многоцелевого вертолета Ми-171А3 (рис. 1), изготовленный из препрегов на основе углеволокна и стекловолокна, деталей из титановых сплавов.



Рис. 1. Внешний вид вертолета Ми-171А3

Данная модификация вертолета предназначена для полетов на шельфовые буровые установки и проведения поисково-спасательных работ [4].

Параметры ключевых характеристик, достижение которых при проектировании должно обеспечить функциональные свойства в составе изделия при условии выполнения требований «Норм летной годности», формулируют в ТЗ на создание каркаса фонаря кабины пилотов из ПКМ. В их число входят требования к прочности при нагрузках в полете, на земле, на воде, а также в случае аварийной посадки.

Для выполнения требований ТЗ было разработано три конструктивных решения (КР) каркаса фонаря кабины пилотов (рис. 2) на основе углепластиков со структурой интегрального типа:

КР № 1 представляет собой две сэндвич-панели, каждую из которых формуют в едином технологическом цикле. Отдельно изготавливают и устанавливают вторичные конструктивные элементы;

КР № 2 представляет собой цельную многослойную сэндвич-панель каркаса фонаря, которую формуют в едином технологическом цикле. Отдельно изготавливают и устанавливают вторичные конструктивные элементы;

КР № 3 представляет собой цельную многослойную сэндвич-панель каркаса фонаря, которую формуют в едином технологическом цикле, где вторичные конструктивные элементы формуют одновременно с каркасом.

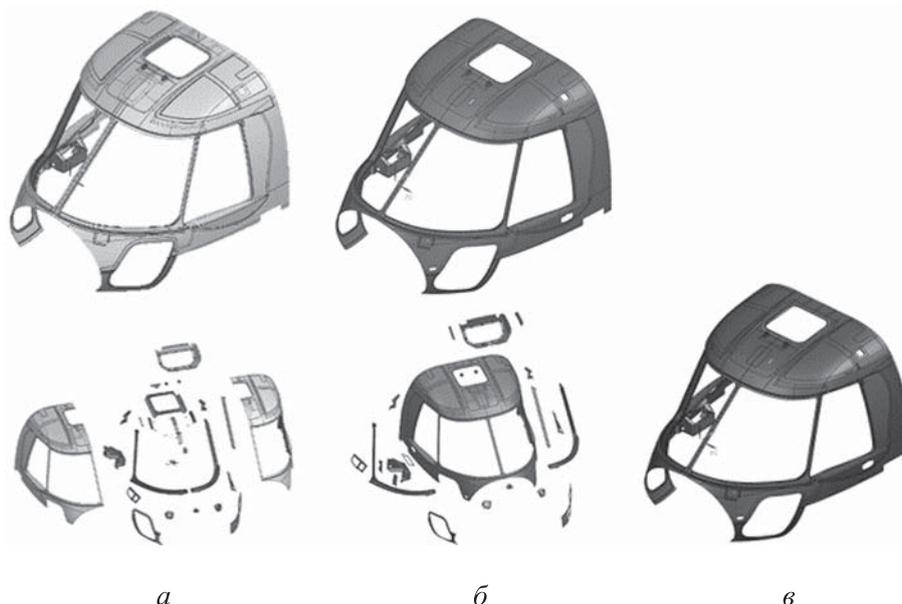


Рис. 2. Конструктивные решения каркаса фонаря кабины пилотов:

a — КР № 1; *б* — КР № 2; *в* — КР № 3

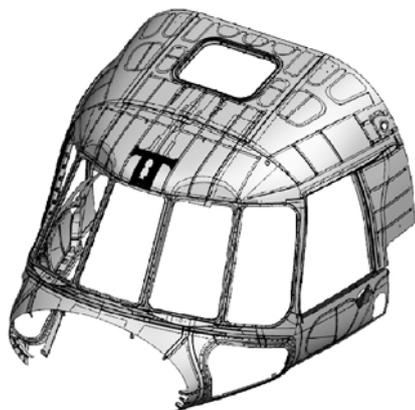


Рис. 3. Каркас фонаря кабины пилотов для вертолета Ми-171

Для сравнительного анализа в качестве агрегата-прототипа, который обозначается как КР_{исходн}, был взят фонарь кабины пилотов для среднего многоцелевого гражданского вертолета семейства Ми-171 (рис. 3), в конструкции которого использованы металлические детали.

Исходные данные. По результатам проведенного комплексного анализа конструкции агрегата-прототипа для гражданского вертолета Ми-171 и конструктивных решений каркаса фонаря кабины пилотов для вертолета Ми-171А3 был сформирован при-

веденный в табл. 1 перечень ключевых характеристик. Каждой ключевой характеристике P_j для удобства присваивается порядковый номер j . Пользователи методики могут выбрать свою нумерацию ключевых характеристик.

Назначение вертолета, условия производства и сфера его применения определяют выбор ключевых характеристик. В соответствии с ТЗ на разработку ключевыми характеристиками являются: количество соединений, количество крепежных элементов, масса конструкции и трудоемкость ее изготовления.

Таблица 1

Перечень ключевых характеристик агрегата-прототипа и разработанных конструктивных решений

Конструктивное решение	Детали $k_{дет}$, шт.	Соединения P_1 , шт.	Крепеж P_2 , шт.	Масса конструкции P_3 , кг	Трудоемкость изготовления P_4 , ч
КР _{исходн}	250	632	1220	72,0	288
КР № 1	31	80	989	61,2	243
КР № 2	23	62	843	58,3	215
КР № 3	1	58	826	57,9	241

В качестве ориентира по снижению массы конструкции из ПКМ для Ми-171А3 принят уровень не менее 15 % массы аналогичной конструкции из металлических сплавов вертолета Ми-171 [5]. При расчете прочностных свойств конструкций учитывают общие требования, изложенные в «Нормах летной годности» (раздел С, часть 29), а также требования по обеспечению коэффициента безопасности на уровне 2,0 и минимальных деформаций в конструкции при жестком

воздействию на верхнюю часть кабины пилотов вертолета в случае переворота.

Расчет трудоемкости изготовления деталей и агрегатов из ПКМ на ранних стадиях проектирования проведен на основе методики, представленной в [3]. В предложенной методике используют геометрические характеристики проектируемых трехмерных моделей и эмпирически определенных значений относительной трудоемкости для каждого типа ключевых технологических операций, рассчитываемой по формуле

$$T = k_{\text{сл}} t_{\text{отн}} A, \quad (1)$$

где T — трудоемкость изготовления, ч; $k_{\text{сл}}$ — коэффициент сложности, присваиваемый технологом; $t_{\text{отн}}$ — относительная трудоемкость, ч/мм; A — средний габаритный размер изделия, мм.

Средний габаритный размер изделия рассчитывается исходя из полученных в САД-системе габаритных размеров построенной модели:

$$A = \frac{L + W + H}{3}, \quad (2)$$

где L — длина модели, мм; W — ширина модели, мм; H — высота модели, мм.

Относительную трудоемкость $t_{\text{отн}}$ можно оценить как отношение

$$t_{\text{отн}} = \frac{T_{\text{с}}}{A}, \quad (3)$$

где $T_{\text{с}}$ — статистическая трудоемкость (трудоемкость, полученная исходя из опыта в изготовлении аналогичных деталей), ч.

Трудоемкость изготовления детали из ПКМ определяется суммой трудоемкости всех технологических операций. Общая трудоемкость изготовления агрегата, в свою очередь, есть сумма трудоемкости изготовления всех его деталей.

Ключевые технологические операции изготовления деталей из ПКМ приведены в табл. 2. Для каждой детали указаны статистическая трудоемкость $T_{\text{с}}$, средний габаритный размер A и рассчитана относительная трудоемкость $t_{\text{отн}}$.

Для каждого из представленных конструктивных решений каркаса фонаря кабины пилотов был составлен перечень деталей с указанием их габаритных размеров. Прогнозная оценка трудоемкости изготовления с учетом выполняемых технологических операций выполнена в программе Microsoft Excel. Трудоемкость изготовления $KP_{\text{исходн}}$ приведена в виде приближенного значения.

Технологические операции изготовления деталей из ПКМ

Операция	Габариты детали, мм	T_c , ч	A , мм	$t_{отн}$, ч/мм
Механическая обработка	1225×1034×393	5,00	884,0	0,005
Механическая обработка пенопласта	1015×364×995	9,75	791,3	0,012
Механическая обработка сот	215×86×62	2,00	121,0	0,016
Трехслойная конструкция	1011×988×372	34,05	790,3	0,043
Монолитная деталь	1225×1034×39	32,50	766,0	0,042

Проектирование проводилось в САД-системе, в программном комплексе Siemens NX, позволяющем в трехмерной модели конструкции учитывать свойства материалов, формировать ведомости сборочных единиц и получать данные о количестве входящих деталей и их массе.

Определения рационального уровня интегральности конструкции из ПКМ. Опыт применения композиционных материалов и технологии автоклавного формования в производстве летательных аппаратов (ЛА) свидетельствует о том, что на качество конечного изделия влияют два важных фактора:

1) проектная предыстория, в которой закладываются свойства отформованной интегральной конструкции ПКМ, качество выполнения требований ТЗ зависит от точности выбора значений ключевых характеристик и совершенства конструктивного решения;

2) технологическая предыстория создания готовой конструкции интегрального типа с требуемой массой, жесткостью и прочностью при четком соблюдении технологии производства.

В рамках проводимого исследования из числа известных критериев оценки совершенства конструкции из ПКМ [6, 7] был выбран комплексный критерий уровня совершенства интегральных конструкций, отражающий взаимосвязь ключевых характеристик и их весовое значение в каждом варианте конструктивного решения.

Для оценки важности каждой ключевой характеристики при расчете уровня интегральности был использован опыт применения метода экспертных оценок при проектировании изделий из ПКМ [8]. При количественной оценке влияния каждой ключевой характеристики на конструктивное решение был применен метод весовых коэффициентов, «Оценка веса» каждой характеристики проведена в соответствии с процедурами регрессивного метода расчета весовых коэффициентов и условия

$$\sum_{j=1}^m \lambda_j = 1, \quad (4)$$

где m — количество ключевых характеристик, рассматриваемых при разработке конструкции; λ_j — весовой коэффициент j -й ключевой характеристики.

Для каждой j -й ключевой характеристики определена сумма оценок от всех экспертов по формуле

$$r_j = \sum_{k=1}^q b_{kj}, \quad (5)$$

где r_j — сумма оценок от всех экспертов по j -й ключевой характеристике; b_{kj} — балльная оценка важности k -м экспертом j -й ключевой характеристики; $k = 1, \dots, q$ — индекс эксперта; $j = 1, \dots, m$ — индекс ключевой характеристики.

Весовые коэффициенты λ_j рассчитаны по формуле

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

Используемый метод приписывания баллов основывается на оценке экспертами важности частных критериев по шкале от 1 до 10 баллов. При этом допускается оценка важности дробными величинами или приписывание одной и той же величины из выбранной шкалы нескольким критериям. Подразумевается, что эксперты имеют равную компетентность и достаточный опыт в сфере проектирования конструкций агрегатов планера вертолетов.

Оценка важности частных критериев проведена специалистами АО «НЦВ Миль и Камов» Главным конструктором направления, заместителем Главного конструктора, двумя главными специалистами и ведущим конструктором по профильной тематике. Результаты оценки и расчет весовых коэффициентов представлены в табл. 3.

Выбранный критерий совершенства рассматривается не только как оценочный критерий совершенства конструктивных решений, но и как показатель, характеризующий правильность создания пространственно сложной конструкции, обеспечивающей функциональное назначение конечного изделия.

Комплексный критерий совершенства интегральной конструкции рассчитывается по формуле с учетом влияния весовых коэффициентов:

$$I_i = \sum \lambda_j \cdot \frac{P_{calcij} - P_{minj}}{P_{maxj} - P_{minj}} + \sum \lambda_j \cdot \frac{P_{maxj} - P_{calcij}}{P_{maxj} - P_{minj}}, \quad (7)$$

где I_i — комплексный критерий совершенства i -й рассматриваемой конструкции; P_{calcij} — значение j -й ключевой характеристики i -й рассматриваемой конструкции; P_{minj} — минимальное значение j -й ключевой характеристики; P_{maxj} — максимальное значение j -й ключевой характеристики.

Таблица 3

Расчет весовых коэффициентов методом экспертных оценок

Индекс эксперта k	Оценки экспертов b_{kj} по ключевым характеристикам P_j			
	b_{k1}	b_{k2}	b_{k3}	b_{k4}
1	1	4	2	3
2	4	2	5	4
3	2	1	4	10
4	1	3	8	3
r_j	9	12	22	24
Весовые коэффициенты				
λ_j	0,137	0,177	0,331	0,355

При проектировании агрегата планера вертолета на этапе аван-проекта конструктор обязан предварительно проработать несколько вариантов конструкции агрегата и выбрать наилучшее конструктивное решение для проведения следующего этапа опытно-конструкторских работ. Учитывая многокомпонентность интегральных конструкций из ПКМ [4] и руководствуясь теорией принятия решений [9], был сформирован алгоритм разработки методики для определения оптимального конструкторского решения [10], представленный на рис. 4.

В соответствии с алгоритмом и методом вариативного проектирования [11] было выработано несколько равноценных вариантов конструкции, изготавливаемых из материалов одного типа и по одной технологии автоклавного формования.

При разработке технологии проектирования и изготовления учитывались особенности выбранных типов конструкций. Ключевыми целями вариативного проектирования были создание вариантов конструкции, расчет комплексного критерия совершенства конструкции, проведение сравнительного анализа значений ключевых характеристик и определение рационального конструктивного решения.

По результатам проектирования, сбора экспертных оценок важности ключевых характеристик и расчета их весовых коэффициентов была сформирована матрица количественных значений деталей $k_{дет}$

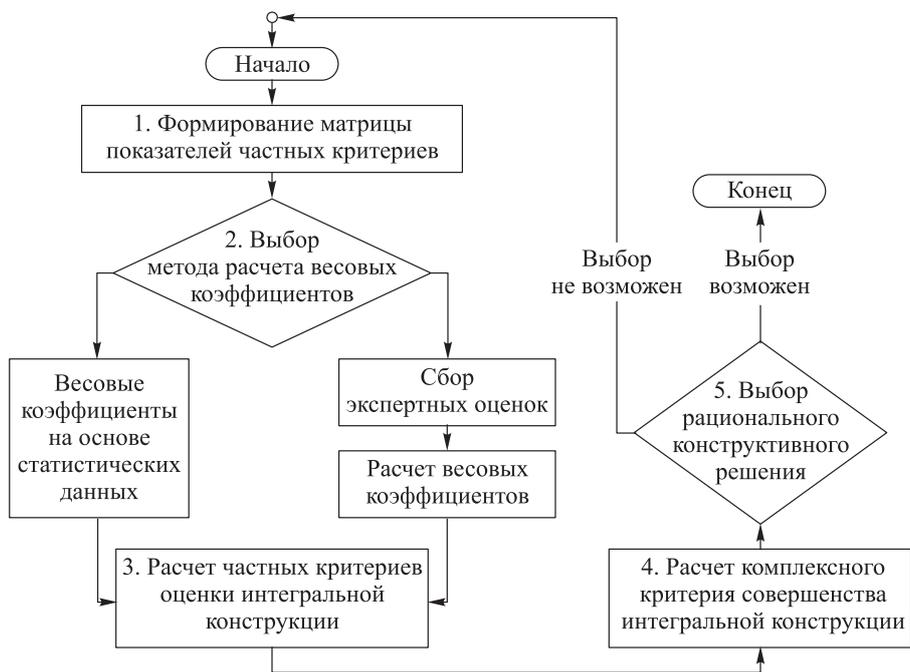


Рис. 4. Алгоритм разработки методики для определения рационального уровня интегральности

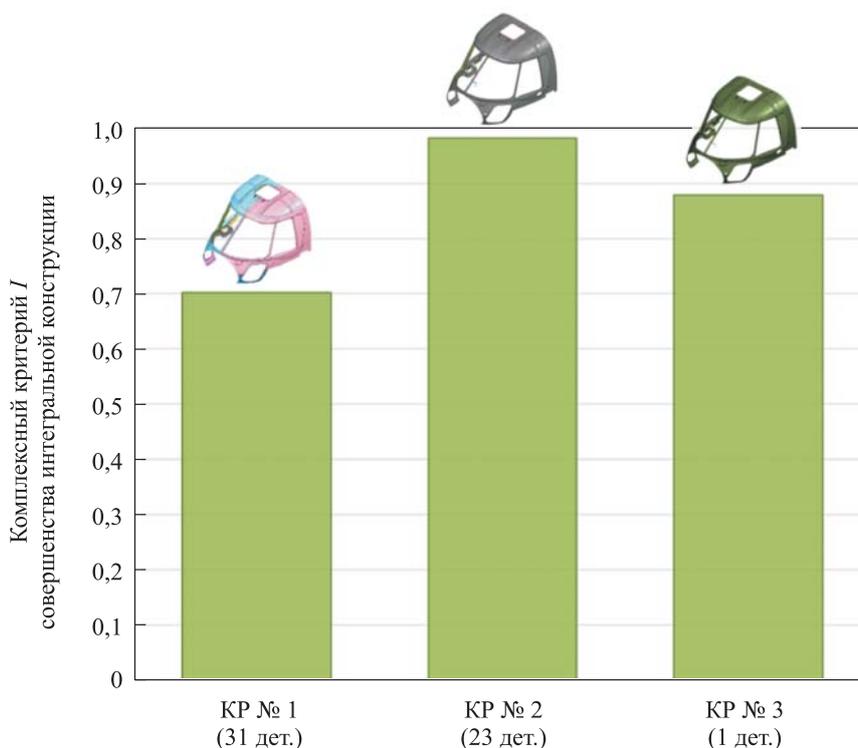


Рис. 5. Значения комплексного критерия совершенства конструктивных решений каркаса фонаря кабины пилотов

и ключевых характеристик P_1-P_4 конструктивных решений (см. табл. 1), на основе которой проведен расчет по формуле (7). Комплексный критерий I совершенства интегральных конструкций каркаса фонаря кабины пилотов приведен на рис. 5.

Прогнозная оценка эффективности применения методики. Для определения работоспособности новой методики выбрана модель прогнозной оценки снижения массы, основанная на масштабировании результатов оптимизации массы каркаса фонаря кабины пилотов из ПКМ на номенклатуру крупногабаритных агрегатов (табл. 4), которые входят в конструкцию планера вертолета Ми-171А3, предназначенного для работы в Арктических условиях.

Таблица 4

Масса крупногабаритных агрегатов планера вертолетов из металлических сплавов и ПКМ

Агрегат	Масса, кг		Разница массы конструкций ΔG , кг	Снижение массы, %
	Ми-171 (металл)	Ми-171А3 (ПКМ)		
Обтекатель: левый	4,827	1,569	3,258	67,50
правый	4,83	1,580	3,249	67,29
Люк аварийный	15,4	5,514	9,886	64,19
Дверь: в кабину пилотов сдвижная	10,35	6,009	4,341	41,94
	24,33	23,09	1,24	5,10
Панель боковая: левая	73,0	30,38	40,70	58,38
	60,16	34,33	25,83	42,94
Каркас фонаря кабины пилотов	72,00	58,00	14,00	19,44
Зашивка грузовых створок	86,57	73,98	12,59	14,54
Σ	351,46	236,45	115	33,3
Усредненное значение				41,7

Сравнительный анализ весовых характеристик агрегатов из ПКМ с аналогичными характеристиками агрегатов из металлических сплавов свидетельствует о снижении массы в абсолютном весе до 236,45 кг, что эквивалентно 33,3 %.

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

- масса пустого вертолета Ми-171 $m_{\text{пуст}} = 6800$ кг;
- стоимость летного часа Ми-171 $C_{\text{лч}} = 245629$ руб.;
- затраты на 1 кг массы пустого вертолета $F_{\text{пуст/1кг}} = 34$ руб.;
- годовой налет вертолета $t_{\text{год}} = 500$ ч.

Экономия на стоимости летного часа пустого вертолета E_y с учетом годового налета $t_{\text{год}}$ рассчитана по формуле

$$\begin{aligned} E_y &= t_{\text{год}}(C_{\text{лч пуст1}} - C_{\text{лч пуст2}}) = \\ &= t_{\text{год}}(m_{\text{пуст}}F_{\text{пуст/1кг}} - (m_{\text{пуст}} - 115)F_{\text{пуст/1кг}}) = \\ &= 500 \cdot (231200 - 227289,66) = 500 \cdot 3910,34 = 1955170 \text{ руб.}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $C_{\text{лч пуст1}}$ — стоимость летного часа пустого вертолета; $C_{\text{лч пуст2}}$ — стоимость летного часа пустого вертолета с учетом снижения массы конструкции в случае применения деталей из ПКМ.

Анализ полученных результатов. Проведенный сравнительный анализ значений ключевых характеристик вариантов проектных решений дал основания выделить два конструктивных решения: конструкцию из одной многослойной сэндвич-панели — КР № 2 и цельнокомпозиционную конструкцию — КР № 3. По сравнению с ключевыми характеристиками конструкции каркаса фонаря кабины пилотов вертолета-прототипа, в конструкциях КР № 2 и КР № 3, количество деталей уменьшилось на 91 % и 99 %, масса на 81 % и 80 % и расчетная трудоемкость изготовления на 24 % и 10 % соответственно.

Для более точного определения лучшего конструктивного решения из КР № 2 и КР № 3, в соответствии с теорией принятия решений [4], был использован принцип «минимум–максимум». Реализация данного принципа позволила:

- провести нормирование значений ключевых характеристик с учетом их максимальных (исходных по ТЗ) и минимальных (проектных) значений;
- выбрать наилучшие значения ключевых характеристик, которые соответствуют более совершенной конструкции.

По результатам расчета и анализа количественных значений показателя совершенства (7) можно также выделить эти же проектные решения.

Сравнительный анализ количественных значений частных характеристик свидетельствует, что в КР № 2 из одной многослойной сэндвич-панели уровень интегральности выше на 18 %, а величина трудоемкости ниже на 14 % по сравнению с вариантом КР № 3.

Экономия на стоимости летного часа одного пустого вертолета, спроектированного с учетом определения рационального уровня

интегральности, в данном случае оценивается примерно в 2 млн руб. в год на одну рабочую машину.

Заключение. На примере каркаса фонаря из ПКМ для кабины пилотов вертолета Ми-171А3 в работе поставлены задачи, включающие выбор подхода для определения комплексного критерия совершенства конструкции, разработку математической модели, расчет и определение рационального конструктивного решения. Эти задачи полностью выполнены.

Работоспособность представленной методики определения рационального уровня интегральности при проектировании агрегатов планера вертолетов из ПКМ обосновывается проведенным расчетом с последующей апробацией на производстве и соответствует научным рекомендациям. Полученные результаты работы применены при разработке производственной методики в рамках ОКБ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кисин И.Д. Разработка методики проектирования деталей ЛА из полимерных композиционных материалов. *Гагаринские чтения–2020: Сборник тезисов докладов*. Москва, МАИ, 2020, с. 67–68.
- [2] Кисин И.Д. Разработка методики проектирования деталей ЛА из полимерных композиционных материалов. *Сборник тезисов работ Международной молодежной научной конференции XLVII Гагаринские чтения 2021*. Москва, Изд-во «Перо», 2021, с. 42–44.
- [3] 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
- [4] Кривулин Н.К., Абильдаев Т., Горшечникова В.Д., Капаца Д., Магдич Е.А., Мандрикова А.А. О решении многокритериальных задач принятия решений на основе парных сравнений. *Компьютерные инструменты в образовании*, 2020, № 2, с. 27–58.
- [5] Вешкин Е.А., Сатдинов Р.А., Савицкий Р.С. Подход к выбору технологического режима изготовления ПКМ. *Труды ВИАМ*, 2021, № 11, с. 103–111.
- [6] Зобнин В.А. Разработка методики проектирования под заданную стоимость. *Труды VIII Форума Российского вертолетного общества*. Москва, Изд-во МАИ, 2008.
- [7] Башаров Е.А., Вагин А.Ю. Анализ применения композиционных материалов в конструкции планеров вертолетов. *Труды МАИ*, 2017, № 92. URL: https://mai.ru/upload/iblock/3a2/basharov_vagin_rus.pdf (дата обращения: 03.06.2025).
- [8] Данелян Т.Я. Формальные методы экспертных оценок. *Статистика и экономика*, 2015, № 1, с. 183–187.
- [9] Болдырев А.С. Основные понятия теории принятия решений. *Вестник Санкт-Петербургского университета МВД России*, 2013, № 1, с. 87–91.
- [10] Кисин И.Д. Разработка подхода к созданию критерия для определения оптимального уровня интегральности агрегатов планера вертолета из ПКМ. *Международный конгресс по аэронавтике: Сборник тезисов*. Москва, Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского, 2023, с. 894–896.

- [11] Бакулин В.Н., Гусев Е.Л., Марков В.Г. Методы оптимального проектирования и расчета композитных конструкций. *Оптимальное проектирование конструкций из композиционных и традиционных материалов*. Москва, Физматлит, 2008, 256 с.

Статья поступила в редакцию 23.05.2025

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

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. EDN TKEQZE

Кисин Иван Дмитриевич — инженер-конструктор 1-й категории, АО «Национальный центр вертолетостроения им. М.Л. Миля и Н.И. Камова».
e-mail: kisinid@mail.ru

Завалов Олег Анатольевич — канд. техн. наук, доцент, ведущий инженер кафедры 102 «Проектирование вертолетов», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). e-mail: zavalov_oa@mail.ru

Methodology to determine the rational integrity level in design and development of the helicopter airframe assembly constructed using polymer composite materials

© I.D. Kisin¹, O.A. Zavalov²

¹ Russian Helicopters, Lyubertsy, Tomilino, 140070, Russian Federation

² Moscow Aviation Institute (National Research University),
Moscow, 125993, Russian Federation

The paper uses an example of the Mi-171A3 helicopter cockpit canopy frame designed from the polymer composite materials (PCM) to present an approach and a set of measures adopted to develop a method for determining the rational integrity level in designing the PCM-made helicopter airframe units. Relevance of solving this problem could be substantiated by a general trend of expanding the scope of application of the PCM-made integral-type structures made in the helicopter technology, and the insufficiently studied computation base for establishing a rational integrity level. Analysis of the scientific papers indicates that integrity of the PCM-made is currently assessed empirically. The authors selected the Mi-171A3 helicopter canopy frame as the object of their study. The presented methodology takes into account the specific design criteria. Comprehensive criterion for the designed PCM-made structure is computed to determine the rational integrity level using the presented mathematical apparatus in the early stages of the helicopter design and development.

Keywords: *helicopter airframe units design, polymer composite materials, rational integrity level of the polymer composite structures, expert assessment of the design excellence*

REFERENCES

- [1] Kisin I.D. Razrabotka metodiki proektirovaniya detaley LA iz polimernykh kompozitsionnykh materialov [Development of a methodology for designing aircraft components from the polymer composite materials]. *Gagarinskije chteniya–2020: Sbornik tezisov dokladov* [Gagarin Readings–2020: Collection of Abstracts]. Moscow, MAI Publ., 2020, pp. 67–68.
- [2] Kisin I.D. Razrabotka metodiki proektirovaniya detaley LA iz polimernykh kompozitsionnykh materialov [Development of a methodology for designing aircraft components from the polymer composite materials]. *Sbornik tezisov rabot mezhdunarodnoy molodezhnoy nauchnoy konferentsii XLVII Gagarinskije chteniya 2021* [Collection of abstracts from the XLVII Gagarin Readings 2021 International Youth Scientific Conference]. Moscow, “Pero” Publ., 2021, pp. 42–44.
- [3] Kisin I.D., Zavalov O.A. Metod kolichestvennoy otsenki urovnya integralnosti kompozitnykh konstruktsiy agregatov planera vertoleta v zavisimosti ot ikh proektnykh parametrov [Quantitative method in assessing the integrity level of composite structures in the helicopter airframe units depending on their design parameters]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2025, iss. 2 (158). EDN ULJGRX
- [4] Krivulin N.K., Abildaev T., Gorshechnikova V.D., Kapatsa D., Magdich E.A., Mandrikova A.A. O reshenii mnogokriterialnykh zadach prinyatiya resheniy na osnove parnykh sravneniy [On solving multicriteria decision-making problems based on pairwise comparisons]. *Kompyuternye instrumenty v obrazovanii — Computer Tools in Education*, 2020, no. 2, pp. 27–58.

- [5] Veshkin E.A., Satdinov R.A., Savitsky R.S. Podkhod k vyboru tekhnologicheskogo rezhima izgotovleniya PKM [Approach to the selection of technological mode for the manufacture of PCM]. *Trudy VIAM — Proceedings of VIAM*, 2021, no. 11, pp. 103–111.
- [6] Zobnin V.A. Razrabotka metodiki proektirovaniya pod zadannuyu stoimost [Development of a design methodology for a given cost]. *Trudy VIII Foruma Rossiyskogo vertoletnogo obshchestva — Collection of works of the VIII Forum of the Russian Helicopter Society*. Moscow, MAI Publ., 2008.
- [7] Basharov E.A. Analiz primeneniya kompozitsionnykh materialov v konstruksii planera vertoletov [Analysis of polymeric composite materials application for helicopter airframe design]. *Trudy MAI*, 2017, iss. 92. Available at: https://trudymai.ru/upload/iblock/3a2/basharov_vagin_rus.pdf (accessed March 19, 2024).
- [8] Danelyan T.Ya. Formalnye metody ekspertnykh otsenok [Formal methods of expert estimations]. *Statistika i ekonomika — Statistics and Economics*, 2015, no. 1, pp. 183–187.
- [9] Boldyrev A.S. Osnovnye ponyatiya teorii prinyatiya resheniy [The basic concepts of decision theory]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta MVD Rossii — Vestnik of the St. Petersburg University of the Ministry of Internal Affairs of Russia*, 2013, no. 1, pp. 87–91.
- [10] Kisin I.D. Razrabotka podkhoda k sozdaniyu kriteriya dlya opredeleniya optimalnogo urovnya integralnosti agregatov planera vertoleta iz PKM [Development of an approach to creating criterion for determining the optimal integrity level for the PCM-made helicopter airframe assemblies]. *Mezhdunarodnyi kongress po aeronavtike. Sbornik tezisov [International Congress on Aeronautics. Collection of Abstracts]*. Moscow, Tsentralnyi Aerogidrodinamicheskiy Institut im. Prof. N.E. Zhukovskogo Publ., 2023, pp. 894–896.
- [11] Bakulin V.N., Gusev E.L., Markov V.G. *Optimalnoe proektirovanie konstruksiy iz kompozitsionnykh i traditsionnykh materialov* [Optimal design of structures from composite and traditional materials]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008, 256 pp.

Kisin I.D., Design Engineer of the 1st Category, Russian Helicopters.
e-mail: kisinid@mail.ru

Zavalov O.A., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Leading Engineer, Department 102 “Helicopter Design”, Moscow Aviation Institute (National Research University).
e-mail: zavalov_oa@mail.ru