

УДК 669.018-419.8

Оценка эффективности перспективных направлений модернизации беспилотных летательных аппаратов

В.Я. Петраш, И.К. Туркин

Аннотация

Приведен аналитический подход и предложены математически модели оценки эффективности перспективных направлений модернизации беспилотных летательных аппаратов (БЛА), базирующиеся на обобщенных понятиях эффективности, таких как качество, техническое совершенство. Рассмотрен пример оценки эффективности замены металлических материалов в конструкции БЛА на композиционные материалы, подтверждающий работоспособность предложенных моделей.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат; модернизация; эффективность; техническое совершенство; качество; технический уровень, композиционные материалы.

Введение

Модернизация является одним из этапов жизненного цикла изделия. Проблема обеспечения, эффективности и качества беспилотного летательного аппарата (БЛА) на всех стадиях его жизненного цикла является неотъемлемой частью общего процесса разработки, эксплуатации и модернизации БЛА. Формирование моделей обеспечения эффективности и качества БЛА – составная часть этого процесса. Выявить наиболее перспективные направления модернизации и оценить их эффективность – важнейшая задача проектных исследований.

Существуют различные подходы к решению этой задачи – аналитические, базирующиеся на оптимизационных моделях многокритериального сравнения вариантов, и экспертные, строящиеся на базе экспертных методов. В настоящей статье рассмотрен аналитический подход, позволяющий провести предварительную проектную оценку эффективности применения новых проектно-конструкторских решений при модернизации БЛА. Рассмотренный подход базируется на оценке эффективности как составной части более общих понятий – качество, техническое совершенство. При оценке того или иного варианта модернизации использован предложенный в работе [1] обобщенный показатель,

отражающий целевую эффективность, транспортное совершенство и затраты ресурсов. Для количественной оценки технического совершенства варианта применено понятие технического уровня изделия как относительной характеристики, основанной на сопоставлении значений показателей, характеризующих техническое совершенство модернизируемого изделия с соответствующими значениями базового, т.е. наиболее близкого по характеристикам, образца.

Следует отметить, что проблема модернизации БЛА тесно связана с жесткими требованиями по унификации и стандартизации, касающимися как самого аппарата, так и комплекса, составным элементом которого он является. Это относится, прежде всего, к минимальным изменениям внешне-габаритных размеров модернизируемого БЛА. Сохранение при модернизации летательного аппарата его внешних форм и геометрических размеров не приводит к необходимости внесения существенных изменений в конструкцию комплекса, в частности, пусковых установок, транспортно-пусковых контейнеров и другого вспомогательного оборудования, что является немаловажным в условиях жесткой экономии средств.

1. Формирование модели оценки эффективности модернизации БЛА

Обеспечение требуемого качества модернизации как одного из этапов жизненного цикла БЛА является одной из целей реализации концепции информационной поддержки изделий (ИПИ) или (CALS-технологии). Управление качеством (в терминах стандарта ИСО-9000) [1], относится к базовым технологиям управления. С этих позиций повышение эффективности изделия при его модернизации следует рассматривать как составную часть повышения его качества.

Качественно новые свойства модернизируемого изделия определяются исключительно научно-техническим прогрессом (НТП). Измерение уровня НТП, т.е. уровня новизны вносимых в конструкцию изменений по-существу отвечает смысловому содержанию оценки технического совершенства. Таким образом, техническое совершенство – это характеристика использования последних достижений НТП, которая придает БЛА новые качества, позволяет улучшить функциональные характеристики и повысить эффективность функционирования.

В качестве показателей, отражающих техническое совершенство модернизируемого образца, следовало бы принимать характеристики нововведений. Однако не менее важно степень новизны оценивать по результатам функционирования БЛА. Если какая-то характеристика изделия по своей природе является обобщенной, то по ее уровню, как

правило, и оценивается техническое совершенство. Такой содержательной интегральной характеристикой БЛА является его целевое качество, т.е. эффективность.

Целевая эффективность БЛА. На практике существуют различные подходы к оценке эффективности ЛА. Для беспилотных летательных аппаратов целевая эффективность – это системная характеристика, определяемая рамками функциональной операции. Непосредственное описание всей совокупности действий в сложной операции затруднительно в связи с их разнообразием и большим числом элементов системы, выполняющих эти действия. Поэтому при расчете выделяют типовые составляющие операции, для каждой из которых разрабатывают типовые математические модели.

Задачу оценки целевой эффективности операции чаще всего сводят к оценке эффективности одного БЛА, функционирующего в условиях типовой операции – W_I . Если один БЛА недостаточно эффективен, то предполагается использование наряда БЛА. При этом обычно считают, что все БЛА, участвующие в операции, функционируют в одинаковых условиях и имеют одинаковые значения показателя эффективности. Введение типовых операций и соответствующих им типовых моделей позволяет свести высокую степень неопределенности целевой обстановки и внешней среды к неопределенности принятых моделей, учесть опыт специалистов, упростить исследования, рассмотреть задачу для нескольких возможных моделей и принимать решение.

Транспортное совершенство БЛА. С общих позиций целевое предназначение любого БЛА состоит в транспортировке заданного целевого груза. Следовательно, транспортное совершенство может рассматриваться в качестве обобщенной характеристики целевого качества по доставке целевого груза в требуемую точку пространства. Следует отметить, что задачу доставки целевого груза в нужную область пространства и выполнения им поставленной задачи можно оценивать суммарным интегральным показателем целевой эффективности W_Σ , составной частью которого является вероятность эффективного функционирования БЛА W_I :

$$W_\Sigma = W_I A. \quad (1)$$

Здесь A – показатель транспортного совершенства БЛА.

В основе показателей оценки транспортного совершенства БЛА используются различные физические величины – работа, энергия, производительность, продолжительность функционирования или другие характеристики транспортировки. При этом необходимо эти характеристики увязывать с основными проектными параметрами БЛА. В работе [1] транспортное совершенство предлагается оценивать с позиции «эффект – затраты», где

эффект – характеристика (результат) процесса транспортировки целевого груза массой $m_{цз}$, а затраты – ресурс, потребный для реализации транспортной функции, оцениваемый величиной, пропорциональной суммарной энергии, которая требуется для транспортировки целевого груза:

$$A = m_{цз} V^2 L, \quad (2)$$

где V и L – средняя скорость и дальность полета БЛА.

Помимо этого, для обобщенной оценки «эффект – затраты» предлагается также добавить составляющую, учитывающую материальный ресурс, обеспечивающий транспортный процесс. Таким ресурсом является масса БЛА – m_0 .

Таким образом, обобщенный показатель, отражающий целевую эффективность, транспортное совершенство и затраты ресурсов, можно представить в относительном виде:

$$W_{\Sigma} = W_1 \frac{m_{цз} V^2 L}{m_0}, \quad (3)$$

Технический уровень изделия. В основе количественной оценки технического совершенства лежит технический уровень изделия. Технический уровень, как было отмечено выше, это относительная характеристика, основанная на сопоставлении значений показателей, характеризующих техническое совершенство изделия с соответствующими значениями базового образца.

В общем случае техническое совершенство изделия может быть достигнуто не только за счет НТП, но и простым увеличением массы. Поэтому оценку качества модернизации можно представить в виде суммы двух составляющих:

$$K^* = K_B + \Delta K^*, \quad (4)$$

где составляющая ΔK^* обеспечивается только за счет прогресса науки и техники.

В существующих нормативных документах техническое совершенство четко не определено, что затрудняет количественную оценку результативности НТП. Приведенное выражение конкретизирует это понятие и вычленяет новизну, т.е. ту часть качества, которая создается за счет прогресса науки и техники.

Количественная оценка технического совершенства определяет технический уровень изделия – относительную характеристику, основанную на сопоставлении значений показателей, характеризующих техническое совершенство изделия с соответствующими базовыми значениями, т.е.

$$K_{TV} = \frac{K_B + \Delta K^*}{K_B} = 1 + \frac{\Delta K^*}{K_B} \quad (5)$$

Анализ этого выражения показывает, что для количественной оценки технического совершенства и технического уровня модернизации необходимо определить приращение ΔK^* , обусловленное только НТП. Поскольку сравнению подлежат однотипные изделия с близкими характеристиками, то приращение ΔK^* можно рассматривать как полный дифференциал функции многих переменных, описывающих целевое качество БЛА.

При выборе в качестве показателя технического совершенства обобщенного показателя целевой эффективности в виде (3) искомый полный дифференциал будет иметь вид:

$$dK^* = \frac{\partial K^*}{\partial W_1} dW_1 + \frac{\partial K^*}{\partial m_{цз}} dm_{цз} + 2 \frac{\partial K^*}{\partial V} dV + \frac{\partial K^*}{\partial L} dL - \frac{\partial K^*}{\partial m_0} dm_0. \quad (6)$$

Для аналитического определения dK^* , необходимо иметь функциональные связи, определяющие приращения dW_1 , $dm_{цз}$, dV , dL , dm_0 . Такие связи практически отсутствуют, но значения приращений можно получить на основе сопоставления исследуемых и базового образцов изделий. Для близких по параметрам изделий вместо дифференциальных приращений можно использовать конечные приращения ΔW_1 , $\Delta m_{цз}$, ΔV , ΔL , Δm_0 . Используя конечные приращения, а также зависимости (3), (5), (6), можно получить выражение для технического уровня модернизированного БЛА. Для сравнительного анализа вариантов без большой погрешности можно пренебречь приращениями более высоких порядков. В этом случае линеаризованное выражение для технического уровня будет иметь вид:

$$K_{TV} = 1 + \frac{m_{0Б}}{m_0} \left(\frac{\Delta W_1}{W_{1Б}} + \frac{\Delta m_{цз}}{m_{цз.Б}} + 2 \frac{\Delta V}{V_Б} + \frac{\Delta L}{L_Б} - \frac{\Delta m_0}{m_Б} \right). \quad (7)$$

Это выражение отражает вклад в технический уровень каждого показателя технического совершенства изделия. Подчеркнем, что требуемые уровни технического совершенства обеспечиваются при модернизации БЛА только за счет нововведений.

2. Пример оценки эффективности замены металлических материалов конструкции БЛА на композиционные материалы

Для подтверждения работоспособности предлагаемой модели оценки эффективности модернизации БЛА рассмотрим пример замены металлических материалов в конструкции БЛА на композиционные материалы. Композиты обладают целым рядом преимуществ перед металлами, такими как высокая удельная прочность, жесткость, жаропрочность и др. Экономия массы, получаемая при использовании композиционных материалов, позволяет увеличить максимальную дальность полета БЛА, а, следовательно, расширить дальние

границы зон его функционирования, повысить целевую эффективность и технический уровень.

2.1 Проектный анализ базовых вариантов БЛА

В качестве базовых образцов рассмотрены два спроектированных в автоматизированной системе САПР-602 [2] варианта БЛА класса «поверхность-воздух», выполненные из различных металлических материалов, но выполняющие одну и ту же целевую задачу с одинаковыми тактико-техническими требованиями:

1). Отсеки конструкции корпуса *1-го варианта БЛА* изготовлены из алюминиевого сплава АМГ-6, однорежимный ракетный двигатель твердого топлива (РДТТ) выполнен из стали 30ХГСА.

2). Отсеки конструкции корпуса *2-го варианта БЛА* также изготовлены из алюминиевого сплава АМГ-6, а однорежимный РДТТ – из высокопрочного алюминиевого сплава В-96ЦЗ.

Основные тактико-технические данные базовых образцов БЛА:

- Расчетная горизонтальная дальность полета, м 45000
- Расчетная высота применения, м 25000
- Скорость цели, м/с 800
- Средняя скорость БЛА, м/с 1000
- Суммарная масса бортовой аппаратуры, кг 42
- Масса целевого груза, кг 70
- Тип системы управления (СУ) – комбинированная: инерциальная (ИНСУ) + активное радиолокационное самонаведение (АРЛС) методом пропорциональной навигации на конечном участке траектории.

Наиболее важные для последующего анализа результаты проектных расчетов базовых вариантов БЛА, изготовленных с использованием металлических материалов, приведены в табл. 1. Компоновочная схема спроектированного базового варианта БЛА, выполненного из алюминиевых сплавов, показана на рис.1. Внешний вид базового варианта БЛА со стальным РДТТ отличается незначительно лишь геометрическими размерами (см. табл. 1).

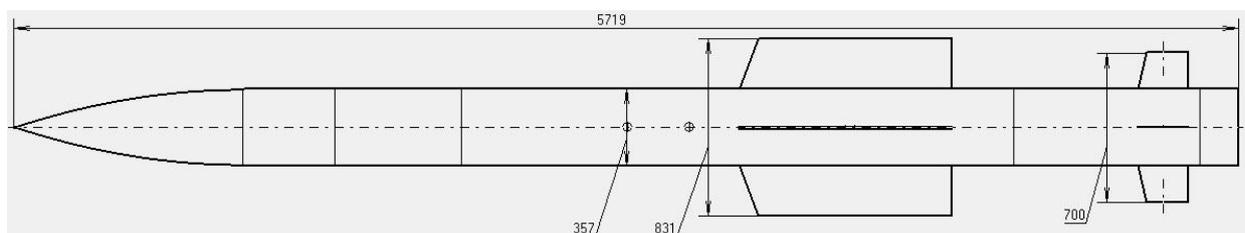


Рис.1. Компоновочная схема базового варианта БЛА, выполненного из алюминиевых сплавов

Таблица 1

Основные результаты проектных расчетов базовых вариантов БЛА

Наименование переменной, размерность	Вариант со стальным РДТТ	Вариант из алюминиевых сплавов
Стартовая масса, кг	615,9	571,1
Масса твёрдого топлива, кг	347,863	323,807
Масса РДТТ (без топлива), кг	61,405	44,296
Масса конструкции корпуса, кг	44,363	43,944
Координата центра масс ЛА с топливом, м	3,236	3,152
Координата центра масс ЛА без топлива, м	2,990	2,865
Разбежка центровки, %	4,209	5,006
Диаметр корпуса, м	0,365	0,357
Длина корпуса, м	5,834	5,719
Расчетная тяга РДТТ, Н	56554,2	53937,2
Время работы двигателя, с	16,3	16,4
Длина отсека с газоводом, м	0,890	0,873
Длина отсека с РДТТ, м	2,657	2,575
Длина отсека с сопловым блоком, м	0,182	0,179
Полная длина РДТТ, м	3,729	3,627
Суммарная длина отсеков конструкции корпуса, м	2,081	2,083

2.2 Оценка выигрыша в стартовой массе БЛА при замене металлических материалов конструкции БЛА на композиционные материалы

Полученные проектные характеристики базовых вариантов БЛА дают возможность провести оценку выигрыша в стартовой массе обоих вариантов, если отсеки конструкции корпуса и РДТТ изготовить из композиционных материалов при сохранении их функциональных характеристик и внешних размеров. В качестве исходного композиционного материалов для проведения анализа был выбран гипотетический карбофайбер с эпоксидной матрицей и наполнителем в виде углеродных волокон [3] (плотность 1460 кг/м^3 , предел прочности $96 \cdot 10^7 \text{ Па}$, модуль упругости $14 \cdot 10^{10} \text{ Па}$).

Исходной информацией для проектирования РДТТ служат полученные в результате общего проектирования базовых вариантов БЛА параметры и характеристики металлических РДТТ К их числу относятся: значения тяги, калибра (диаметра корпуса), времени работы, давления в камере сгорания, а также параметры топливного заряда и твердого топлива базовых вариантов. Для проектного расчета цилиндрических обечаек отсеков корпуса [4] использованы габаритные размеры отсеков корпусов базовых вариантов и расчетные нагрузки (изгибающие моменты и осевые силы) в наиболее нагруженных точках траекторий полета вариантов. Потребная для расчета массы корпуса толщина обшивки каждого отсека определялась максимальной из двух условий: местной устойчивости оболочки от воздействия сжимающих нагрузок и технологических ограничений.

Результаты сравнительного анализа массовых характеристик базовых и модернизированных вариантов БЛА приведены в табл.2.

Таблица 2

Результаты расчета массовых характеристик базовых и модернизированных вариантов БЛА

Масса, кг	Вариант 1			Вариант 2		
	Металлический	Из композитов	Δm , кг	Металлический	Из композитов	Δm , кг
Корпус	44,363	27,001	17,364	43,944	26,371	17,573
РДТТ	61,405	26,334	35,071	44,296	25,331	18,965
Стартовая масса	615,9	563,829	52,071	571,1	534,562	36,538

Таким образом, экономия стартовой массы БЛА при замене металлических конструкций на композитные составляет:

- для варианта 1 со стальным двигателем – 52,081 кг, что соответствует 8,45% от стартовой массы базового варианта;
- для варианта 2 с конструкцией из алюминиевых сплавов – 36,538 кг, или – 6,48% от стартовой массы базового варианта.

2.3 Проектная оценка увеличения дальности полета БЛА при уменьшении его стартовой массы

Уменьшение стартовой массы БЛА при сохранении габаритных размеров и запаса топлива позволяет улучшить его тактико-технические характеристики, в частности увеличить дальность полета, а, следовательно, расширить границы зон функционирования. С этой целью необходимо решить комплексную проектную задачу, рассмотренную выше. Особенностью ее решения является необходимость строгого выполнения тактико-

технических требований при уменьшении стартовой массы БЛА, в частности заданного граничного условия по средней скорости полета ($V_{cp}=1000\text{м/с}$), а также сохранения неизменных внешних форм БЛА.

Таким образом, задача определения выигрыша в дальности полета может быть сформулирована следующим образом. Определить приращение горизонтальной дальности полета БЛА Δx_k при уменьшении его стартовой массы на величину Δm_0 при условии выполнения дисциплинирующего граничного условия по средней скорости полета V_{cp} . Решение этой задачи реализуется путем организации итерационного процесса пошагового приращения горизонтальной дальности полета БЛА x_k до получения сходимости по требуемой величине средней скорости V_{cp} . [5] Достоверность результатов расчета обеспечивается выполнением задачи в рамках тех же комплексных программ проектирования, в результате которой получены облик, баллистические и массогабаритные характеристики базовых вариантов БЛА.

Результаты оценки влияния экономии стартовой массы Δm_0 на увеличение горизонтальной и наклонной дальности полета ($\Delta x_k, \Delta D$), а также относительной величины $\overline{\Delta D} = \Delta D/D_0$ для обоих модернизированных вариантов БЛА сведены в табл. 3

Таблица 3

Влияние экономии массы на увеличение дальности полета БЛА

Варианты	$\Delta m_0, \text{кг}$	$\Delta x_k, \text{м}$	$D_{max}, \text{м}$	$\Delta D, \text{м}$	$\overline{\Delta D}$
Вариант 1	36,538	18949,9	68662,9	17184,8	0,3338
Вариант 2	52,071	27427,5	76619,6	25141,5	0,4884

2.4 Оценка увеличения целевой эффективности и технического уровня БЛА при расширении границ зон его функционирования

Расширение дальних границ зон пуска и поражения БЛА позволяет увеличить число атак по цели за время нахождения ее в зоне пуска, а, следовательно, повысить вероятность ее поражения. При оценке этого показателя необходимо учитывать то, что БЛА, функционируя в составе комплекса, участвует в реализации типовых операций. Взаимодействие комплекса и средств нападения в таких операциях представляет собой случайный процесс, состояния которого дискретно изменяются во времени. Формализованное описание подобных процессов базируется на теории массового обслуживания [6].

При использовании теории массового обслуживания центральное место в описании операций отводится формализации потока заявок и алгоритма их обслуживания. Поток

заявок, т.е. поток средств воздушного нападения (СВН), обычно полагают случайным с пуассоновским законом распределения (называемым еще простейшим). Такое допущение обосновывается следующими обстоятельствами [7].

Во-первых, при оценке эффективности средств ПВО важно не завышать их боевые возможности. А так как к простейшему потоку системы массового обслуживания труднее приспособиться, чем к регулярным потокам, то оценка боевой эффективности комплекса будет проводиться в более сложных условиях, что может служить верным признаком того, что для случая регулярного потока целей в налете его боевая эффективность будет более высокой.

Во-вторых, в простейшем потоке временные промежутки между поступлением заявок подчиняются закону Пуассона, и при сложении нескольких потоков с любыми законами распределения интервалов между поступающими заявками образуется суммарный поток, который по своим характеристикам с увеличением числа слагаемых приближается к простейшему. При массовых налетах на широком фронте создаются именно такие условия, при которых закон распределения временных характеристик налета близок к пуассоновскому потоку.

Таким образом, для оценки увеличения эффективности БЛА при расширении границ зон пуска и поражения будем абстрагироваться от конкретных сценариев боевых операций СВН, считая поток целей случайным с пуассоновским законом распределения. Для определенности постановки задачи будем считать также, что по каждой цели производится определенное число пусков (воздействий), определяемых границами зон пуска и поражения.

Обозначим $P(m)$ - вероятность того, что по цели будет произведено m воздействий. Как уже было отмечено, взаимодействие комплекса БЛА и средств нападения представляет собой случайный процесс, состояния которого дискретно изменяются во времени, что приводит к тому, что случайным является и число воздействий по одной цели m с пуассоновским законом распределения, определяемым выражением [6]:

$$P(m) = \frac{(\lambda t)^m}{m!} e^{-\lambda t}, \quad (8)$$

где λ – средняя скорострельность комплекса, т.е. число пусков по цели в единицу времени;
 t – время нахождения цели в зоне пуска.

Обозначив вероятность поражения цели при одном воздействии – p_1 , будем считать воздействие, при котором поражается цель, успешным, или эффективным. Исходя из того условия, что число воздействий по цели m случайно, введем понятие средней

скорострельности эффективных пусков $\lambda^{\text{э}} = \lambda p_1$. Тогда число успешных или эффективных воздействий также будет подчиняться закону Пуассона:

$$P(m^{\text{э}}) = \frac{(\lambda^{\text{э}} t)^{m^{\text{э}}}}{m^{\text{э}}!} e^{-\lambda^{\text{э}} t} \quad (9)$$

При $m^{\text{э}}=0$ вероятность того, что цель не будет поражена, определяется выражением:

$$P(0) = P_{\text{нво}} = e^{-\lambda^{\text{э}} t} = e^{-\lambda p_1 t} \quad (10)$$

Таким образом, вероятность поражения цели, а, следовательно, и эффективность БЛА может быть представлена в виде:

$$W = P_{\text{нор}} = 1 - e^{-\lambda p_1 t} \quad (11)$$

Здесь λt – число пусков БЛА по цели за время t ; λ – скорострельность комплекса, т.е. число пусков по цели в единицу времени; t – период времени, в течение которого ведется атака цели.

Будем считать, что пуски БЛА по цели производятся до тех пор, пока она находится в зоне пуска, т.е. в качестве времени ее обстрела $t_{\text{обстр}}$ следует брать величину времени t , определяемую выражением:

$$t = t_{\text{обстр}} = t_1 + t_2, \quad (12)$$

Здесь t_1 – время полета цели от начала зоны пусков до начала зоны поражения. Поскольку первый выпущенный по цели БЛА может «встретиться» с ней в точке на максимальной границе зоны поражения с координатами (X_{max}, H_y) в предположении, что цель летит с постоянной скоростью V_y , то:

– t_1 – время полета БЛА до данной точки, т.е. $t_1 = t_k = D_{\text{max}} / V$,

– t_2 – время полета цели от точки с координатами (X_{max}, H_y) до точки, соответствующей пуску БЛА по цели на ближней границе зоны поражения $(X_{\text{б.з}}, H_y)$.

Очевидно, что:

$$t_2 = \frac{D_{\text{max}} - \frac{D_{\text{б.з}}}{V} V_y}{V_y} = \frac{D_{\text{max}}}{V_y} - \frac{D_{\text{б.з}}}{V} \quad (13)$$

Таким образом, время нахождения цели в зоне поражения определяется выражением:

$$t = t_{\text{обстр}} = \frac{D_{\text{max}}}{V} + \frac{D_{\text{max}}}{V_y} + \frac{D_{\text{б.з}}}{V} \quad (14)$$

При замене металлических конструкций модернизируемых вариантов БЛА на композитные выигрыш по стартовой массе Δm_0 приводит к увеличению максимальной дальности полета D_{max} на величину ΔD , а также времени обстрела цели на $\Delta t = t_{комп} - t_{мет}$.

Значения времен обстрела цели вариантами БЛА из композитов – $t_{комп}$ и базовыми вариантами БЛА с конструкцией из металлических материалов – $t_{мет}$ определяются по формуле (14) при значениях дальности полета D_{max} , соответствующих вариантам БЛА из композиционных и металлических материалов соответственно.

Если обозначить вероятность поражения цели вариантами БЛА с конструкцией из металлов – W_m , а вероятность поражения цели БЛА с конструкцией из композиционных материалов – W_k , то увеличение вероятности поражения цели при замене металлов на композиты за счет увеличения дальней границы зоны поражения в соответствии с (11) составит:

$$\Delta W = W_k - W_m = e^{-\lambda p t_m} - e^{-\lambda p t_k} \quad (15)$$

Переходя к числовым примерам, проведем оценку увеличения вероятности поражения цели обоими вариантами БЛА при замене металлических конструкций отсеков корпуса и РДТТ на композиционные материалы.

В соответствии с выражением (14) время обстрела цели исходными вариантами БЛА с конструкцией из металлических материалов составляет $t_{мет}=107,19с$; для модернизированного варианта 1 – $t_{комп1}=160,25с$; для модернизированного варианта 2 – $t_{комп2}=143,45с$;

Варьируя скорострельность БЛА λ , определяем: среднее число атак цели за время обстрела – λt ; значения эффективности поражения цели БЛА с конструкцией из металлов – W_m и из композиционных материалов – W_{k1} и W_{k2} ; абсолютное ΔW и относительное $\overline{\Delta W} = \Delta W / W_m$ увеличение эффективности вариантов БЛА при уменьшении стартовой массы.

Результаты расчетов при значениях вероятности поражения цели одним воздействием $p_1=0,8$ и $0,9$ приведены в табл. 4 и показаны на рис. 2 и 3.

Таблица 4

Оценка увеличение эффективности БЛА при замене металлических материалов конструкции на композиты

p_1	λ	λt_m	W_m	λt_{k1}	W_{k1}	ΔW_1	$\overline{\Delta W}_1$	λt_{k2}	W_{k2}	ΔW_2	$\overline{\Delta W}_2$
	0,01	1,07	0,5758	1,60	0,7225	0,1467	0,2548	1,43	0,6826	0,1068	0,1855
	0,015	1,61	0,7237	2,40	0,8538	0,1301	0,1798	2,15	0,8212	0,0975	0,1347

p_1	λ	λt_M	W_M	λt_{K1}	W_{K1}	ΔW_1	$\overline{\Delta W_1}$	λt_{K2}	W_{K2}	ΔW_2	$\overline{\Delta W_2}$
0,8	0,02	2,14	0,8201	3,21	0,9230	0,1029	0,1255	2,87	0,8993	0,0792	0,0966
	0,025	2,68	0,8828	4,01	0,9594	0,0766	0,0868	3,59	0,9432	0,0604	0,0685
	0,03	3,22	0,9237	4,81	0,9786	0,0550	0,0595	4,3	0,9680	0,0444	0,0480

Таблица4(продолжение)

p_1	λ	λt_M	W_M	λt_{K1}	W_{K1}	ΔW_1	$\overline{\Delta W_1}$	λt_{K2}	W_{K2}	ΔW_2	$\overline{\Delta W_2}$
0,8	0,035	3,75	0,9503	5,61	0,9887	0,0385	0,0405	5,02	0,9820	0,0317	0,0334
0,9	0,01	1,07	0,6189	1,60	0,7636	0,1447	0,2338	1,43	0,7250	0,1061	0,1714
	0,015	1,61	0,7648	2,40	0,8850	0,1203	0,1573	2,15	0,8558	0,0911	0,1191
	0,02	2,14	0,8548	3,21	0,9441	0,0893	0,1045	2,87	0,9244	0,0696	0,0814
	0,025	2,68	0,9103	4,01	0,9728	0,0625	0,0686	3,59	0,9603	0,0500	0,0549
	0,03	3,22	0,9447	4,81	0,9868	0,0421	0,0446	4,3	0,9792	0,0345	0,0366
	0,035	3,75	0,9658	5,61	0,9936	0,0277	0,0287	5,02	0,9891	0,0233	0,0241

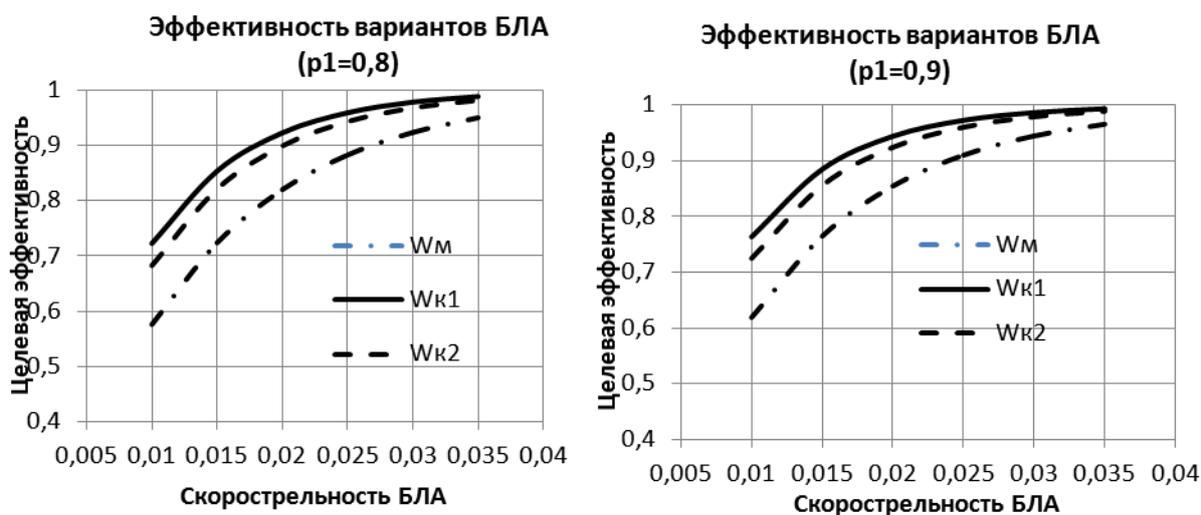


Рис. 2. Зависимость эффективности БЛА от скорострельности для металлических (W_M) и модернизированных вариантов из композиционных материалов (W_{K1} ; W_{K2})

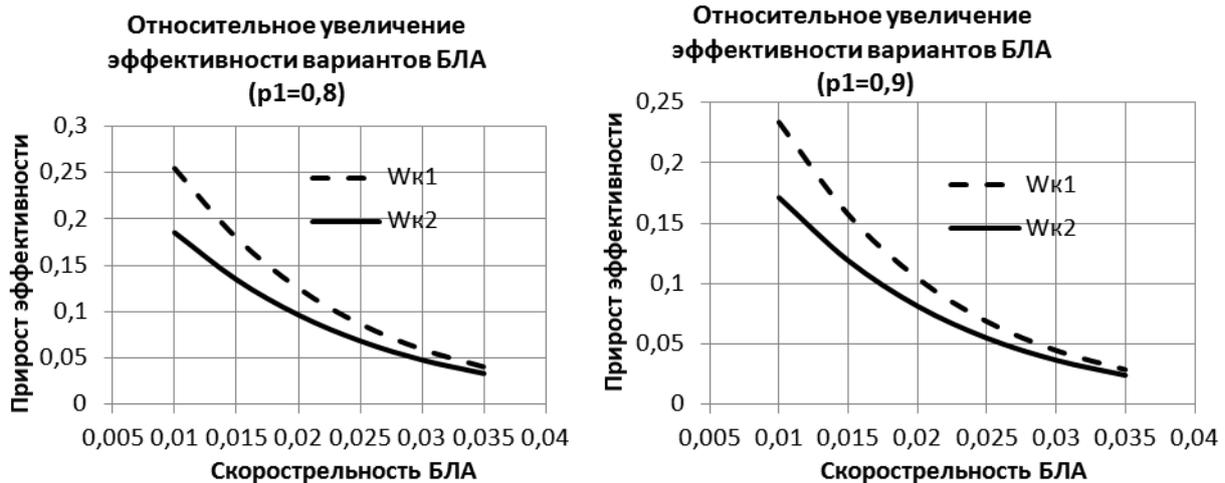


Рис. 3. Зависимость относительного увеличения эффективности вариантов БЛА от скорострельности при замене металлических конструкций на композиты

Анализ изменения показателей технического совершенства БЛА при замене металлических конструкционных материалов на композиты позволяет оценить технический уровень модернизированных вариантов в соответствии с выражением (7), которое может быть представлено в виде:

$$K_{TY} = 1 + \frac{m_{0m}}{m_{0к}} \left(\frac{\Delta W}{W_m} + \frac{\Delta D}{D_m} - \frac{\Delta m_0}{m_m} \right) = 1 + \frac{m_{0m}}{m_{0к}} (\overline{\Delta W} + \overline{\Delta D} - \overline{\Delta m}) \quad (16)$$

Результаты оценки технического уровня анализируемых вариантов БЛА, полученных путем замены металлических материалов их конструкции на композиты, приведены в табл. 5 и показаны на рис. 4.

Таблица 5

Параметры технического совершенства модернизированных вариантов БЛА, полученных путем замены металлических материалов их конструкции на композиты

p_1	λ	Вариант 1				Вариант 2			
		$\overline{\Delta W}_1$	$\overline{\Delta D}$	$-\overline{\Delta m}_0$	K_{TY}	$\overline{\Delta W}_2$	$\overline{\Delta D}$	$-\overline{\Delta m}_0$	K_{TY}
0,8	0,01	0,2548	0,4884	0,0845	1,9042	0,1855	0,3338	0,0648	1,6240
	0,015	0,3021	0,4884	0,0845	1,8222	0,1347	0,3338	0,0648	1,5697
	0,02	0,2338	0,4884	0,0845	1,7630	0,0966	0,3338	0,0648	1,5290
	0,025	0,0868	0,4884	0,0845	1,7207	0,0685	0,3338	0,0648	1,4990
	0,03	0,0595	0,4884	0,0845	1,6909	0,0480	0,3338	0,0648	1,4772
	0,035	0,0405	0,4884	0,0845	1,6701	0,0334	0,3338	0,0648	1,4615
	0,01	0,2338	0,4884	0,0845	1,8812	0,1714	0,3338	0,0648	1,6090

0,9	0,015	0,1573	0,4884	0,0845	1,7977	0,1191	0,3338	0,0648	1,5530
	0,02	0,1045	0,4884	0,0845	1,7400	0,0814	0,3338	0,0648	1,5128
	0,025	0,0686	0,4884	0,0845	1,7008	0,0549	0,3338	0,0648	1,4845
	0,03	0,0446	0,4884	0,0845	1,6746	0,0366	0,3338	0,0648	1,4649
	0,035	0,0287	0,4884	0,0845	1,6572	0,0241	0,3338	0,0648	1,4516

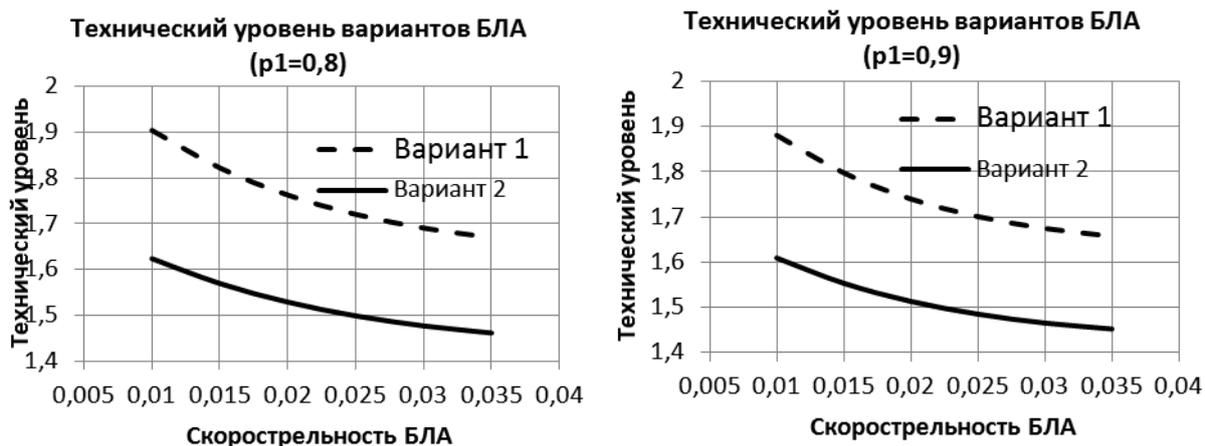


Рис. 4. Зависимость технического уровня модернизированных вариантов БЛА от скорострельности

Анализ полученных результатов показывает, что для всех значений вероятности единичного воздействия по цели p_1 технический уровень модернизированных вариантов существенно выше базовых образцов. При этом следует отметить, что при всех значениях скорострельности основная доля увеличения показателя технического уровня $K_{ТУ}$ достигается за счет составляющих прироста дальности и сокращения массы. Доля, определяемая ростом эффективности, особенно заметна при невысокой скорострельности БЛА в диапазоне $\lambda=(0,01-0,02)1/с$. Это объясняется тем, что именно в этом диапазоне отмечается заметное увеличение показателей эффективности БЛА (см. рис. 2, 3), вызванное увеличением числа пусков по цели за время обстрела λt .

Приведенная аналитическая оценка показателей эффективности и технического уровня модернизированных вариантов БЛА, позволяет сделать вывод о том, что с позиций качества и технического совершенства рассмотренный вариант модернизации вполне конкурентоспособен. Приведенный пример подтверждает также работоспособность предложенного аналитического подхода и моделей оценки эффективности перспективных направлений модернизации.

Библиографический список

1. Голубев И.С., Левочкин С.Б. Грани качества и конкурентоспособности летательных аппаратов. – М.: Изд-во МАИ, 2008, 223с.
2. Чернобровкин Л.С., Павленко В.К., Овчинников С.П. Программное обеспечение автоматизированного проектирования ЛА. – М: Изд-во МАИ, 1987, 69с.
3. Справочник по композиционным материалам, под ред. Любина Д.Г., кн.1,2. – М.: Машиностроение, 1988, 493с.
4. Туркин И.К. Проектирование Элементов конструкций ЛА с использованием композиционных материалов. – М: Изд-во МАИ, 1998, 61с.
5. Петраш В.Я., Коваленко А.И., Кучумов Д.В. Проектная оценка расширения дальней границы зоны применения при экономии массы ЛА. – М: Изд-во МАИ, 2006, 96с.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. Издание четвертое, стереотипное – М: Изд-во «Наука», 1969, 576с.
7. Проектирование зенитных управляемых ракет; под редакцией Голубева И.С., Светлова В.Г.– М: Изд-во МАИ, 2001, 730с.

Сведения об авторах

Сведения об авторах

Петраш Виктор Яковлевич, доцент Московского авиационного института (национального исследовательского университета), к.т.н., тел.: (495) 452-56-11, (916) 918-57-68,
e-mail: vik_43@mail.ru

Туркин Игорь Константинович, профессор Московского авиационного института (национального исследовательского университета), д.т.н., тел.: (495)614-15-29, (903)713,
e-mail: kafedra_602@mail.ru