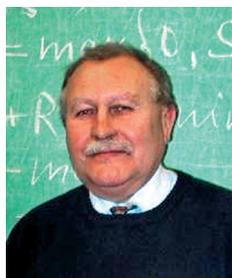


# Методический подход к определению показателей приоритета разведывательно-ударных и ударных беспилотных летательных аппаратов

Александр В. Крянев<sup>1</sup>, Сергей С. Семенов<sup>2\*</sup>, Алла Э. Калдаева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет (МИФИ), Российская Федерация, Москва, <sup>2</sup>АО «Государственное научно-производственное предприятие «Регион», Российская Федерация, Москва

\*gnppregion@sovintel.ru



Александр В.  
Крянев



Сергей С.  
Семенов



Алла Э. Калдаева

**Резюме. Цель.** Целью настоящей работы является разработка схемы оценки показателей приоритета разведывательно-ударных и ударных беспилотных летательных аппаратов (БЛА). **Методы.** При разработке схемы оценки показателей приоритета БЛА использован математический аппарат метрического анализа и известные экспертные оценки показателей для части БЛА. **Результаты.** Разработана схема оценки показателей приоритета БЛА. **Выводы.** Предложенная схема оценки приоритетности БЛА может быть использована при выборе рациональных решений при создании (покупке) БЛА.

**Ключевые слова:** выбор образца беспилотного летательного аппарата, оценка приоритетности, комплекс беспилотных летательных аппаратов, разведывательно-ударные беспилотные летательные аппараты, ударные беспилотные летательные аппараты, оценочные показатели, метрический анализ, экспертная оценка

**Для цитирования:** Крянев А.В., Семенов С.С. Калдаева А.Э. Методический подход к определению показателей приоритета разведывательно-ударных и ударных беспилотных летательных аппаратов // Надежность. 2020. №4. С. 50-60. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-4-50-60>

Поступила 22.07.2020 г. / После доработки 25.09.2020 г. / К печати 18.12.2020 г.

## Введение

Задача выбора очень важна как при покупке какой-либо продукции, так и при ее создании, особенно для сложных технических систем (СТС) и, прежде всего, для систем военного назначения.

Проектирование авиационной техники и оружия в настоящее время осуществляется на основе системного подхода с широким привлечением математического и полунатурного моделирования с последующим проведением наземных и натурных испытаний [1]. Это, в частности, было продемонстрировано в докладах на юбилейной Всероссийской научно-технической конференции «Авиационные системы в XXI веке» 26-27 мая 2016 года, организованной ГНЦ ФГУП «ГосНИИАС». На конференции было представлено ряд докладов, в частности, по проектированию беспилотных летательных аппаратов (БЛА) и ракетного вооружения. В одном из них сообщалось, что для исследования влияния проектных параметров на облик БЛА была разработана модельная система синтеза конструктивных характеристик, которая включает в себя основные расчеты по летно-техническим и экономическим характеристикам, что позволяет провести сравнительный анализ БЛА разных типов, обеспечивая наглядное отображение полученных характеристик и оценок. Таким образом, предпринята попытка проанализировать влияние новых и перспективных технологий на облик БЛА [2]. В другом докладе был рассмотрен подход к формированию облика системы и технических обликов беспилотных авиационных комплексов, обеспечивающих выполнение разведывательных и ударных задач. Предложена методика исследований, разработана структурная схема модельного аппарата, сформирована и обоснована система критериев эффективности функционирования рассматриваемой системы [3].

Известен широкий круг научно-технической литературы, посвященный как проектированию, так и выбору наилучших технических решений при создании сложных систем, основанный в том числе на оценке качества и технического уровня (ТУ). Библиографическое описание источников представлено в монографиях [4, 5]. О том, насколько актуален вопрос научно обоснованного выбора при разработке новой техники, в настоящее время свидетельствует публикация ряда монографий, посвященных методологии создания авиационной техники [6 – 9]. На практике при выборе авиационных комплексов и систем оружия широко используется принцип сопоставительного анализа, при котором сравнение объектов одинакового назначения производится с помощью критериев сравнения совершенства объектов по функциональному, техническому и экономическому признакам [8, 10]. Так, в статье [10] представлен пример выбора лучшего морского ракетного комплекса на основе сравнения характеристик, приведенных в едином формате данных, с учетом стоимости каждого элемента комплекса и его жизненного цикла в целом. По мнению авторов, в условиях дефицита времени

реализация такого подхода позволяет оптимизировать выбор ракетного комплекса и сэкономить значительные финансовые средства. Насколько сложен процесс принятия решения Индией о закупке самолета при выборе между «Рафаль» или «Тайфун», можно судить по материалам, приведенным в статье [11], при этом принимались во внимание такие показатели, как эффективность боевого применения по наземным целям и в воздушном бою, эксплуатационные свойства, степень совершенства радиоэлектронного оборудования, цена самолета, время реализации проекта. В результате Индией был выбран многоцелевой истребитель 4-го поколения «Рафаль» (Передача Индии первого истребителя «Рафаль». Экспресс-информация. 2020. №13. С. 2 (Авиационные системы). К числу эффективных мер по выбору СТС можно отнести его натурные испытания.

Необходимо также отметить, что современный этап развития авиационного вооружения характеризуется значительным увеличением объема задач, ставящихся перед ударным авиационным комплексом, и повышением требований к тактико-техническим характеристикам модернизируемых и разрабатываемых систем высокоточного оружия в условиях значительных бюджетных ограничений. В данных условиях в целях сокращения сроков разработки и принятия оптимального решения по выбору вариантов систем вооружения становится актуальной задача создания автоматизированных систем поддержки принятия решений. Причем под решениями предлагается понимать человеко-машинную систему, позволяющую специалистам использовать как объективные, так и субъективные данные для анализа и решения задач, в том числе плохо формализуемых. Например, были предложены методики по выбору рационального типажа авиационных боевых комплексов и рациональных вариантов авиационного вооружения на основе моделирования и оценки боевой эффективности и теории принятия решений [12-15]. В статье [16] предложен метод выбора рационального типа основных элементов разрабатываемых изделий вооружения и военной техники, основанный на применении экспертных процедур оценки и сравнения многокритериальных альтернатив в условиях неопределенности, предусмотренных методами анализа иерархий и теории принятия решений. К числу работ, посвященных проблеме выбора лучших технических решений, оценке качества и ТУ образцов вооружения и военной техники, в том числе с привлечением экспертов, следует отнести также работы [5, 6, 17].

Начальные этапы проектирования являются определяющими при формировании технического облика вновь создаваемой продукции и влияющими на уровень научно-технического задела. Проведенные системные исследования по определению характера развития СТС и оценке их качества и ТУ выявили общую закономерность в соотношении оценки влияния принятия решений и стоимости произведенных затрат на различных этапах жизненного цикла СТС, независимо от области научно-технической деятельности. Для авиационных

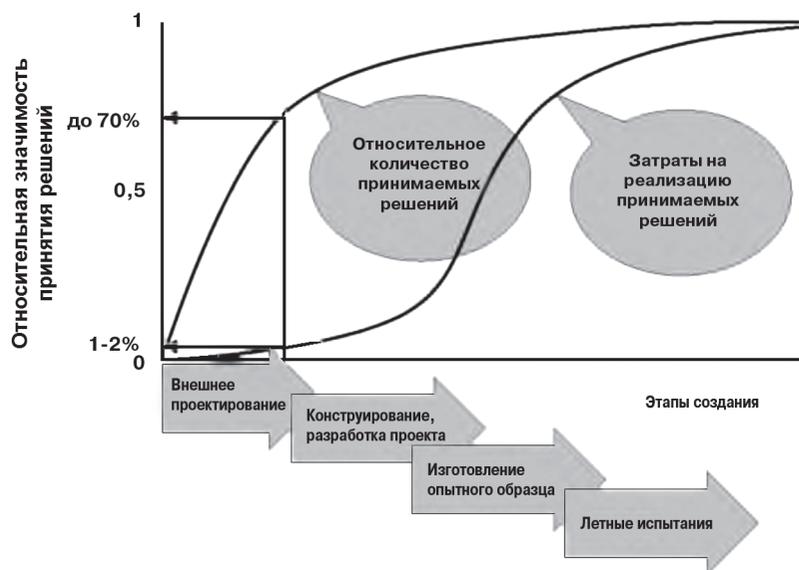


Рис. 1. Значимость принимаемых решений при создании авиационной техники

комплексов [18] значимость принятия концептуальных решений составляет до 70% от их общего числа, при этом затраты находятся на уровне 2% от общих затрат по созданию комплекса (рис. 1). На рис. 1 относительная значимость принятия решений определяется как относительное количество принимаемых решений.

Затраты на исправление выявленных ошибок многократно возрастают при отработке изделия и на последней стадии жизненного цикла проекта по сравнению со стоимостью таких изменений на самых ранних стадиях его разработки [19] (рис. 2).

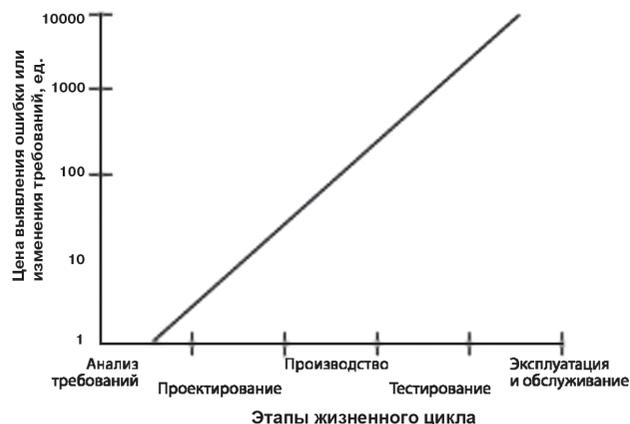


Рис. 2. Относительная стоимость исправления ошибок

Вот почему начальные стадии проектирования образца СТС, в том числе БЛА, следует считать основополагающими при формировании технического облика образца, а собственно процесс выбора рационального технического решения – концептуальным.

В данной работе предложена схема оценки показателей приоритета БЛА, основанная на использовании методов метрического анализа, применительно к боевым БЛА разведывательно-ударного и ударного назначения с взлетной массой от 300 до 25 000 кг и более, как к одному из перспективных направлений развития беспилотной техники. Использование методов метрического анализа для решения многих прикладных многомерных и многокритериальных задач показало его высокую эффективность [20–22]. В качестве основного признака классификации БЛА (планер, двигатель, системы навигации и управления и др.) в статье рассматривается взлетная масса (представлена в работах [23–26]), в которой отражается уровень конструктивных и схемно-технических решений. Именно масса БЛА определяет их энергетические характеристики, грузоподъемность и стоимость затрат на создание. Пример такой классификации для БЛА массой более 100 кг представлен в табл. 1 [23].

Общий вид некоторых образцов разведывательно-ударных и ударного БЛА представлен на рис. 3–6. Техническое совершенство БЛА проявляется в новизне и улучшении функциональных характеристик за счет внедрения достижений научно-технического прогресса. Уровень технического совершенства – это свойство образца, отражающее полноту использования в его составе лучших мировых технических достижений. Основываясь на анализе основных функций и состояний, присущих летательным аппаратам на различных стадиях жизненного цикла, в работе [27] предложено определять техническое совершенство по четырем комплексным показателям, характеризующих конструктивное, эксплуатационное, производственно-технологическое и функциональное совершенство. При этом под ТУ (как критерием технического совершенства) будем понимать совокупность свойств изделия, отражающих его техническое совершенство в сравнении с базовым образцом (аналогом). Оценка ТУ БЛА особенно очень важна как при формировании концепции, так и на ранних стадиях его создания. Чтобы

Табл. 1. Классификация БЛА, принятая в вооруженных силах США

Категория	Максимальная взлетная масса, кг	Максимальная высота (потолок), м	Продолжительность полета, ч
Средние	100 – 1500	3000 – 8000	2 – 24
Средневысотные с большой продолжительностью полета (MALE)	1500 – 2500	3000 – 8000	12 – 24
Высотные с большой продолжительностью полета (HALE)	2500 – 5000	5000 – 20 000	12 – 24
Ударные/боевые	–	8000 – 12 000	–

новое поколение БЛА было совершеннее существующего, необходимо обеспечить более высокий ТУ.

В данной статье для определения значимости анализируемого БЛА относительно других БЛА (что равносильно оценке ТУ), по которым уже заранее известна оценка их уровня, введено понятие «приоритетности» БЛА.

Предложенный методический подход к оценке приоритетности БЛА может быть использован при выборе рациональных решений при создании (покупке) БЛА.

Для оценки приоритетности БЛА приняты следующие оценочные показатели: взлетная масса БЛА, масса полезной нагрузки, продолжительность полета, дальность полета, крейсерская скорость полета, высота полета.



Рис. 3. Беспилотный летательный аппарат «Херон ТР» (Израиль)



Рис. 4. Беспилотный летательный аппарат «Клауд Шэдоу» (Китай)



Рис. 5. Европейский беспилотный летательный аппарат «Мантисс» (Великобритания)

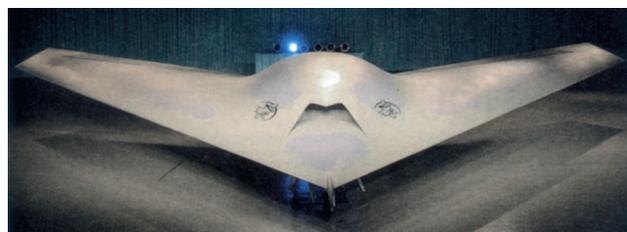


Рис. 6. Многоцелевой ударный беспилотный летательный аппарат «Фантом Рэй» (США)

## 1. Некоторые положения метрического анализа, используемые при оценке приоритета беспилотных летательных аппаратов

В настоящей работе для оценки БЛА, для которых отсутствует экспертная оценка, используется схема интерполяции, основанная на метрическом анализе. Задачи анализа и обработки данных приобрели особую актуальность с развитием компьютерных технологий. Метрический анализ позволяет эффективно решать различные задачи для функций многих переменных без фиксации априори вида функциональной зависимости от переменных, а используя лишь информацию, имеющуюся в реализованных значениях функции  $Y_1, \dots, Y_n$ , в точках  $X_1, \dots, X_n$  [20-22].

### 1.1. Интерполяция функций одной и многих переменных с помощью метрического анализа

Интерполяция в вычислительной математике – способ нахождения промежуточных значений функции по имеющемуся набору известных значений функции в конечном числе точек – значений аргументов функции.

Рассматривается задача, связанная с функциональной зависимостью

$$Y = F(X_1, \dots, X_m) = F(X) \quad (1)$$

где функция  $F(X)$  неизвестна и подлежит восстановлению либо в одной точке  $X^*$ , либо в совокупности заданных точек на основе известных значений функции  $Y_k$ ,  $k = 1, \dots, n$ , в фиксированных точках  $X_k = (X_{k1}, \dots, X_{km})^T$ . Точки  $X$  принадлежат единичному  $m$ -мерному кубу  $K \in E^m$  пространства  $E^m$ .

В пространстве  $E^m$  выбрана метрика, порожденная нормой:

$$\|X\|^2 = \sum_{j=1}^m w_j * X_j^2, \quad (2)$$

где метрические веса  $w_j \geq 0$ ,  $\sum_{j=1}^m w_j = m$ .

Метрические веса  $w_1, \dots, w_m$  – величины, учитывающие характер изменения исследуемой функции при изменении ее аргументов. Они вычисляются с учетом взаимного расположения узлов интерполяции и значений функции в них. Существенной частью предлагаемого метрического анализа является не априорное задание весов, определяющих норму, а выбор весов  $w_j, j = 1, \dots, m$ , по совокупности известных данных  $Y_k, X_k, k = 1, \dots, n$ .

Для определения метрических весов разработано несколько схем [20 – 22].

Необходимо восстановить значение функции в точке  $X^*$ .

Для решения этой задачи составляется матрица метрической неопределенности  $W$  для точки  $X^*$  относительно совокупности точек  $X_1, \dots, X_n$ . Матрица метрической неопределенности – матрица размерности  $(n \times n)$ , определяемая положением узлов интерполяции  $X_1, \dots, X_n$ , значением  $X^*$  и метрическими весами  $w_1, \dots, w_m$ :

$$W = \begin{pmatrix} p^2(X_1, X_1)_w & (X_1, X_2)_w & \dots & (X_1, X_n)_w \\ (X_2, X_1)_w & p^2(X_2, X_2)_w & \dots & (X_2, X_n)_w \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ (X_n, X_1)_w & (X_n, X_2)_w & \dots & p^2(X_n, X_n)_w \end{pmatrix} \quad (3)$$

где

$$p^2(X_i, X_i)_w = \sum_{k=1}^m w_k (X_{ik} - X_k^*)^2, \quad (4)$$

$$(X_i, X_j)_w = \sum_{k=1}^m w_k (X_{ik} - X_k^*)(X_{jk} - X_k^*), \quad i, j = 1, \dots, n. \quad (5)$$

Искомое значение  $Y(X^*)=Y^*$  определяется равенством:

$$Y^* = \frac{(w^{-1} Y, \mathbf{1})}{(w^{-1} \mathbf{1}, \mathbf{1})} \quad (6)$$

где  $\mathbf{1} = (1, \dots, 1)^T$ ,  $Y = (Y_1, \dots, Y_n)^T$ .

### 1.2. Определение метрических весов методом последовательного исключения аргументов

Если положить метрические веса  $w_1, \dots, w_m$  равными единице, то есть  $w_i=1, i = \overline{1, m}$ , то матрица метрической неопределенности будет учитывать только геометрическое расположение узлов интерполяции в исходном геометрическом пространстве. Однако с помощью соответствующего подбора значений метрических весов можно учитывать разный уровень изменения функции при изменении различных аргументов функции. В настоящей работе использовалась схема нахождения метрических весов, основанная на сравнении восстановленных значений функции в точках, в которых заданы значения функции с последовательным исключением каждого аргумента в отдельности [20].

## 2. Оценка приоритетности разведывательно-ударных и ударных беспилотных летательных аппаратов методом метрического анализа

Имеются данные по основным показателям БЛА (взлетная масса БЛА, масса полезной нагрузки, продолжительность полета, дальность полета, крейсерская скорость полета, высота полета (практический потолок)).

Эксперты разделили эти аппараты на несколько категорий (в зависимости от взлетной массы БЛА): первая – до 1650 кг; вторая – свыше 1650 кг и до 5000 кг; третья – свыше 5000 и до 10 000 кг; четвертая – свыше 10000 кг. В каждой категории эксперты смогли дать оценки показателю приоритетности в 100 балльной шкале некоторому количеству БЛА (см. табл. 2 – 5) с учетом оставшихся пяти показателей – масса полезной нагрузки, продолжительность полета, дальность полета, крейсерская скорость полета, высота полета.

Требуется, используя данные экспертами значения показателя приоритета для некоторых БЛА, определить неизвестные значения этого показателя для других БЛА.

Эта задача решается с помощью схемы, представленной выше в пунктах 1.1 и 1.2, в которой в качестве функции выступает показатель приоритета, а в качестве аргументов – указанные выше пять показателей БЛА.

Алгоритм решения задачи подсчитывает показатель приоритетности по формуле (6), где  $Y^*$  – показатель приоритетности рассматриваемого БЛА,  $X_k^*, k = 1, \dots, 5$  – пять вышеуказанных показателей этого БЛА.

Результаты оценок значений показателя приоритетности для всех БЛА представлены в последнем столбце табл. 6.

Табл. 2. Экспертные оценки приоритетности БЛА первой категории.

Взлетная масса БЛА, упорядоченная по возрастанию, $M_{взл}$ , кг	Отношение $M_{пн} / M_{взл}$	Продолжительность полета $T_{п}$ , ч	Дальность полета $D_{п}$ , км	Крейсерская скорость полета $V_{кр}$ км/ч	Высота полета (практический потолок) $H_{п}$ , м	Оценка эксперта по 100-балльной шкале
1100	0,32	36	4000	120	9100	100
1200	0,17	20	350	120	7000	65
1250	0,12	40	2500	800	6900	70
1300	0,46	25	1200	220	7000	80

Табл. 3. Экспертные оценки приоритетности БЛА второй категории.

Взлетная масса БЛА, упорядоченная по возрастанию, $M_{взл}$ , кг	Отношение $M_{пн} / M_{взл}$	Продолжительность полета $T_{п}$ , ч	Дальность полета $D_{п}$ , км	Крейсерская скорость полета $V_{кр}$ км/ч	Высота полета (практический потолок) $H_{п}$ , м	Оценка эксперта по 100-балльной шкале
3300	0.36	40	2000	220	7000	50
4000	0.10	12	1300	700	2000	20
4760	0.5	28	5900	425	15240	100

Табл. 4. Экспертные оценки приоритетности БЛА третьей категории.

Взлетная масса, БЛА упорядоченная по возрастанию $M_{взл}$ , кг	Отношение $M_{пн} / M_{взл}$	Продолжительность полета $T_{п}$ , ч	Дальность полета $D_{п}$ , км	Крейсерская скорость полета $V_{кр}$ , км/ч	Высота полета (практический потолок) $H_{п}$ , м	Оценка эксперта по 100-балльной шкале
5300	0.40	40	3700	300	13700	100
5600	0.13	30	7000	330	9000	50

Табл. 5. Экспертные оценки приоритетности БЛА четвертой категории.

Взлетная масса БЛА, упорядоченная по возрастанию $M_{взл}$ , кг	Отношение $M_{пн} / M_{взл}$	Продолжительность полета $T_{п}$ , ч	Дальность полета $D_{п}$ , км	Крейсерская скорость полета $V_{кр}$ , км/ч	Высота полета (практический потолок) $H_{п}$ , м	Оценка эксперта по 100-балльной шкале
16556	0.12	2	2400	988	12200	20
65000	0.37	30	7500	800	13000	100

Табл. 6. Основные летно-технические характеристики БЛА, связанные с взлетной массой.

Взлетная масса БЛА, упорядоченная по возрастанию $M_{взл}$ , кг	Масса полезной нагрузки / Отношение $M_{пн} / M_{взл}$	Продолжительность полета $T_{п}$ , ч	Дальность полета $D_{п}$ , км	Крейсерская скорость полета $V_{кр}$ , км/ч	Высота полета (практический потолок) $H_{п}$ , м	Оценка показателя приоритета
1	2	3	4	5	6	7
300	70 / 0,23	8	290	150	5000	43,31
450	150 / 0,33	20	200	130	6000	68,24
450	140/0,31	24	250	170	5500	69,47
640	220 / 0,34	30	3700	210	7500	86,21
650	55 / 0,08	24	150	220	7000	49,64
727	90 / 0,12	12	260	148	4500	35,84
1000	200 / 0,20	24	750	250	8000	63,97
1020	345 / 0,34	24	1100	148	7620	77,88
1040	204 / 0,2	20	740	130	7600	59,93
1100	350 / 0,32	36	4000	120	9100	<b>100,00</b>
1100	350 / 0,32	36	600	110	9000	91,88
1200	200 / 0,17	20	350	120	7000	<b>65,00</b>
1200	300 / 0,25	24	300	200	7500	67,79
1250	150 / 0,12	40	2500	800	6900	<b>70,00</b>
1260	345 / 0,27	30	2000	180	7200	77,29
1300	400 / 0,30	30	6000	240	9000	87,47
1300	600 / 0,46	25	1200	220	7000	<b>80,00</b>
1450	350 / 0,24	10	1300	480	7000	48,99
1450	300 / 0,20	22	260	287	7900	60,82
1451	489 / 0,34	30	800	250	9000	86,52
1500	400 / 0,27	35	2000	280	7500	82,47
1500	370 / 0,25	40	800	200	7500	85,81
1600	200 / 0,12	24	180	200	9000	58,17
1633	478 / 0,29	36	400	280	8840	86,96
1650	450 / 0,27	24	260	268	7800	69,77
2400	350 / 0,14	24	250	280	10600	63,05
2678	454 / 0,16	12	2800	720	12200	54,24
2800	400 / 0,14	35	6000	850	8000	69,73
2800	340/0,12	24	1000	600	8200	53,87
3000	400 / 0,13	6	2000	550	14000	49,74
3000	300 / 0,10	22	260	287	7900	50,96

Взлетная масса БЛА, упорядоченная по возрастанию $M_{взл}$ , кг	Масса полезной нагрузки / Отношение $M_{пн} / M_{взл}$	Продолжительность полета $T_{п}$ , ч	Дальность полета $D_{п}$ , км	Крейсерская скорость полета $V_{кр}$ , км/ч	Высота полета (практический потолок) $H_{п}$ , м	Оценка показателя приоритета
3000	100 / 0,03	32	800	2200	6500	36,36
3200	1000 / 0,31	45	250	240	7000	94,93
3250	300 / 0,09	35	200	600	6000	57,12
3300	1200 / 0,36	40	2000	220	7000	<b>50,00</b>
3500	600/0,14	20	250	400	600	35,78
4000	400 / 0,10	12	1300	700	2000	<b>20,00</b>
4200	480 / 0,11	32	2000	370	9000	66,13
4500	1360 / 0,30	24	400	390	14000	85,46
4760	1700 / 0,5	28	5900	425	15240	<b>100,00</b>
4760	1800/0,38	32	1852	313	15240	94,98
4763	1746 / 0,36	30	5900	425	15240	93,33
4800	1589 / 0,33	20	6000	647	18000	96,04
5000	480 / 0,09	12	2500	400	7400	39,32
5000	480 / 0,09	15	260	253	5100	36,52
5000	480 / 0,09	50	260	213	9100	83,10
5300	1800 / 0,40	40	3700	300	13700	<b>100,00</b>
5450	1000 / 0,18	3	1200	920	10700	40,25
5600	700/0,13	30	7000	330	9000	<b>50,00</b>
6000	600 / 0,10	25	3000	400	12200	65,44
6000	800/0,13	14	500	850	12000	49,87
6146	500 / 0,08	16	8149	592	13700	60,08
7000	800 / 0,11	20	2500	555	15240	65,84
7500	2000 / 0,26	48	1000	250	12000	95,02
8000	950/0,12	26	1000	950	12000	61,47
8255	2948 / 0,35	18	1600	650	15240	85,71
9000	1000 / 0,11	30	1600	370	16700	80,50
10000	2000 / 0,20	28	4000	960	15000	80,89
13000	2000 / 0,15	34	3000	730	13000	79,09
16556	907 / 0,05	12	2800	850	12200	42,55
16556	2040 / 0,12	7	2200	850	12200	43,41
16556	2000 / 0,12	2	2400	988	12200	20,00
20190	2040 / 0,12	12	2960	850	12200	49,38
22000	6010 / 0,27	16	7000	900	1200	47,85
25000	4000 / 0,16	15	6000	1500	15000	60,22
65000	24000 / 0,37	30	7500	800	13000	<b>100,00</b>

### 3. Объединение оценок нескольких экспертов

На практике нередкими являются ситуации, когда разные эксперты дают разную оценку какой-либо величины. Задача оценки приоритета БЛА не является исключением. В данном разделе статьи предложены четыре схемы объединения оценок различных экспертов. Ниже эти четыре схемы объединения оценок приоритетности приведены на примере первой категории БЛА: от 1000 до 1650 кг.

**Схема № 1.** В схеме № 1 по оценке каждого эксперта по отдельности оцениваются остальные БЛА, затем полученные оценки усредняются (табл. 7). Жирным шрифтом указаны БЛА, для которых эксперты дали

оценки; обычным шрифтом отмечены оценки, полученные методом метрического анализа.

Исходные показатели БЛА, представленные в табл. 6, были нормированы относительно математического ожидания и дисперсии:

$$\hat{X}_i = \frac{X_i - \mu}{\sqrt{\sigma^2}}.$$

**Схема № 2.** Согласно второй схеме объединения изначально для каждого оцененного БЛА оценки экспертов усредняются (берется среднее арифметическое оценок) для БЛА (табл. 8):

$$- \text{№ 10: средняя оценка } \frac{100+95+90}{3} = 95;$$

Табл. 7. Оценка показателя приоритета БЛА по схеме № 1 (усредненная оценка).

Номер БЛА	Взлетная масса БЛА, упорядоченная по возрастанию $M_{взл}$ , кг	Отношение $M_{пн} / M_{взл}$	Продолжительность полета $T_{пр}$ , ч	Дальность полета $D_{пр}$ , км	Крейсерская скорость полета $V_{кр}$ , км/ч	Высота полета (практический потолок) $H_{пр}$ , м	Оценки показателей приоритета (оценки экспертов выделены жирным шрифтом)			Оценка показателя приоритета
							1	2	3	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1000	0,20	24	750	250	8000	43,31	39,51	39,04	40,62
2	1020	0,34	24	1100	148	7620	68,24	68,73	69,99	68,99
3	1040	0,2	20	740	130	7600	69,47	70,47	68,09	69,34
4	1100	0,32	36	4000	120	9100	86,21	84,59	85,29	85,36
5	1100	0,32	36	600	110	9000	49,64	48,24	45,83	47,90
6	1200	0,17	20	350	120	7000	35,84	33,77	34,66	34,76
7	1200	0,25	24	300	200	7500	63,97	62,65	63,54	63,39
8	1250	0,12	40	2500	800	6900	77,88	76,57	76,31	76,92
9	1260	0,27	30	2000	180	7200	59,93	57,71	59,94	59,19
<b>10</b>	<b>1300</b>	<b>0,30</b>	<b>30</b>	<b>6000</b>	<b>240</b>	<b>9000</b>	<b>100,00</b>	<b>95,00</b>	<b>90,00</b>	95,00
11	1300	0,46	25	1200	220	7000	91,88	97,91	95,44	95,08
<b>12</b>	<b>1450</b>	<b>0,24</b>	<b>10</b>	<b>1300</b>	<b>480</b>	<b>7000</b>	<b>65,00</b>	<b>63,00</b>	<b>60,00</b>	62,67
13	1450	0,20	22	260	287	7900	67,79	69,54	67,21	68,18
<b>14</b>	<b>1451</b>	<b>0,34</b>	<b>30</b>	<b>800</b>	<b>250</b>	<b>9000</b>	<b>70,00</b>	<b>72,00</b>	<b>75,00</b>	72,33
15	1500	0,27	35	2000	280	7500	77,29	78,58	75,31	77,06
16	1500	0,25	40	800	200	7500	87,47	85,10	86,36	86,31
<b>17</b>	<b>1600</b>	<b>0,12</b>	<b>24</b>	<b>180</b>	<b>200</b>	<b>9000</b>	<b>80,00</b>	<b>84,00</b>	<b>85,00</b>	83,00
18	1633	0,29	36	400	280	8840	48,99	46,01	45,17	46,72
19	1650	0,27	24	260	268	7800	60,82	62,93	60,86	61,54

– № 12: средняя оценка  $\frac{65 + 63 + 60}{3} = 62,67$ ;

– № 14: средняя оценка  $\frac{70 + 72 + 75}{3} = 72,33$ ;

– № 17: средняя оценка  $\frac{80 + 84 + 85}{3} = 83$ .

А затем используется схема метрического анализа.

**Схема № 3.** Обычно оценки разных экспертов имеют разный вес в зависимости от опыта эксперта [4]. Следовательно, необходимо это учитывать для получения более точной итоговой оценки методом метрического анализа

$$K = \sum_{i=1}^n W_i * K_i, i = 1, \dots, n,$$

где  $\sum_{i=1}^n W_i = 1$ ,  $K_i$  – оценка показателя приоритета  $i$ -го эксперта.

Пусть вес 1-го эксперта равен 0,5; вес 2-го эксперта равен 0,3; вес 3-го эксперта равен 0,2, тогда оценка приоритетности для БЛА будет иметь вид (табл. 8):

– № 10:  $K_{10} = 0,5 \cdot 100 + 0,3 \cdot 95 + 0,2 \cdot 90 = 96,5$ ;

– № 12:  $K_{12} = 0,5 \cdot 65 + 0,3 \cdot 63 + 0,2 \cdot 60 = 63,4$ ;

– № 14:  $K_{14} = 0,5 \cdot 70 + 0,3 \cdot 72 + 0,2 \cdot 75 = 71,6$ ;

– № 17:  $K_{17} = 0,5 \cdot 80 + 0,3 \cdot 84 + 0,2 \cdot 85 = 82,2$ .

Результаты оценки БЛА по схеме № 3 приведены в табл. 9.

**Схема № 4.** В случае если веса  $W_i$  экспертов неизвестны, мы можем их найти, используя исходные оценки экспертов [20]:

$$W_i = \frac{1/\Delta_i^2}{\sum_{k=1}^n 1/\Delta_k^2},$$

$$\bar{K}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_{ij}, j = 1, \dots, m,$$

$$\Delta_i^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (K_{ij} - \bar{K}_j)^2,$$

где  $m$  – число оцениваемых БЛА,  $n$  – количество экспертов,  $K_{ij}$  – оценка показателя приоритета  $j$ -го БЛА на основе оценки  $i$ -го эксперта.

В результате выполнения расчетов были получены следующие значения веса каждого из трех экспертов:  $w_1 = 0,50$ ;  $w_2 = 0,02$ ;  $w_3 = 0,48$ .

Тогда получаем оценку приоритетности для четырех БЛА, оцененных экспертами:

– № 10:  $K_{10} = 0,5 \cdot 100 + 0,02 \cdot 95 + 0,48 \cdot 90 = 95,1$ ;

– № 12:  $K_{12} = 0,5 \cdot 65 + 0,02 \cdot 63 + 0,48 \cdot 60 = 62,56$ ;

– № 14:  $K_{14} = 0,5 \cdot 70 + 0,02 \cdot 72 + 0,48 \cdot 75 = 72,44$ ;

– № 17:  $K_{17} = 0,5 \cdot 80 + 0,02 \cdot 84 + 0,48 \cdot 85 = 82,48$ .

Табл. 8. Оценка приоритетности БЛА по схеме № 2 (усредненная оценка экспертов).

Номер БЛА	Взлетная масса БЛА, упорядоченная по возрастанию $M_{ВЗЛ}$ , кг	Масса полезной нагрузки $M_{ПН}$ , кг / Отношение $M_{ПН} / M_{ВЗЛ}$	Продолжительность полета $T_{П}$ , ч	Дальность полета $D_{П}$ , км	Крейсерская скорость полета $V_{КР}$ , км/ч	Высота полета (практический потолок) $H_{П}$ , м	Оценка приоритетности
1	1000	200 / 0,20	24	750	250	8000	42,36
2	1020	345 / 0,34	24	1100	148	7620	68,58
3	1040	204 / 0,2	20	740	130	7600	69,97
4	1100	350 / 0,32	36	4000	120	9100	86,49
5	1100	350 / 0,32	36	600	110	9000	47,86
6	1200	200 / 0,17	20	350	120	7000	34,1
7	1200	300 / 0,25	24	300	200	7500	63,22
8	1250	150 / 0,12	40	2500	800	6900	78,07
9	1260	345 / 0,27	30	2000	180	7200	58,58
<b>10</b>	<b>1300</b>	<b>400 / 0,30</b>	<b>30</b>	<b>6000</b>	<b>240</b>	<b>9000</b>	95,00
11	1300	600 / 0,46	25	1200	220	7000	92,01
<b>12</b>	<b>1450</b>	<b>350 / 0,24</b>	<b>10</b>	<b>1300</b>	<b>480</b>	<b>7000</b>	62,67
13	1450	300 / 0,20	22	260	287	7900	67,49
<b>14</b>	<b>1451</b>	<b>489 / 0,34</b>	<b>30</b>	<b>800</b>	<b>250</b>	<b>9000</b>	72,33
15	1500	400 / 0,27	35	2000	280	7500	77,07
16	1500	370 / 0,25	40	800	200	7500	86,75
<b>17</b>	<b>1600</b>	<b>200 / 0,12</b>	<b>24</b>	<b>180</b>	<b>200</b>	<b>9000</b>	83,00
18	1633	478 / 0,29	36	400	280	8840	49,21
19	1650	450 / 0,27	24	260	268	7800	60,25

Табл. 9. Оценка показателей приоритета БЛА по схеме № 3.

Номер БЛА	Взлетная масса БЛА, упорядоченная по возрастанию $M_{ВЗЛ}$ , кг	Масса полезной нагрузки $M_{ПН}$ , кг / Отношение $M_{ПН} / M_{ВЗЛ}$	Продолжительность полета $T_{П}$ , ч	Дальность полета $D_{П}$ , км	Крейсерская скорость полета $V_{КР}$ , км/ч	Высота полета (практический потолок) $H_{П}$ , м	Оценка показателей приоритета
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1000	200 / 0,20	24	750	250	8000	42,72
2	1020	345 / 0,34	24	1100	148	7620	68,53
3	1040	204 / 0,2	20	740	130	7600	69,87
4	1100	350 / 0,32	36	4000	120	9100	86,45
5	1100	350 / 0,32	36	600	110	9000	48,39
6	1200	200 / 0,17	20	350	120	7000	34,66
7	1200	300 / 0,25	24	300	200	7500	63,46
8	1250	150 / 0,12	40	2500	800	6900	78,05
9	1260	345 / 0,27	30	2000	180	7200	59,01
<b>10</b>	<b>1300</b>	<b>400 / 0,30</b>	<b>30</b>	<b>6000</b>	<b>240</b>	<b>9000</b>	96,5
11	1300	600 / 0,46	25	1200	220	7000	91,99
<b>12</b>	<b>1450</b>	<b>350 / 0,24</b>	<b>10</b>	<b>1300</b>	<b>480</b>	<b>7000</b>	63,40
<b>14</b>	<b>1451</b>	<b>489 / 0,34</b>	<b>30</b>	<b>800</b>	<b>250</b>	<b>9000</b>	71,60
15	1500	400 / 0,27	35	2000	280	7500	77,16
16	1500	370 / 0,25	40	800	200	7500	87,0
<b>17</b>	<b>1600</b>	<b>200 / 0,12</b>	<b>24</b>	<b>180</b>	<b>200</b>	<b>9000</b>	82,20
18	1633	478 / 0,29	36	400	280	8840	42,09
19	1650	450 / 0,27	24	260	268	7800	60,44

Табл. 10. Оценка приоритетности БЛА по схеме № 4 (с учетом веса каждого эксперта по его выборке)

Номер БЛА	Взлетная масса БЛА, упорядоченная по возрастанию $M_{взл}$ , кг	Масса полезной нагрузки $M_{пн}$ , кг / Отношение $M_{пн} / M_{взл}$	Продолжительность полета $T_{п}$ , ч	Дальность полета $D_{п}$ , км	Крейсерская скорость полета $V_{кр}$ , км/ч	Высота полета (практический потолок) $H_{п}$ , м	Оценка приоритетности
1	1000	200 / 0,20	24	750	250	8000	42,03
2	1020	345 / 0,34	24	1100	148	7620	68,26
3	1040	204 / 0,2	20	740	130	7600	69,69
4	1100	350 / 0,32	36	4000	120	9100	86,3
5	1100	350 / 0,32	36	600	110	9000	47,87
6	1200	200 / 0,17	20	350	120	7000	33,92
7	1200	300 / 0,25	24	300	200	7500	63,12
8	1250	150 / 0,12	40	2500	800	6900	77,8
9	1260	345 / 0,27	30	2000	180	7200	58,44
<b>10</b>	<b>1300</b>	<b>400 / 0,30</b>	<b>30</b>	<b>6000</b>	<b>240</b>	<b>9000</b>	<b>95,10</b>
11	1300	600 / 0,46	25	1200	220	7000	91,88
<b>12</b>	<b>1450</b>	<b>350 / 0,24</b>	<b>10</b>	<b>1300</b>	<b>480</b>	<b>7000</b>	<b>62,56</b>
13	1450	300 / 0,20	22	260	287	7900	67,32
<b>14</b>	<b>1451</b>	<b>489 / 0,34</b>	<b>30</b>	<b>800</b>	<b>250</b>	<b>9000</b>	<b>72,44</b>
15	1500	400 / 0,27	35	2000	280	7500	76,94
16	1500	370 / 0,25	40	800	200	7500	86,66
<b>17</b>	<b>1600</b>	<b>200 / 0,12</b>	<b>24</b>	<b>180</b>	<b>200</b>	<b>9000</b>	<b>82,48</b>
18	1633	478 / 0,29	36	400	280	8840	48,96
19	1650	450 / 0,27	24	260	268	7800	60,14

Результаты оценки БЛА по схеме № 4 приведены в табл. 10.

## Выводы

1. В работе показана актуальность задачи выбора и определения показателей приоритета различных образцов авиационной техники и вооружения, в том числе БЛА, на начальных этапах создания среди существующих или проектирования нового технического объекта.

2. Для решения задачи определения показателей приоритета БЛА использованы схемы метрического анализа, позволяющие по экспертным оценкам приоритета некоторых БЛА определить показатели приоритета всех остальных БЛА при знании исходных показателей по каждому оцениваемому БЛА.

3. В качестве исходных показателей при оценке приоритета БЛА приняты следующие: масса полезной нагрузки, продолжительность полета, дальность полета, крейсерская скорость полета, высота полета.

4. Представленные в статье схемы определения показателей приоритета могут быть использованы при выборе направлений дальнейшего развития БЛА различного предназначения, а также при покупке готовых БЛА.

## Библиографический список

1. Балько Ю.П., Горчица Г.И., Ермолин О.В. и др. Методологические основы создания систем и комплексов авиационного ракетного вооружения / Под ред. Ю.П. Балько. М.: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2012. 688 с.

2. Левина Е.С., Вавилов Д.С., Топоров Н.П. и др. Исследование влияния проектных параметров на облик характеристики ВПЛА // Юбилейная всероссийская научно-техническая конференция «Авиационные системы в XXI веке» (26-27 мая 2016 г., г. Москва): Сборник тезисов докладов. М.: ГНЦ РФ «ГосНИИАС», 2016. 300 с. С. 30.

3. Левков В.Г., Овчинников Д.И., Топоров Н.Б. и др. Методика формирования облика системы беспилотных АК, обеспечивающей выполнение разведывательных и ударных задач // Юбилейная всероссийская научно-техническая конференция «Авиационные системы в XXI веке» (26-27 мая 2016 г., г. Москва): Сборник тезисов докладов. М.: ГНЦ РФ «ГосНИИАС», 2016. 300 с. С. 31.

4. Семенов С.С. Оценка качества и технического уровня сложных систем: Практика применения метода экспертных оценок. М.: ЛЕНАНД, 2015. 352 с.

5. Семенов С.С., Воронов Е.М., Полтавский А.В. и др. Методы принятия решений в задачах оценки качества и технического уровня сложных технических систем / Под ред. д-ра техн. наук, проф. Е.Я. Рубиневича. М.: ЛЕНАНД, 2016. 520 с.

6. Платунов В.С. Методология системного военно-научного исследования авиационных комплексов. М.: Дельта, 2005. 344 с.

7. Барковский В.И., Скопец Г.М., Смыслов В.Д. Методология формирования технического облика экспортно ориентированных авиационных комплексов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 244 с.

8. Мышкин Л.В. Прогнозирование развития авиационной техники, теория и практика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 328 с.

9. Круглов В.И., Ершов В.И., Чумадин А.С. и др. Методология научных исследований в авиа- и ракетостроении. М.: Логос, 2011. 432 с.

10. Апанасенко В.М., Агейкин В.И. Алгоритм выбора морского ракетного комплекса с современной ракетой // Вооружение. Политика. Конверсия. 2006. № 4. С. 8-14.

11. Никольский М. Сравнительный анализ самолетов Дассо «Рафаль» и Еврофайтер «Тайфун» // Авиация и космонавтика. 2012. № 8 (17). С. 46–47.

12. Бешелев С.Д. Карпова И.В. Выбор перспективной техники с помощью метода экспертных оценок // Экономика и математические методы. 1972. Том VIII. Вып. 1. С. 117-121.

13. Габрелян К.А. Задача выбора рационального типажа авиационных боевых комплексов // Вооружение. Политика. Конверсия. 2002. № 3. С. 22-25.

14. Габрелян К.А. Выбор и формирование математической модели в задаче оценки эффективности авиационного боевого комплекса // Вооружение. Политика. Конверсия. 2002. № 4. С. 29-32.

15. Габрелян К.А. Методика выбора рациональных вариантов авиационного вооружения на основе теории принятия решений // Вооружение. Политика. Конверсия. 2003. № 3. С. 25–27.

16. Андреев А.Ю., Карпачев И.А., Пляскота С.И. Экспертный метод выбора основных элементов технических систем, комплексов и образцов военного назначения на основе обобщенных критериев «качество» и «стоимость» // Вооружение. Политика. Конверсия. 2009. № 6. С. 23-27.

17. Семенов С.С., Щербинин В.В. Оценка технического уровня систем наведения управляемых авиационных бомб. М.: Машиностроение, 2015. 326 с.

18. Желтов С.Ю. Современное состояние и перспективы развития технологий моделирования авиационных комплексов // Юбилейная Всероссийская научно-техническая конференция «Авиационные системы в XXI веке», Москва (26-27 мая 2016 г.): Сборник докладов. Том 1 (Пленарное заседание, секции 1-2). М.: ГНЦ РФ ФГУП «ГосНИИАС», 2017. 445 с. С. 9-30.

19. Романов А.А. Прикладной системный инжиниринг. М.: Физматлит, 2015. 555 с.

20. Крянев А.В., Лукин Г.В., Удумян Д.К. Метрический анализ и обработка данных. М.: Физматлит, 2012. 280 с.

21. Kryanov A.V., Ivanov V.V., Sevastianov L.A. et al. A review of metric analysis applications to the problems of interpolating, filtering and predicting the values of onevariable and multivariable functions // Communications in Computer and Information Science. 2018. Vol. 919. P. 457-468.

22. Kryanov A., Ivanov V., Romanova A. et al. Extrapolation of Functions of Many Variables by Means of Metric Analysis // EPJ Web of Conferences. 2018. Vol. 173.

23. Полтавский А.В., Бурба А.А., Лапсаков О.А. и др. Боевые комплексы беспилотных летательных аппаратов. Часть 1. Системная характеристика боевых комплексов

беспилотных летательных аппаратов / Научно-методический материал. Под ред. А.Н. Максимова. М.: ВВИА им. Проф. Н.Е. Жуковского, 2005. 237 с.

24. Шибяев В., Шнырев А., Буня В. Беспилотные авиационные системы: безопасность полетов и критические факторы // Аэрокосмический курьер. 2011. № 1 (73). С. 55-57.

25. Кошкин Р.П. Беспилотные авиационные системы. М.: Изд-во «Стратегические приоритеты», 2016. 676 с.

26. Никольский М. Российские ударные БПЛА самолетного типа // Аэрокосмическое обозрение. 2018. № 4. С. 14-19.

27. Голубев С.И. Соизмерение технического уровня и эффективности при проектировании конструкции ЛА. М.: Изд-во МАИ, 1986. 90 с.

## Сведения об авторах

**Крянев Александр Витальевич** – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Прикладной математики», Национальный исследовательский ядерный университет (МИФИ), Российская Федерация, Москва, e-mail: avkryanov@mephi.ru

**Семенов Сергей Сергеевич** – кандидат технических наук, руководитель группы анализа и перспективного проектирования, АО «Государственное научно-производственное предприятие «Регион», Российская Федерация, Москва, e-mail: gnppregion@sovintel.ru

**Калдаева Алла Эдуардовна** – студентка 1-го курса магистратуры, Национальный исследовательский университет высшей школы экономики, Российская Федерация, Москва, e-mail: kaldaeva.a@mail.ru

## Вклад авторов в статью

**Крянев А.В.** Предложен метод оценки показателей приоритета разведывательно-ударных и ударных БЛА с привлечением аппарата метрического анализа по заранее известным экспертным оценкам приоритета некоторой части БЛА и при знании основных оценочных показателей БЛА.

**Семенов С.С.** Рассмотрены различные методы выбора рациональных технических решений в области авиационных комплексов, представлена классификация и данные о разведывательно-ударных и ударных БЛА, предложен метод оценки показателей приоритета СТС на основе метрического анализа применительно к БЛА при различных схемах экспертных оценок.

**Калдаева А.Э.** Разработана программа на языке программирования Python, которая реализует математическую модель, основанную на метрическом анализе, проведены расчеты по оценке приоритетности БЛА.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.