

Научная статья
УДК 623.5

Аналитическая модель связи военно-технических характеристик образцов вооружения и военной техники с их боевым потенциалом

Александр Иванович Буравлев

Аннотация. В статье рассмотрена аналитическая модель, описывающая процесс боевого цикла ударного авиационного комплекса, включающего в себя этапы: подготовки к вылету, выхода в район боевых действий, поиск и обнаружение целей, атаку целей и выход из боя и возвращение на аэродром базирования. Каждый этап моделируется с использованием ключевых тактико-технических характеристик комплекса, отражающих его боевые возможности. Модель учитывает действие противоздушной обороны противника на всех этапах боевого применения ударного авиационного комплекса. В качестве показателя боевого потенциала ударного авиационного комплекса рассматривается среднее число пораженных элементарных целей за время существования ударного авиационного комплекса (среднее число совершенных боевых вылетов). Сравнительная оценка боевых возможностей ударного авиационного комплекса осуществляется по отношению их боевых потенциалов. В качестве эталонного ударного авиационного комплекса рассматривается типовой зарубежный образец, который может быть использован в боевых действиях. Проверка разработанной модели на тестовых задачах свидетельствует о высоком уровне ее адекватности. Предлагаемая аналитическая модель может быть использована для оперативной оценки боевых возможностей ударных образцов вооружения и военной техники в различных задачах военного планирования.

Ключевые слова: ключевые тактико-технические характеристики ударного авиационного комплекса; модель цикла боевого применения ударного авиационного комплекса; мультипликативная свертка тактико-технических характеристик в интегральный показатель военно-технического уровня

Для цитирования: Буравлев А.И. Аналитическая модель связи военно-технических характеристик образцов вооружения и военной техники с их боевым потенциалом // Вооружение и экономика. 2025. №4(74). С. 5-18.

Original article

Analytical Model of the Performance Characteristics Interrelationship of Military Equipment Samples and Their Combat Potential

Aleksandr I. Buravlev

Abstract. The article considers an analytical model that describes the combat cycle process of a strike aviation complex, which includes the stages: preparation for departure, entry into the combat area, target search and detection, target attack and exit from combat, and return to the home airfield. Each stage is modeled using the key tactical and technical characteristics of the complex that reflect its combat capabilities. The model takes into account the of the enemy's air defense actions at all combat stages of the strike aviation complex. The average number of elementary targets hitting during the existence of the strike aviation complex (the average number of completed sorties) is considered as its combat potential indicator. A comparative assessment of the complex combat capabilities is carried out in relation to their combat potentials. A typical foreign model that can be used in combat operations is being considered as a reference strike aircraft complex. The verification of the developed model on test tasks points at a high level of its adequacy. The proposed analytical model can be used for an operational assessment of the strike weapons and military equipment samples combat capabilities in various military planning tasks.

Keywords: key tactical and technical characteristics of the strike aviation complex; combat cycle model of the strike aviation complex employment; a multiplicative convolution of tactical and technical characteristics into an integral indicator of the military-tech

For citation: Buravlev A.I. Analytical Model of the Performance Characteristics Interrelationship of Military Equipment Samples and Their Combat Potential. Vooruzhenie i ekonomika = Armament and Economics. 2025; 74(4): 5-18. (In Russ.).

Введение

Боевые возможности различных образцов вооружения и военной техники (ВВТ) характеризуются совокупностью решаемых боевых задач, условиями боевого применения и тактико-техническими характеристиками, отражающими их функциональные свойства. Эту

совокупность целесообразно обозначить одним системным термином – *военно-технические характеристики*, учитывая их взаимосвязь и взаимовлияние на боевые возможности ВВТ и оснащаемые ими воинские формирования (ВФ).

Большинству образцов ВВТ, находящихся на вооружении сухопутных войск, авиации и флота, присущи следующие функциональные свойства [1]:

- огневая (ударная) мощь;
- подвижность (маневренность);
- разведывательные возможности;
- автономность действия;
- защищенность (живучесть);
- надежность.

Огневая (ударная) мощь характеризует способность образца ВВТ поражать объекты противника с заданной степенью. Количественно-качественными характеристиками огневой мощи выступают:

- боевая нагрузка, номенклатура и количество средств поражения (СП) в составе его боекомплекта;
- могущество СП, которое определяется размерами приведенной зоны поражения для заданной вероятности поражения объекта по определенному типу (*A, B, C, D*) и потребным нарядом СП;
- условия применения СП, максимальная и минимальная дальности, ракурсы и точность стрельбы;
- скорострельность (темп стрельбы) и количество каналов стрельбы.

Подвижность (маневренность) характеризует способность образца ВВТ изменять свое положение в пространстве и определяется такими показателями, как:

- средняя (крейсерская) скорость прямолинейного и равномерного движения;
- предельное линейное ускорение (перегрузка);
- минимальный радиус разворота.

Разведывательные возможности – это способность образца ВВТ самостоятельно или посредством внешнего целеуказания обнаруживать, распознавать и определять координаты местоположения целей и параметры их движения. Они характеризуются:

- числом каналов обнаружения целей в различных диапазонах спектров электромагнитных и звуковых колебаний;
- максимальной дальностью обнаружения объектов противника;
- точностью измерения координат местоположения обнаруженных целей;
- достоверностью распознавания типа целей;
- надежностью каналов управления.

Автономность характеризует способность образца ВВТ самостоятельно выполнять боевые задачи в течение определенного времени. Автономность определяется:

- максимальным запасом хода (дальностью полета);
- величиной (численностью и массой) боекомплекта СП;
- максимальной продолжительностью цикла автономной боевой работы.

Защищенность (боевая живучесть) определяет способность образца защищать и сохранять свой боевой потенциал от поражающих действий противника. Основными характеристиками защищенности образца ВВТ являются:

- заметность, характеризуемая эффективной площадью рассеяния (поглощения) излучения в оптическом, радиолокационном, радиационном диапазонах;
- помехозащищенность каналов управления;
- уязвимость, характеризуемая размерами приведенной зоны поражения (ПЗП) образца определенным типом СП.

Надежность характеризует способность образца ВВТ сохранять технические параметры функциональных свойств во времени в различных условиях эксплуатации. В зависимости от назначения образца ВВТ и условий его эксплуатации надежность может включать

в себя свойства безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости, а также определенные сочетания этих свойств¹.

Перечисленные выше свойства количественно выражаются посредством военно-технических характеристик (ВТХ). В совокупности ВТХ отражают *качество и пригодность образца* ВВТ для решения боевых и специальных задач [2; 3].

Применение образца ВВТ для решения боевой задачи дает определенный результат (*эффект*). Этот эффект с учетом случайно изменяющихся условий, а также характера и содержания боевой задачи, способов ее выполнения и выделяемых ресурсов, оценивается вероятностными показателями (вероятностью поражения цели, средним числом пораженных целей за период выполнения боевой задачи, средним временем восстановления боеспособности пораженного объекта и др.). Максимальный эффект, получаемый в расчетных условиях при полном (необходимом) объеме выделяемых ресурсов, характеризует предельные функциональные возможности образца ВВТ при выполнении боевой задачи. Эти предельные возможности принято называть *боевым потенциалом* образца ВВТ [1; 2; 4-6].

Термин *боевой потенциал* в отличие от *показателя качества* характеризует максимально возможную реализацию качества образца в его использовании по предназначению при обеспечении его всеми необходимыми ресурсами. Таким образом боевой потенциал отражает не только качество, но и потенциальный эффект применения образца ВВТ, т.е. его *эффективность* применения. Для оценки эффективности применения образец ВВТ должен быть «погружен» в некоторую «внешнюю» среду, характеризующую типовые условия функционирования объекта. Такой «внешней» средой являются математические и имитационные модели применения образцов ВВТ, полунатурные и натурные их испытания, войсковые учения и эксплуатация ВВТ.

В настоящее время существуют различного уровня сложности математические и имитационные модели, позволяющие достаточно адекватно описать весь процесс боевого применения как единичного образца ВВТ, так и их совокупности в составе ВФ различного уровня в различных сценариях вооруженного противоборства [1-9; др.]. Однако для оперативной оценки и прогнозирования результатов боевого применения ВВТ полезно иметь упрощенные аналитические зависимости боевого потенциала ВВТ от их ВТХ, а также их влияние на боевые потенциалы оснащаемых ВФ.

Для решения данной задачи используется методологический подход, изложенный в работах [1; 8]. Основными научно-методическими приемами данного подхода являются:

- *декомпозиция* исходной совокупности ВТХ на функциональные кластеры;
- *агрегирование* показателей внутри функционального кластера путем применения определенных сверток (агрегатов);
- *масштабирование* функциональных агрегатов относительно принятых норм (эталонов), в качестве которых выступают достигаемые предельные и/или реализованные в отечественных и зарубежных образцах ВТХ;
- *моделирование* процесса боевого применения образца ВВТ в заданных условиях боевого применения;
- *анализ* эффективности боевого применения образца ВВТ относительно отечественного или зарубежного образца-аналога.

Реализацию данного методологического подхода рассмотрим на примере ударных авиационных комплексов (УАК) тактического назначения, как типичных представителей современных высокотехнологичных образцов вооружения, способных решать широкий круг боевых задач в различных условиях.

¹ ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2021. 40 с.

1 Система агрегированных показателей военно-технического уровня ударного авиационного комплекса

Основываясь на работах [1-6; 9], рассмотрим следующий перечень агрегированных функциональных показателей УАК.

1. Транспортные возможности УАК характеризуются:

- грузоподъемностью $G_{БК}/G$, как отношение массы боекомплекта $G_{БК}$ к общей массе комплекса G ;
- топливемкостью G_T/G , как отношение массы топлива G_T к общей массе комплекса G ;
- километровым $q_L = G_T/L$ и часовым $q_t = G_T V_{КР}/L$ расходом топлива, где L , км – дальность полета, $V_{КР}$, м/с – крейсерская скорость полета.

Указанные показатели связаны между собой уравнениями баланса массы и сохранения количества движения:

$$G = G_0 + G_{Э} + G_T + G_{БК}; \quad G V_{КР} = F_{СУ} L; \quad P_{СУ} = F_{СУ} V_{КР},$$

где $F_{СУ}$, кГс – сила тяги; $P_{СУ}$, кВт – мощность силовой установки.

2. *Маневренные (динамические) возможности* УАК характеризуются следующим набором показателей:

- тяговооруженностью $F_{СУ}/G$, кГс/кг;
- крейсерской скоростью движения $V_{КР}$, м/с;
- скороподъемностью (скорость подъема летательного аппарата на заданную высоту за заданное время) $V_{СК}$, м/с;
- продольной и поперечной перегрузкой n_x, n_z ;
- радиусом разворота R , м и др.

Из уравнений для количества движения получаем удельную мощность силовой установки $P_{СУ}/G$ – функциональный агрегат, связывающую между собой транспортные и маневренные возможности летательного аппарата (ЛА):

$$P_{СУ}/G = F_{СУ}/G \cdot G_T/q_L \cdot V_{КР}/L, \text{ кВт/кг.}$$

3. *Боевые возможности* УАК характеризуются:

- дальностью обнаружения объектов поражения (целей) $D_{ОБН}$, км;
- дальностью стрельбы (применения) оружия D , км;
- массой боевой нагрузки $G_{БК}$, кг;
- площадью (радиусом) зоны поражения $S_{ПЗП}$, кв.м, объектов СП из состава БК;
- величиной кругового вероятного отклонения СП при стрельбе и бомбометании $E_{КР}$, м;
- заметностью ЛА, которая характеризуется эффективной площадью рассеяния (ЭПР) $S_{ЭПР}$, кв.м, отраженного электромагнитного излучения средств обнаружения.

Для определенного объекта поражения площадь его поражения СП увеличивается с увеличением его массы и наполнения взрывчатým веществом (ВВ). В этом случае удельный показатель $S_{ПЗП}/G_{СП}$, кв.м/кг, может служить показателем могущества СП.

Рассеивание СП при стрельбе характеризуется площадью рассеивания $S_P = \pi E_{КР}^2$. Для современных СП площадь рассеивания S_P , как правило, не превышает размеров цели. В этом случае соотношение $S_{ПЗП}/S_P$ может служить приближенной оценкой вероятности поражения цели одним СП:

$$W_{Ц} \approx 1 - \exp(-S_{ПЗП}/S_P).$$

Ниже эта формула будет получена как точное выражение для определенных условий стрельбы.

Если в составе БК имеется $n_{СП} = G_{БК}/G_{СП}$ и каждое СП осуществляет поражение типового объекта с вероятностью $W_{Ц}$, то среднее число пораженных объектов составит $n_{СП} W$. Тогда функциональный агрегат:

$$\mu = G_{БК}/G_{СП} \cdot S_{ПЗП}/S_P$$

может выступать в качестве показателя *могущества* боекомплекта УАК.

Площадь ЭПР, как показывают исследования, зависят от геометрии и площади поверхности ЛА, а значит и от его массы. В этом случае отношение $S_{ЭПР}/G$ может служить удельным показателем заметности ударного комплекса. Чем меньше данный показатель, тем меньше вероятность обнаружения его противником.

На основе рассмотренных характеристик можно сформировать четыре независимых показателя боевых возможностей УАК:

- дальность D_C , км;
- время реакции комплекса (выполнения атаки цели) $\tau_a = (D_{ОБН} - D_C)/V_{CP}$, мин;
- могущество УАК $\mu = G_{БК}/G_{СП} \cdot S_{ПЗП}/S_P$;
- заметность ударного комплекса $S_{ЭПР}/G$, кв.м/кг,

где: $V_{CP} = \sqrt{V_{KP}^2 + V_{CK}^2}$ – средняя скорость полета ЛА на боевом режиме.

4. *Эксплуатационная пригодность* УАК характеризуется показателями надежности, контролепригодности, эксплуатационной технологичности и безопасности применения. Основными из них являются:

- назначенный (технический) ресурс T_H , ч;
 - календарный срок службы t_{CC} , гг.;
 - коэффициент технической готовности $K_{ТГ} = \bar{t}_P / (\bar{t}_P + \bar{t}_B)$,
- где: \bar{t}_P – среднее время наработки до отказа; \bar{t}_B – среднее время восстановления работоспособности комплекса.

Календарный срок службы и технический ресурс совместно определяют располагаемый годовой ресурс комплекса $T_{Г} = T_H/t_{CC}$, ч/гг.

В результате агрегирования и масштабирования получаем совокупность независимых показателей, характеризующих функциональные возможности УАК:

- грузоподъемность $G_{БК}/G$,
- топливемкость G_T/G ,
- километровый расход топлива $q_L = G_T/L$,
- удельная мощность силовой установки $P_{СУ}/G$, кВт/кг,
- дальность комплекса D_C , км,
- время реакции комплекса $\tau_a = (D_{ОБН} - D_C)/V_{CP}$, мин,
- могущество боекомплекта $\mu = G_{БК}/G_{СП} \cdot S_{ПЗП}/S_P$,
- заметность комплекса $S_{ЭПР}/G$, кв.м/кг,
- коэффициент технической готовности $K_{ТГ} = \bar{t}_P / (\bar{t}_P + \bar{t}_B)$,
- располагаемый годовой ресурс $T_{Г} = T_H/t_{CC}$, ч/гг.

На базе перечисленных десяти показателей формируется мультипликативная свертка нормированных показателей K_i , ($i = \overline{1, m}$) взвешенная коэффициентами значимости [1]:

$$K_{ВТУ} = \prod_{i=1}^m K_i^{\alpha_i}, \quad (1)$$

где: $K_i = X_i/X_i^{\exists}$, если $X_i \geq X_i^{\exists}$ и $K_i = X_i^{\exists}/X_i$, если $X_i < X_i^{\exists}$; X_i, X_i^{\exists} – показатели исследуемого и эталонного образцов ВВТ; $0 < \alpha_i < 1$; $\sum_{i=1}^m \alpha_i = 1$ – коэффициенты значимости показателей, устанавливаемые экспертами; $m \leq 10$ – число учитываемых агрегированных показателей в конкретно решаемой задаче.

Применение мультипликативной, а не аддитивной свертки обусловлено логической необходимостью, так как именно все вышеуказанные показатели в совокупности обеспечивают функциональность образца ВВТ и ни один из них не может быть компенсирован другими показателями.

Использование мультипликативной свертки (1) позволяет интегрально оценить военно-технический уровень образца ВВТ относительно принятого эталона. При $K_{ВТУ} \geq 1 + \varepsilon$ исследуемый образец имеет военно-технический уровень выше, чем эталона; при $K_{ВТУ} \leq 1 - \varepsilon$ – соответственно, ниже эталона, а при $1 - \varepsilon < K_{ВТУ} < 1 + \varepsilon$ – практически

одинаковый с эталоном военно-технический уровень. Величина ε устанавливается также экспертами, как правило, на уровне $\varepsilon \leq 0,1$ и является компенсатором риска возможных погрешностей расчета показателя $K_{ВТУ}$ в силу неточности исходной информации.

Следующим шагом является установление функциональной связи между агрегированными показателями военно-технического уровня и показателями эффективности применения ВВТ, т.е. построение аналитической модели боевого применения образца ВВТ на примере УАК тактического назначения, как представительного объекта современного высоко-технологического образца вооружения и военной техники.

2 Вероятностная модель боевого применения ударного авиационного комплекса

Основу модели составляет цикл боевого применения УАК, повторяющийся один или несколько раз, в зависимости от характера решаемой боевой задачи в операции [1; 2] (рисунок 1).

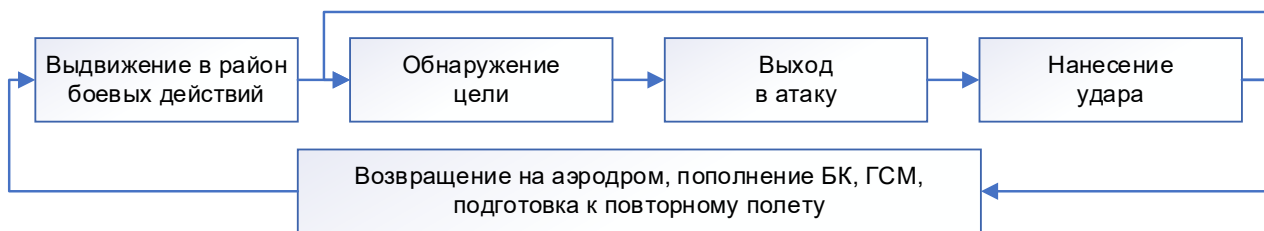


Рисунок 1 – Цикл боевого применения УАК

Цикл боевого применения представляет собой последовательность этапов, каждый из которых реализуется с некоторой вероятностью. Обозначим A_i – случайное событие, характеризующие выполнение i -го этапа, а $P(A_i)$ – вероятность его свершения. Реализация полного цикла характеризуется произведением событий $A = \prod_{i=1}^5 A_i$, а вероятность его реализации произведением вероятностей $P(A) = \prod_{i=1}^5 P(A_i | A_{i-1})$. Рассмотрим событие B_n , состоящее в том, что за время боевой операции состоится не более n циклов боевого применения УАК. Это событие представляет собой сумму событий:

$$B_n = \bar{A} + A \bar{A} + A^2 \bar{A} + \dots + A^{n-1} \bar{A},$$

каждое из которых характеризует невозможность продолжения последующих циклов в силу противодействия противника (уничтожение ЛА на аэродроме базирования, в воздухе при полете к цели, в процессе ее атаки и возвращения на аэродром базирования).

Вероятность данного события в предположении, что вероятность реализации одного цикла $P_{\text{ЦБП}} = P(A)$ сохраняется неизменной, равна:

$$P(B_n) = P(\bar{A})[1 + P(A) + P(A^2) + \dots + P(A^{n-1})] = (1 - P_{\text{ЦБП}})[1 + P_{\text{ЦБП}} + P_{\text{ЦБП}}^2 + \dots + P_{\text{ЦБП}}^{n-1}].$$

Учитывая, что сумма ряда $1 + P_{\text{ЦБП}} + P_{\text{ЦБП}}^2 + \dots + P_{\text{ЦБП}}^{n-1} = (1 - P_{\text{ЦБП}}^n)/(1 - P_{\text{ЦБП}})$, в итоге получаем:

$$P(B_n) = 1 - P_{\text{ЦБП}}^n, \quad (n = 1, 2, \dots). \quad (2)$$

Выражение (2) описывает *геометрическое* распределение случайного числа циклов $Y = 0, 1, 2, \dots$ боевого применения УАК: $P(B_n) = P(Y < n)$.

Вероятность противоположного события:

$$P(\bar{B}_n) = P(Y \geq n) = P_{\text{ЦБП}}^n$$

характеризует возможность комплекса реализовать не менее n циклов боевого применения и является представительным показателем его эффективности.

По функции распределения (2) нетрудно определить среднее число $m_Y = M[Y]$ реализованных циклов боевого применения за период операции $T_{\text{Оп}}$:

$$m_Y(T_{0П}) = \sum_{n=1}^{T_{0П}/\bar{t}_{ЦБП}} P(\bar{B}_n) = P_{ЦБП} [1 - P_{ЦБП}^{T_{0П}/\bar{t}_{ЦБП}}] / (1 - P_{ЦБП}), \quad (3)$$

где: $\bar{t}_{ЦБП}$ – среднее время выполнения одного цикла боевого применения.

Это время зависит от дальности и режима полета УАК, запаса топлива и его километрового расхода, величины боекомплекта СП, необходимого для выполнения боевой задачи и рассчитывается по известным методикам.

Дальнейшей задачей является установление зависимости вероятности реализации цикла боевого применения УАК $P_{ЦБП}$ от его ВТХ.

2.1 Модель оценки готовности УАК к боевому полету

В настоящее время известны аналитические модели, используемые для оценки боевой готовности УАК², основанные на полумарковских и марковских процессах [10; 11]. С помощью этих моделей можно рассчитывать коэффициент его технической и боевой готовности:

$$K_{БГ} = K_{ТГ} \bar{t}_{ЦБП} / (\bar{t}_{ЦБП} + \bar{t}_{ПП}), \quad (4)$$

где: $\bar{t}_{ЦБП}$ – среднее время цикла боевого применения УАК; $\bar{t}_{ПП}$ – среднее время подготовки комплекса к полету.

Коэффициент боевой готовности $K_{БГ}$ отражает не только исправность ЛА, но и его оснащение необходимым боекомплектом и готовность экипажа к боевому вылету.

2.2 Модель выхода УАК в район боевых действий

При выходе УАК в район боевых действий и обнаружении цели он подвергается воздействию средств ПВО противника, которая стремится как можно раньше обнаружить атакуемую воздушную цель и обезвредить ее. На этом этапе возможны следующие ситуации [4; 7; 12]:

- а) УАК наносит удар по наземной цели вне зоны действия объектового ПВО – $D_C^{УАК} > D_{ОБН}^{ПВО}$ – эта ситуация характеризует *полное опережение* атакующего УАК;
- б) УАК наносит удар по цели будучи обнаруженным объектовым ПВО – $D_C^{ПВО} < D_C^{УАК} < D_{ОБН}^{ПВО}$ – данная ситуация отражает *частичное опережение* УАК;
- в) УАК наносит удар по цели в зоне действия объектового ПВО – $D_C^{УАК} < D_C^{ПВО}$ – эта ситуация отражает *не опережение* УАК или полное опережение ПВО противника.

В силу случайного характера условий возникновения указанных ситуаций *мерой* возможности реализации этих ситуаций являются вероятности полного опережения $P_{ПО}^{УАК}$, частичного опережения $P_{ЧО}^{УАК}$ и не опережения $P_{НО}^{УАК}$ сторон в дульном противоборстве. Эти вероятности связаны между собой нормирующими соотношениями:

$$P_{ПО}^{УАК} + P_{ЧО}^{УАК} + P_{НО}^{УАК} = 1; \quad P_{ПО}^{ПВО} + P_{ЧО}^{ПВО} + P_{НО}^{ПВО} = 1; \quad P_{НО}^{ПВО} \leq 1 - P_{ПО}^{УАК}; \quad P_{ПО}^{ПВО} \leq 1 - P_{НО}^{УАК}.$$

Для расчета вероятностей опережения необходимо знать законы распределения дальностей обнаружения и стрельбы УАК и средств ПВО, либо проводить статистическое моделирование процесса противоборства. Приближенную оценку этих вероятностей можно дать, используя упрощенные распределения дальностей обнаружения и стрельбы в пределах минимально и максимально возможных их значений. Так, например, для равномерного распределения дальностей обнаружения и стрельбы:

$$f(D) = 1 / (D_{max} - D_{min})$$

условие полного опережения $D_C^{УАК} > D_{ОБН}^{ПВО}$ реализуется с вероятностью $P_{ПО}^{УАК} = 1$.

Условие частичного опережения $D_C^{ПВО} < D_C^{УАК} < D_{ОБН}^{ПВО}$ реализуется с вероятностью:

$$P_{ЧО}^{УАК} = (D_{ОБН_{max}}^{ПВО} - D_C^{УАК}) / (D_{ОБН_{max}}^{ПВО} - D_{C_{max}}^{ПВО}).$$

² Буравлев А.И., Волков С.В., Монсик В.Б., Попов И.С. Боевое применение и эффективность комплексов авиационного вооружения: учебник. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 1992. 237 с.

Условие не опережения $D_{ОБН_{max}}^{ПВО}$ реализуется с вероятностью $P_{НО}^{УАК} = 1$.

При известной вероятности поражения АУК средствами ПВО $W_{ПВО}$ в зоне ее действия можно рассчитать вероятность поражения АУК в ходе боя или операции в зависимости от его дальности $D_C^{УАК}$:

$$P_{ПВО}(D_C^{УАК}) = \left\{ \begin{array}{ll} 0, & D_C^{УАК} > D_{ОБН_{max}}^{ПВО} \\ \frac{(D_{ОБН_{max}}^{ПВО} - D_C^{УАК})W_{ПВО}}{(D_{ОБН_{max}}^{ПВО} - D_{C_{max}}^{ПВО})}, & D_{C_{max}}^{ПВО} < D_C^{УАК} < D_{ОБН_{max}}^{ПВО} \\ W_{ПВО}, & D_C^{УАК} < D_{C_{max}}^{ПВО} \end{array} \right\}. \quad (5)$$

Возможен и другой подход к оценке вероятности поражения УАК средствами ПВО. Если известна интенсивность $\lambda_{ПВО}$ обстрела атакующего ЛА ПВО на этапе от обнаружения цели до начала стрельбы, то в рамках гипотезы о пуассоновском потоке выстрелов вероятность поражения УАК рассчитывается по формуле:

$$P_{ПВО}(\tau_B) = 1 - \exp(-\lambda_{ПВО} W_{ПВО} \tau_B), \quad (6)$$

где: $\tau_B = (D_{ОБН_{max}}^{ПВО} - D_C^{УАК}) / \bar{V}_{CP}$ – продолжительность воздушного боя.

2.3 Модель обнаружения и атаки цели

Вероятность обнаружения целей ударным комплексом зависит от дальности их обнаружения $D_{ОБН}^{УАК}$ бортовыми или внешними средствами целеуказания и условий боевого применения. Для приближенной оценки вероятности обнаружения используется модель следующего вида [7; 13]:

$$P_{ОБН}^{УАК}(D) = \exp[-(D/\bar{D}_{ОБН})^\beta], \quad (7)$$

где: $\bar{D}_{ОБН}$ – средняя дальность обнаружения поражаемого объекта; β – показатель, характеризующий степень обнаружения объекта бортовыми информационными средствами в определенной среде и условиях.

Эта модель основана на гипотезе пропорциональной зависимости дальности обнаружения и площади ЭПР объекта для различных способов обнаружения:

$$D_{ОБН} \sim S_{ЭПР}^{1/\beta}. \quad (8)$$

Флуктуация площади $S_{ЭПР}$ часто моделируется экспоненциальным распределением $f_{ЭПР}(s) = \exp(-s/\bar{S}_{ЭПР})/\bar{S}_{ЭПР}$ в результате воздействия пуассоновского потока разного рода помех, где $\bar{S}_{ЭПР}$ – среднее значение площади ЭПР при заданном уровне мощности потока излучения. В этом случае, вероятность устойчивого обнаружения объекта будет составлять:

$$P_{ОБН}(S > \bar{S}_{ЭПР}) = \exp[-S/\bar{S}_{ЭПР}].$$

После подстановки сюда выражения (8) получаем исходную формулу (7).

Показатель степени β принимает следующие значения: 1 – для визуального обнаружения объектов; 2 – при обнаружении радиоизлучающих объектов радиотехническими средствами; 4 – при обнаружении радио отражающих объектов; 6 – при обнаружении подводных объектов с использованием ультразвукового излучения; 8 – при обнаружении подводных объектов с применением ультразвукового отражения. Так, например, для радиотехнических и радиолокационных систем дальность обнаружения объектов рассчитывается с использованием формулы радиолокации:

$$\bar{D}_{ОБН} = \gamma [P_{ПРД} G_A \lambda^2 \bar{S}_{ЭПР} / (4\pi)^3 P_{min}]^{1/4}, \quad (9)$$

где: $P_{\text{ПРД}}$, Вт – импульсная мощность передатчика; P_{min} , Вт – минимальная мощность шумов (чувствительность приемника); G_A – коэффициент усиления приемопередающей антенны; $S_{\text{ЭПР}}$, кв.м – площадь ЭПР объекта; λ , м – длина волны электромагнитного излучения; γ – коэффициент затухания радиоволн в атмосфере. Здесь показатель степени β составляет 4.

На рисунке 2 показаны графики зависимости вероятности обнаружения от дальности и способов обнаружения объектов.

Указанные выше значения коэффициентов β могут быть уточнены с учетом технических особенностей объектов, их характеристик заметности и средств обнаружения.

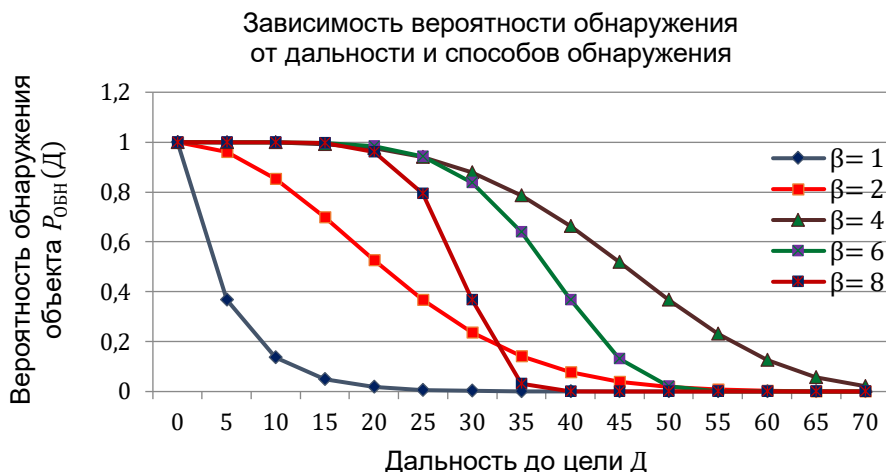


Рисунок 2 – Зависимость вероятности обнаружения от дальности и способов обнаружения

2.4 Модель атаки цели

Выполнение атаки (удара) определяется возможностью выхода ударного комплекса в определенную зону стрельбы, бомбометания, пуска ракет и прицеливания по объекту путем боевого маневрирования [2; 4; 7].

Успешность выхода ударного комплекса в позицию для атаки цели зависит от дальности обнаружения цели $D_{\text{обн}}$, точности определения ее координат относительно линии визирования, начальной дальности стрельбы D_c , маневренных характеристик комплекса – максимальной угловой ω_{max} и линейной скоростью V разворота, а также типом применяемых СП (неуправляемых, управляемых, корректируемых).

Для неуправляемых СП необходимо осуществлять стрельбу в упрежденную точку встречи СП с целью. Однако при маневрировании цели эта точка перемещается в пространстве, и пилот ЛА должен корректировать точку прицеливания и вести сопроводительную стрельбу до накрытия цели зоной поражения. При стрельбе самонаводящимися СП реализуется принцип «выстрелил и забыл»: СП после выстрела автоматически наводится на цель до накрытия ее зоной поражения. При стрельбе телеуправляемыми и корректируемыми СП УАК необходимо сопровождать СП до ее попадания в зону поражения цели. Каждый из способов применения требует разного времени нахождения УАК в зоне атаки цели, который подвергается обстрелу средствами ПВО и имеет разные шансы выживания.

Условием выхода в область стрельбы является дальность стрельбы D_c и углы визирования цели по курсу φ и высоте ε , из которой после выстрела СП, двигаясь по определенной траектории, попадает в зону поражения цели³. Границы этой области $\Omega_c = (D_c, \varphi, \varepsilon)$

³ Калабухова Е.П. Основы теории эффективности воздушной стрельбы и бомбометания: учебник. М.: Машиностроение, 1991. 332 с.

рассчитываются в БЦВМ системы управления вооружением (СУВ) ЛА и реализуются автоматически или с участием пилота.

В плоскости стрельбы, перпендикулярной линии визирования, проекцию области стрельбы можно представить кругом. Радиус круга $R_{Ц}$ определяется дальностью стрельбы D_C и величиной ошибок наведения ЛА на цель $\Delta\varphi$, $\Delta\varepsilon$:

$$R_{Ц} = D_C \Delta,$$

где: $\Delta = \sqrt{\Delta\varphi^2 + \Delta\varepsilon^2}$ – величина суммарной ошибки наведения ЛА в область стрельбы.

Для успешного выполнения атаки необходимо, чтобы из области стрельбы на определенной дальности осуществлялось попадание снаряда в зону поражения цели, т.е. необходимо выполнение условия $R_{Ц} < r_{П}$.

При нормальном распределении случайных ошибок прицеливания (выведения ЛА в область стрельбы) вероятность успешной атаки рассчитывается по формуле:

$$P_A = P(R_{Ц} < r_{П}) = 1 - \exp(-r_{П}^2 / 2D_C^2 \sigma_{\Delta}^2), \quad (10)$$

где: $r_{П}$ – радиус поражения цели; σ_{Δ} – суммарное СКО ошибок прицеливания.

На рисунке 3 приведен график зависимости $P_A(D_C)$ при стрельбе из пушки и НАР для исходных данных: $r_{П} = 12$ м; $\sigma_{\Delta} = 0,05$ рад.

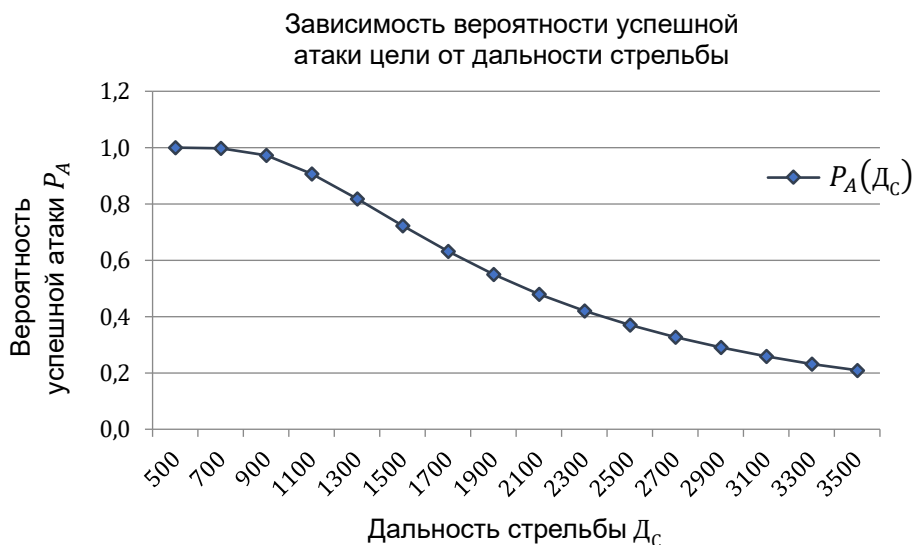


Рисунок 3 – Зависимость вероятности успешной атаки цели от дальности стрельбы

По известным значениям $r_{П}$, σ_{Δ} и заданной вероятности успешной атаки $P_A^{зад}$ по формуле (8) можно оценить требуемую дальность стрельбы:

$$D_C = r_{П} / \sigma_{\Delta} \sqrt{-2 \ln(1 - P_A^{зад})}.$$

Полученные выше расчетные модели позволяют рассчитать общую вероятность реализации всего цикла боевого применения, включая выход из боя и возвращение на аэродром:

$$P_{ЦБП} = K_{БГ} P_{ОБН} (1 - P_{ПВО1}) P_A (1 - P_{ПВО2}), \quad (11)$$

где: $P_{ПВО1}$, $P_{ПВО2}$ – вероятности поражения ЛА средствами ПВО при полете ЛА в район боевых действий и обратно.

2.5. Модель эффективности поражения целей в одном цикле боевого применения

Основным показателем успешной реализации атаки цели является вероятность поражения одиночного объекта W СП боекомплекта с заданной степенью поражения [2]. В составе боекомплекта могут быть СП различного типа, предназначенные для поражения целей различного назначения. Методами теории эффективности для каждой цели i -го типа $i = \overline{1, n}$ определяется оптимальный вариант снаряжения УАК средствами поражения j -го типа $j = \overline{1, m}$ по минимальному среднему числу СП $\hat{\omega}_i = \min(\omega_{ij})$, $j = \overline{1, m}$ необходимому для поражения цели с заданной вероятностью [2; 14; 15]. С учетом частоты применения комплекса по разным объектам $\rho_i \geq 0$; $\sum_{i=1}^n \rho_i = 1$, среднее число потенциально поражаемых целей i -го типа может составить:

$$\bar{N}_{\text{Ц}i} = \rho_i N_{\text{БК}} / \hat{\omega}_i,$$

где: $N_{\text{БК}}$ – общая численность СП в боекомплекте УАК.

Совокупность потенциально поражаемых целей $\bar{N}_{\text{Ц}} = (\bar{N}_{\text{Ц}i}, i = \overline{1, n})$ в одном цикле боевого применения УАК характеризует достигнутый эффект выполнения боевой задачи. Частота применения УАК по определенным объектам также характеризует их важность (значимость) для ведения боевых действий.

Использование векторной оценки существенно усложняет анализ достигнутого эффекта, особенно при сравнении различных комплексов [15]. Возникает необходимость ввести для вектора $\bar{N}_{\text{Ц}}$ определенную норму, которая, с одной стороны была математически корректной, а с другой, – имела физический смысл. Естественной нормой может служить среднее число пораженных целей в каждом цикле боевого применения, представляющее собой неотрицательную линейную форму:

$$\bar{N}_{\text{Ц}} = \|\bar{N}_{\text{Ц}}\| = \sum_{i=1}^n \bar{N}_{\text{Ц}i}. \tag{12}$$

Нетрудно проверить, что все свойства нормы линейного векторного пространства выполняются.

Численность боекомплекта $N_{\text{БК}}$ и его масса связаны с численностью и массой входящих в него СП $G_{\text{БК}} = \sum_{j=1}^m N_{\text{БК}j} G_{\text{СП}}$, а эффективность действия СП характеризуется величиной приведенной площади зоны поражения цели $S_{\text{ПЗП}}$ и вероятностью поражения цели $W_{\text{Ц}}$. В теории боевой эффективности между этими показателями установлены аналитические зависимости для различных типов СП и поражаемых целей [2; 13; 16; 17], позволяющие оценить вероятность накрытия цели зоной поражения СП с учетом их могущества и заданной степени поражения (A, B^*, C^*). ПЗП может быть представлена кругом, эллипсом или прямоугольником в зависимости от располагаемых исходных данных об уязвимости объектов и могущества средств их поражения.

Круговая зона поражения с радиусом поражения $r_{\text{П}}$ удобна простотой ее математического описания. Если случайные координаты (X, Z) точки разрыва СП относительно точки прицеливания (центра цели) распределены приближенно по нормальному закону с нулевым сдвигом и примерно одинаковыми СКО σ_X, σ_Z , то радиус зоны рассеивания СП $R_C = \sqrt{X^2 + Z^2}$ имеет распределения Релея с плотностью $f(r) = r/\sigma_R^2 \cdot \exp(-r^2/2\sigma_R^2)$.

В этом случае вероятность поражения элементарной цели состоит в накрытии ее круговой зоной поражения и составляет величину:

$$W_{\text{Ц}} = P(R_C < r_{\text{П}}) = 1 - \exp(-r_{\text{П}}^2/2\sigma_R^2),$$

где: $\sigma_R = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Z^2}$ – среднее геометрическое значение СКО для радиуса зоны рассеивания СП. Если умножить и разделить показатель степени в экспоненте на величину π , то в результате получим формулу, о которой упоминалось выше:

$$W_{\text{Ц}} = 1 - \exp(-S_{\text{ПЗП}}/2S_{\text{Р}}), \tag{13}$$

где: $S_{\text{ПЗП}} = \pi R_{\text{П}}^2$ – площадь круговой зоны поражения; $S_{\text{Р}} = \pi \sigma_R^2$ – площадь зоны рассеивания СП.

Для размерных целей и высокоточных СП, для которых $S_p < S_{ц}$, площадь рассеивания S_p в формуле (13) можно заменить площадью цели $S_{ц}$ [14]. Тогда формула (13) примет универсальный вид:

$$W_{ц} = 1 - \exp(-S_{пзп}/2\min(S_p, S_{ц})). \quad (14)$$

По величине заданной вероятности поражения цели $W_{ц}^{зад}$ далее определяется среднее число СП, необходимое для поражения цели $\hat{\omega}_i$:

$$\hat{\omega}_i = \ln(1 - W_{ц}^{зад})/\ln(1 - W_{цi}). \quad (15)$$

В результате получается замкнутая система зависимостей выходного показателя эффективности применения УАК $\bar{N}_{ц}$ в ходе одного цикла боевого применения, учитывающего все его основные ВТХ, а также типовые условия применения.

За время операции УАК может совершить среднее число циклов боевого применения, которое определяется формулой (3). Если в каждом цикле достигается эффект поражения $\bar{N}_{ц}$ целей, то за время операции $T_{оп}$ их число составит $m_Y(T_{оп})\bar{N}_{ц}$. В результате получаем интегральный показатель боевых возможностей УАК за время операции, т.е. его боевой потенциал:

$$P_{уак} = \bar{N}_{ц} P_{цбп} [1 - P_{цбп}^{T_{оп}/\bar{t}_{цбп}}] / (1 - P_{цбп}). \quad (16)$$

Из формулы (16) следует, что при возрастании продолжительности операции $T_{оп}$ и/или сокращения времени боевого цикла $\bar{t}_{цбп}$ боевой потенциал УАК возрастает и стремится к своей предельной величине:

$$\hat{P}_{уак} = \bar{N}_{ц} P_{цбп} / (1 - P_{цбп}). \quad (17)$$

При сравнительной оценке боевых возможностей различных комплексов используется относительный показатель боевого потенциала [1; 2; 4]:

$$K_{бп} = P_{уак} / P_{уак}^э, \quad (18)$$

где: $P_{уак}^э$ – боевой потенциал эталонного АУК, относительно которого рассчитывался показатель военно-технического уровня $K_{вту}$. В этом состоит согласование измерительных шкал различных свойств объекта.

Исследования, проведенные автором по сравнительной оценке зарубежных и отечественных УАК, показали непротиворечивость полученных оценок известным результатам, полученным в процессе моделирования и экспертного анализа.

Заключительным этапом предлагаемого научно-методического подхода должно стать установление прямой связи между показателем военно-технического уровня образца ВВТ $K_{вту}$ и боевым потенциалом $K_{бп}$. То, что эти показатели не идентичны, очевидно. Но также очевидно, что с повышением военно-технического уровня образца ВВТ повышается и его боевой потенциал. Если повышение военно-технического уровня ВВТ связано, главным образом, с развитием науки, техники и технологий, а также с уровнем промышленного производства, то наращивание боевого потенциала обеспечивается качественной организацией боевого применения ВВТ, уровнем подготовки личного состава, полнотой и качеством материально-технического обеспечения эксплуатации ВВТ. Налицо две группы факторов, влияющих на боевой потенциал ВВТ, но не заменяющих друг друга.

По мнению автора между показателями боевого потенциала $K_{бп}$ и военно-технического уровня $K_{вту}$ существует монотонная линейно-степенная зависимость следующего вида:

$$K_{бп} = \beta K_{вту}^\gamma, \quad (19)$$

где коэффициенты $\beta > 0$; $\gamma > 0$ характеризуют степень влияния внешних факторов на боевой потенциал.

Это гипотеза, которую нужно подтвердить дополнительными исследованиями. Параметры могут быть определены экспертно-аналитическим путем на основе статистического анализа исследуемой номенклатуры образцов ВВТ, условий и способов их боевого применения, организации их технической эксплуатации, полнотой и качеством всех видов обеспечения, уровня подготовки личного состава. Дальнейшие исследования автора будут посвящены решению именно этой задачи.

Заключение

Рассмотренный методический подход обобщает результаты исследований, проводимых на протяжении многих лет специалистами разных научно-исследовательских и учебно-научных организаций, работающих в области военной авиации. На базе известных математических моделей и методологии системного анализа автором получена обобщенная аналитическая модель и расчетная методика оценивания боевого потенциала УАК, связывающая его ключевые тактико-технические и эксплуатационные характеристики, а также условий боевого применения с выходных эффектом – средним числом пораженных целей противника за время боевой операции с учетом противодействия противника.

Предложенный научно-методический аппарат представляет собой определенный вклад в развитие теории боевой эффективности вооружения и военной техники может быть использован для проведения прогнозных исследований по обоснованию военно-технического облика перспективных образцов ВВТ при формировании государственной программы вооружения.

Список источников

1. Методы военно-научных исследований систем вооружения: военно-научный труд / Под общ. ред. В.М. Буренка. М.: Граница, 2017. 512 с.
2. Методы оценки эффективности вооружения и военной техники: монография / Под ред. В.М. Буренка. 2-е изд., доп. М.: Граница, 2022. 264 с.
3. Оценка эффективности огневого поражения ударами ракет и огнем артиллерии: военно-теоретический труд / Под общ. ред. А.А. Бобрикова. СПб.: Академия военных наук, 2006. 424 с.
4. Скопец Г.М. Внешнее проектирование авиационных комплексов: методологические аспекты. М.: Ленанд, 2017. 344 с.
5. Формирование рационального облика перспективных авиационных ракетных систем и комплексов / Под ред. В.В. Панова. М.: Машиностроение, 2010. 608 с.
6. Мышкин Л.В. Прогнозирование развития авиационной техники: теория и практика. М.: Физматлит, 2006. 304 с.
7. Модели военных, боевых и специальных действий / Под ред. Д.А. Новикова. М.: Ленанд, 2025. 528 с.
8. Горчица Г.И., Ищук В.А. Проблемы моделирования в интересах военного строительства и планирования развития ВВТ // Известия РАН. 2013. №3(78). С. 3-9.
9. Бонин А.С., Горчица Г.И. О боевых потенциалах образцов ВВТ, формирований и соотношениях сил группировок сторон // Военная мысль. 2010. №4. С. 61-67.
10. Управление техническим состоянием динамических систем / Под общ. ред. И.Е. Казакова. М.: Машиностроение, 1995. 240 с.
11. Буравлев А.И., Пьянков А.А. Управление техническим обеспечением жизненного цикла вооружения и военной техники: монография. М.: Граница, 2015. 304 с.
12. Ненартович Н.Э., Горевич Б.Н. Система противоракетной обороны США. Анализ и моделирование. М.: НПО «Алмаз», 2018. 320 с.
13. Горбунов В.А. Эффективность обнаружения целей. М.: Воениздат, 1979. 160 с.
14. Буравлев А.И., Брезгин В.С. Методы оценки эффективности высокоточного оружия. М.: Академия Жуковского, 2018. 232 с.

15. Буравлев А.И., Горчица Г.И., Степанов В.Д. Методика интегральной оценки эффективности ударных комплексов вооружения и военной техники и воинских формирований // Известия РАН. 2022. №3(123). С. 104-110.

16. Мильграм Ю.Г., Ерохин В.А. Основы единой зонной методики оценки эффективности авиационных средств поражения по наземным (морским) объектам. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1985. 241 с.

17. Власов В.И. Факты и аргументы теории боевой эффективности. М.: ВУНЦ ВВС ВВА, 2011. 200 с.

Информация об авторе

А.И. Буравлев – доктор технических наук, профессор.