

УДК 623.74.094

## Моделирование боевых действий авиации и оценки их эффективности – анализ работ, моделей, актуальных направлений исследований

Макаренко С. И., Афонин И. Е.

**Актуальность.** Анализ современных военных конфликтов показывает, что одним из важных составляющих успеха при ведении боевых действий является завоевание превосходства в воздухе, а боевое применение авиации остается одним из основных способов поражения противника. При этом целесообразным является развитие научно-методического аппарата боевого применения авиации и повышения ее боевой эффективности. Такое развитие может быть основано на глубоком и всестороннем анализе научного задела, имеющегося по этой тематике. В связи с этим, актуальным является анализ известных работ и моделей, подходов к моделированию, а также актуальных направлений исследования. **Целью работы** является анализ известных публикаций, моделей и подходов к моделированию, а также актуальных направлений исследований в области боевых действий авиации и ее боевой эффективности. Особое внимание уделено анализу моделирования одиночных и групповых воздушных боев, оценке боевой эффективности одиночных воздушных судов (авиационных комплексов) и действий авиации в целом. **Используемые методы.** Решение задачи основано на использовании методов индукции и дедукции теории логики. **Результат.** На основе анализа более 100 источников, находящихся в открытом доступе, выявлены общие и частные закономерности исследования боевых действий авиации и ее боевой эффективности, а именно: моделирование воздушных боев, моделирование кинематических траекторий движения самолетов, моделирование принятия решений летчиками, влияние летно-технических характеристик самолетов и способов их боевого применения на эффективность оперативно-тактической авиации и т. д. **Новизна.** Элементами новизны работы являются выявленные общие и частные закономерности и подходы к исследованию боевых действий авиации и ее боевой эффективности на основе использования различных подходов к моделированию и путем использования различного научно-методического аппарата. **Практическая значимость.** Представленный анализ может быть использован техническими специалистами для обоснования новых технологических решений в области совершенствования воздушных судов, авиационных комплексов и систем управления ими, а также военными специалистами – для обоснования новых способов вооруженной борьбы с учетом перспектив совершенствования военной авиации. Кроме того, данный анализ будет полезен научным работникам и соискателям, ведущим научные исследования действий авиации военно-воздушных сил.

**Ключевые слова:** боевые действия, моделирование, моделирование боевых действий, военная авиация, авиация военно-воздушных сил, военно-воздушные силы, воздушный бой, одиночный воздушный бой, групповой воздушный бой, дальний воздушный бой, ближний воздушный бой, планирование боевых действий, воздушный противник, способ боевого применения, боевая эффективность, принятие решения, летно-технические характеристики, поражение воздушного противника, поражение наземных объектов, поражение морских объектов, тактический прием, маневр, авиационный комплекс, беспилотный летательный аппарат, воздушное судно, летательный аппарат.

### Библиографическая ссылка на статью:

Макаренко С. И., Афонин И. Е. Моделирование боевых действий авиации и оценки их эффективности - анализ работ, моделей, актуальных направлений исследований // Системы управления, связи и безопасности. 2024. № 3. С. 78-125. DOI: 10.24412/2410-9916-2024-3-078-125

### Reference for citation:

Makarenko S. I., Afonin I. E. Modeling of aviation combat operations and evaluation of their effectiveness - analysis of papers, models and actual research directions. *Systems of Control, Communication and Security*, 2024, no. 3, pp. 78-125 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2024-3-078-125

## Актуальность

Участие Российской Федерации (РФ) с 2015 г. в оказании военной помощи Сирийской арабской республике (САР) против террористических формирований, а с 2022 г. проведение специальной военной операции (СВО) на Украине показало, что одним из важных составляющих успеха при ведении боевых действий (БД) является завоевание превосходства в воздухе, а боевое применение авиации остается одним из основных способов поражения противника. Вместе с тем с тем опытом СВО продемонстрировал целесообразность совершенствования способов боевого применения авиации, необходимость повышения ее боевой эффективности. Такое совершенствование и повышение эффективности должно быть основано на глубоком и всестороннем анализе научного задела в области моделирования боевых действий авиации и исследований ее боевой эффективности.

Целью статьи является анализ работ в области моделирования боевых действий авиации в интересах формирования актуальных направлений исследования повышения ее эффективности. В основу анализа положены только открытые отечественные и зарубежные источники, в связи с этим он может быть не полным и не содержать последние достижения в этой области в связи с тем, что они носят характер сведений ограниченного распространения.

Необходимо отметить, что вопросам исследования боевых действий авиации посвящены фундаментальные работы В.Р. Дурова [1], В.И. Абрамова [2], В.К. Бабича [3, 4], Г.В. Зимина [5], С.К. Бурмистрова [6], О.В. Болховитинова [7], Е.А. Федосова [8, 9, 10, 11], М.А. Погосьяна [12]. Из наиболее свежих исследований тематики боевой эффективности авиации и моделирования воздушных боев можно отметить работы А.В. Ананьева [85-89, 95, 105], А.В. Богданова, Д.В. Закомолдина [65-70, 79], А.С. Бонина [106, 108, 109], М.В. Желонкина [41, 43, 45], С.Д. Оркина, Б.Д. Оркина, А.К. Дьячук [57, 92, 96-98], С.В. Николаева [42, 103], С.П. Хрипунова [71-76], В.А. Ярошевского [13-15, 47], а также других ученых. Вместе с тем фундаментальные работы в этой предметной области изданы более 10 лет назад, а недавние статьи вышеуказанных ученых посвящены исследованию частных задач и аспектов. В связи с этим формирование современного аналитического обзора работ и исследований в области моделирования боевых действий авиации является актуальным.

Материал статьи декомпозирован на следующие подразделы.

1. Краткий ретроспективный обзор методов моделирования боевых действий авиации.
2. Моделирование одиночного воздушного боя.
  - 2.1. Особенности ведения одиночного воздушного боя.
  - 2.2. Моделирование кинематических траекторий и тактического маневрирования.
  - 2.3. Моделирование логики принятия решений летчиком.
  - 2.4. Моделирование боевой эффективности одиночного боя.
3. Моделирование групповых действий авиации.
  - 3.1. Планирование действий авиации против воздушного противника.

- 3.2. Моделирование тактических приемов и действий в групповом воздушном бою.
- 3.3. Моделирование поражения авиацией наземных и морских целей.
4. Моделирование боевой эффективности действий авиации.
  - 4.1. Боевая эффективность одиночного воздушного судна, одиночного авиационного комплекса.
  - 4.2. Имитационное моделирование боевой эффективности действий авиации.

Данный анализ продолжает цикл работ авторов [16-30], посвященных исследованию эффективности систем воздушно-космической обороны (ВКО), анализу стратегии нанесения и боевого опыта отражения атак средств воздушного нападения (СВН), а также формированию обобщенных моделей различных подсистем, средств и комплексов в составе ударных эшелонов СВН потенциального противника.

## **1. Краткий ретроспективный обзор методов моделирования боевых действий авиации**

Вооруженное противоборство характеризуется тем, что протекает на различных уровнях управления (на тактическом, оперативном и стратегическом уровнях), при этом на его исход влияют множество параметров – как естественные параметры среды (местность, погодные условия, время дня и года), так и внутренние параметры сторон, ведущих противоборство, которые, в свою очередь, могут быть явными (состав сил и средств, тактико-технические характеристики (ТТХ) образцов вооружения, военной и специальной техники (ВВСТ), запасы оружия и материальных средств и т. д.) или неявными (морально-психологическое состояние войск, воля к победе, интеллект и решительность главнокомандующего). Кроме того, вооруженному противоборству свойственны процессы затруднения оценки обстановки лицам, принимающим решения (ЛПР), с другой стороны – маскировка, дезинформация, введение в заблуждение. Все это приводит к тому, что вооруженное противоборство является трудно формализуемым процессом, а, соответственно, задача моделирования такого противоборства – весьма нетривиальной научной задачей.

Традиционно принята следующая классификация методов, которые могут быть использованы для моделирования классических боевых действий:

- 1) аналитические методы – методы математического анализа, теории вероятностей, методы исследования операций;
- 2) статистические методы – методы математической статистики, а также основанные на них методы, например, метод Монте-Карло, последовательный анализ;
- 3) методы численной оптимизации – методы линейного, нелинейного, динамического программирования, случайный поиск, методы, основанные на принципе максимума Понтрягина, методы решений задач комбинаторики;
- 4) методы теории игр – дифференциальные игры, коалиционные игры, игры с природой и т. д.;
- 5) имитационное моделирование.

Вместе с тем эти методы, применительно в моделированию боевых действий авиации, как правило, не могут быть использованы в чистом виде. Специфика авиации военно-воздушных сил (ВВС) такова, что в моделировании процессов боевых действий, автоматизации принятия решений, формализации архитектур систем управления широко используются методы технической кибернетики, методы кинематики и аэродинамики, а также методы теории принятия решений.

Методы моделирования боевых действий в воздухе получили начальное активное развитие в СССР в период Великой отечественной войны. В то время основным оружием истребительной авиации (ИА) являлось стрелково-пушечное вооружение, а бомбардировочной авиации – неуправляемые авиационные бомбы. Теоретические основы оценки эффективности боевого применения авиации в тот период были разработаны А.Н. Колмогоровым, В.С. Пугачевым и Е.С. Вентцель. Основными составляющими моделирования боевых возможностей самолетов в 1950-1970 гг. были:

- формирование кинематических траекторий полета: перехвата, ближнего воздушного боя;
- оценка эффективности воздействия боеприпасов по целям: целераспределение, бомбометание, способы прицельного применения авиационных средств поражения (АСП), оценка эффективности применения боеприпасов;
- формирование моделей поражения: баллистики управляемых и неуправляемых АСП, порядка сброса и применения АСП, рассеивания боевых элементов.

В последующие годы были разработаны средства и, соответственно, алгоритмы автоматизированного управления самолетов по высоте и скорости, а также методы их наведения на цели. Отдельные самолеты, наземная система мониторинга воздушного пространства и автоматизированная система управления (АСУ) самолетами-истребителями были объединены в боевой авиационный комплекс (АК). В основе управления боевыми действиями АК лежат решения так называемых информационно-расчетных задач, включающих в себя:

- мониторинг воздушного пространства и вскрытие факта нападения воздушного противника, целераспределение;
- расчет рубежей перехвата, выбор метода перехвата, порядка применения оружия, режимов полета;
- наведение самолета-истребителя на воздушного противника;
- управление ведением воздушного боя.

При ведении воздушного боя в качестве отдельных задач управления АК можно выделить:

- формирование кинематических траекторий самолета и пар самолетов, с учетом траекторий движения летательных аппаратов (ЛА) противника, а также реализации возможностей маневренности самолета в бою;
- принятие решений на совершение маневров, тактических приемов, применения АСП.

В основу автоматизированного управления АК были положены типовые модели ведения боевых действий в воздухе и алгоритмы решения информационно-расчетных задач, которые изложены в отечественных работах [1-7].

Эти модели и алгоритмы позволили сформировать системы управления для одиночных и групповых действий АК различных типов (истребительного, разведывательного, ударного, разведывательно-ударного и военно-транспортного), которые не потеряли своей актуальности и по настоящее время.

В 2000-2010-х гг. появляется новое направление развития моделирования боевых действий авиации – учет возможности использования в них беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Исследования возможностей использования БПЛА в воздушном бою требуют особого подхода не только в развитии методов управления БПЛА в части выполнения тактических приемов и маневров, но и в динамическом целераспределении, оценки складывающейся тактической обстановки, назначении ролей отдельных БПЛА в воздушном бою, а также обеспечения их взаимодействия в группе. При этом задачи управления группой БПЛА в воздушном бою, обеспечения эффективного боевого применения пилотируемых самолетов во взаимодействии с БПЛА являются новыми и не до конца решенными. Как правило, для формирования моделей управления группой БПЛА используют интегрированные модели, в которых взаимодействие отдельных самолетов и БПЛА в группе формализуется на основе теории игр, теории мультиагентных систем, теории сложных систем, методов имитационного моделирования, а логика функционирования отдельных БПЛА в рамках своей роли и тактической задачи моделируется частными нейросетевыми моделями, подобными тем, которые используются для управления БПЛА при ведении одиночного воздушного боя [54, 55].

## 2. Моделирование одиночного воздушного боя

### 2.1. Особенности ведения одиночного воздушного боя

*Воздушный бой* – вооруженное противоборство в воздухе одиночных самолетов или групп, сочетающих маневр и огонь для уничтожения противника или отражения его атак [5].

В процессе воздушного боя самолеты осуществляют боевое маневрирование и применяют тактические приемы ведения боя.

*Маневрирование* – перемещение самолетов (их групп) в воздушном пространстве для занятия тактически выгодного положения или сохранения между истребителями (группами) взаимодействия [5].

*Тактический прием* – действия экипажей (подразделений) для уничтожения воздушного противника или выхода из-под его удара путем реализации боевых возможностей своего самолета (самолетов), использования слабых сторон самолетов противника и условий обстановки [5].

Современный одиночный воздушный бой бывает наступательным и оборонительным и подразделяется на три вида:

- 1) ближний маневренный воздушный бой;
- 2) воздушный бой на средних дистанциях;
- 3) дальний воздушный бой.

Для каждого вида воздушного боя характерен свой вид применяемого оружия:

- 1) пушечное вооружение и управляемые ракеты (УР) «воздух – воздух» с тепловыми головками самонаведения (ГСН);
- 2) управляемые ракеты средней дальности;
- 3) управляемые ракеты большой дальности.

Широкое использование ракет класса «воздух – воздух» большой дальности в сочетании с бортовыми средствами обнаружения (бортовыми радиолокационными станциями (РЛС) и оптико-электронными средствами (ОЭС)) привело к тому, что современными самолетами преимущественно ведутся дальние воздушные бои. Тем не менее, все современные самолеты до сих пор имеют вооружение для возможных боевых столкновений в условиях ближнего воздушного боя и есть все перспективы, что ближний воздушный бой вновь станет массовым явлением, в случае замены летчиков советующими искусственными нейронными сетями (ИНС).

Воздушный бой состоит из следующих этапов [5]:

- 1) сближение;
- 2) атака;
- 3) маневрирование между атаками;
- 4) выход из боя.

Моделирование воздушного боя «самолет – самолет» (или  $1 \times 1$ ) требует взаимоувязанного решения следующих задач:

- 1) определение пространственных кинематических траекторий, характеризующих маневрирование в ходе течения воздушного боя и используемые тактические маневры;
- 2) формализация логики принятия решений летчиками на совершение тактических маневров и применение оружия;
- 3) формализация показателей эффективности воздушного боя и исследование вероятности уничтожения цели и выживания самолета в бою.

## **2.2. Моделирование кинематических траекторий и тактического маневрирования**

Решение задачи определения пространственных кинематических траекторий, характеризующих маневрирование в ходе течения воздушного боя первоначально было представлено в работе Р. Айзекса [31] в виде игры «убегающий – преследователь», описывающейся системой дифференциальных уравнений.

Расширенные версии математического аппарата формирования пространственных кинематических траекторий в воздушном бою  $1 \times 1$  представлены в работах [2, 5]. Эти кинематические траектории соответствуют типовым маневрам самолетов в воздушном бою.

В общем случае, тактические маневры в воздушном бою подразделяют на три группы [3, 4]:

- 1) оборонительные;
- 2) наступательные;
- 3) нейтральные.

Как показано в классических работах В.К. Бабича [3, 4] типичными оборонительными маневрами считаются отрыв от воздушного противника и «управляемая бочка» с большим радиусом вращения при максимальной перегрузке. К наступательным маневрам относятся «быстрый двойной вираж», «бочка» с последующим отставанием от преследуемого самолета и «медленный двойной вираж». Нейтральные маневры включают такие виды, как «ножницы» (в горизонтальной и вертикальной плоскостях), сочетание «ножниц» с «бочкой». В ближнем маневренном воздушном бою маневры представляют собой комплекс горизонтальных, вертикальных, а также координированных и форсированных разворотов. При этом типовые маневры должны учитывать способность самолета выполнять их с минимальной потерей энергии, а также следующие основные факторы: вооружение самолета, его маневренность и возможности средств его индивидуальной защиты. Основная цель выполнения маневра – занять выгодное позиционное положение по отношению к самолету противника. В ближнем воздушном бою наиболее выгодным позиционным положением, в которой наиболее полно реализуются вооружение самолетов, считается область возможных атак в заднюю полусферу цели. Важнейшими принципами ведения воздушного боя, считается, во-первых, недопустимость вхождение самолета противника в область возможных атак своего самолета. Во-вторых, с помощью серии маневров рекомендуется самому войти в аналогичную область противника [3, 4].

В общем, формирование кинематических траекторий тактического маневрирования самолетов, участвующих в воздушном бою, можно представить в виде модели, изложенной в работе В.Н. Евдокименкова и Н.А. Ляпина [32].

Ведущие бой самолеты представляются как материальные точки, векторы состояния которых включают шесть компонент – три координаты ( $X, Y, Z$ ), задающие начальное состояние, и три составляющих вектора скорости ( $V_x, V_y, V_z$ ). Примем допущение, что каждому из конфликтующих самолетов доступна информация о его собственном текущем состоянии (положении, скорости), а также о положении и скорости самолета противника. Введем обозначения (рис. 1):  $a$  – атакующий самолет-истребитель,  $b$  – самолет противника. Тогда вектора текущего состояния самолетов будут определяться как  $R(t) = (X_a, Y_a, Z_a, V_{xa}, V_{ya}, V_{za})^T$  и  $S(t) = (X_b, Y_b, Z_b, V_{xb}, V_{yb}, V_{zb})^T$  относительно начальной системы координат  $OXYZ$ , привязанной, например, к начальному состоянию самолета-истребителя, в момент времени  $t = 0$  начала совершения маневра.

Взаимодействие самолетов задается вектором  $C(t) = R(t) - S(t) = (X_c, Y_c, Z_c, V_{xc}, V_{yc}, V_{zc})^T$ , определяющем маневрирование самолета-истребителя относительно самолета противника. Так как целью маневрирования занятие выгодного позиционного положения по отношению к самолету противника, то существует условной «идеальный» вектор  $C^*(t) = (X_c^*, Y_c^*, Z_c^*, V_{xc}^*, V_{yc}^*, V_{zc}^*)^T$  направленный в «идеальную» точку, которую должен занять самолет-истребитель относительно самолета противника по окончанию маневра. Задачей формирования вектора  $R(t)$  со стороны самолета-истребителя является обеспечение минимизации разницы между его текущим состоянием и «идеальным» ( $\Delta(t) = |C^*(t) - C(t)| \rightarrow \min$ ). А задачей формирования вектора  $S(t)$  со сто-

роны самолета противника, максимизации разницы между текущим состоянием самолета-истребителя и его «идеальным» состоянием ( $\Delta(t) = |C^*(t) - C(t)| \rightarrow \rightarrow \max$ ). В качестве вектора управления самолетом-истребителем можно рассматривать трехмерный вектор, компонентами которого являются ускорения по соответствующим осям системы координат  $U_a = (a_{xa}, a_{ya}, a_{za})^T$ , а в качестве вектора управления самолетом противника  $U_b = (a_{xb}, a_{yb}, a_{zb})^T$  [32].

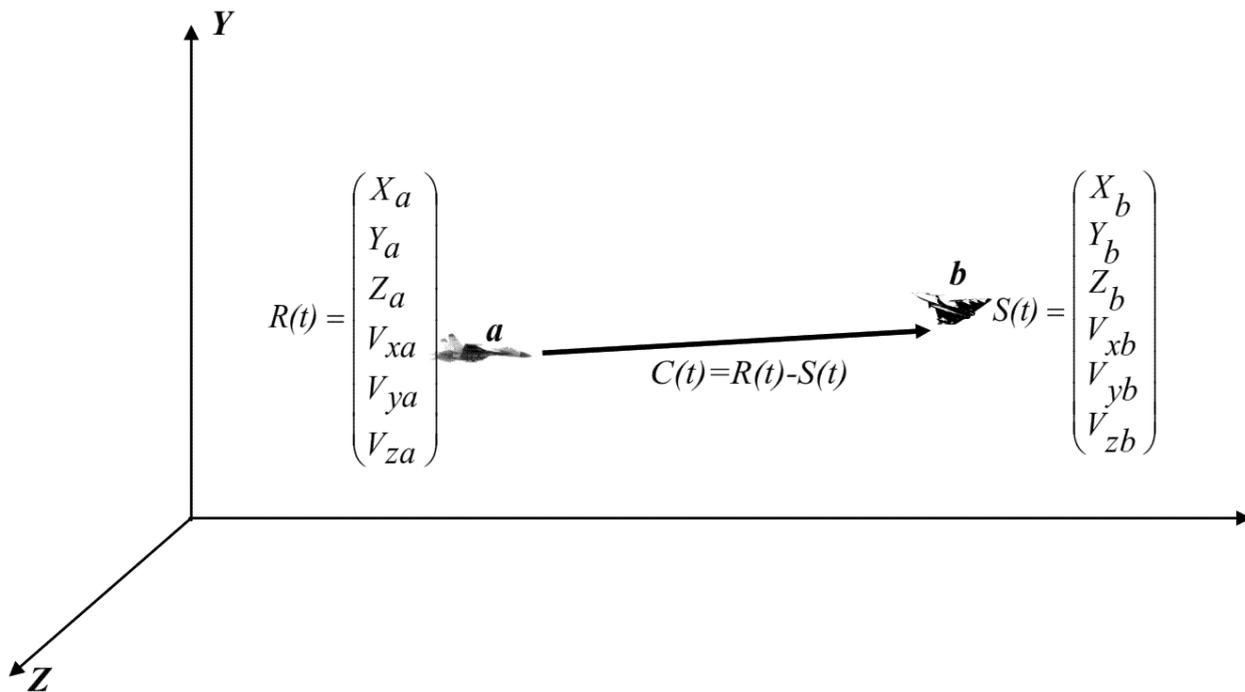


Рис. 1. К задаче формирования кинематических траекторий тактического маневрирования самолетов [32]

В результате дифференцирования по времени компонент вектора  $C(t)$  получается дифференциальное уравнение, описывающее динамику изменения относительного состояния ведущих бой самолетов в процессе их маневрирования [32]:

$$\frac{dC(t)}{dt} = AC(t) + BU_a(t) + DU_b(t) \quad (1)$$

где  $C(t)$  – ранее введенный вектор размерности  $6 \times 1$ , характеризующий текущее относительное состояние противоборствующих самолетов;  $A, B, D$  – постоянные матрицы соответствующих размеров с компонентами:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix},$$

Таким образом, линейная динамическая система (1) задаёт дифференциальную игру тактического маневрирования в воздушном бою, с двумя участниками [32]:

- а) первый игрок (самолет-истребитель) за счет выбора управления  $U_a(t)$  стремится перевести систему (1) за заданное время  $T$  из начального состояния  $C(0)$  в конечное состояние  $C^*(T)$  с минимальным отклонением от «идеального» состояния  $\Delta(t) \rightarrow \min$ ;
- б) второй игрок (самолет противника) за счет выбора управления  $U_b(t)$  стремится перевести систему (1) за заданное время  $T$  из начального состояния  $C(0)$  в такое конечное состояние  $C(T)$ , которое соответствует максимальному отклонению от «идеального» состояния  $C^*$  для первого игрока т. е.  $\Delta(t) \rightarrow \max$ .

При этом ограничения на компоненты векторов  $R(t)$ ,  $S(t)$ ,  $C(t)$ ,  $U_a(t)$  и  $U_b(t)$  являются летно-технические характеристики (ЛТХ) самолетов, ведущих ближний маневренный воздушный бой.

Вышеуказанный подход обеспечивает моделирование широкого класса тактических маневров в рамках ведения одиночного воздушного боя (рис. 2).

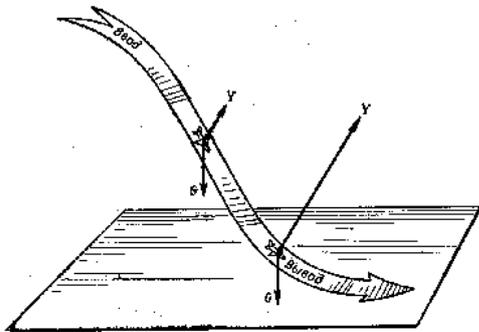
Современные тенденции изменения тактики ведения воздушного боя изложены в работах [34, 35]. Общие принципы маневрирования самолетов в воздушном бою изложены в работах [3, 4, 36, 37]. Математическим аппаратом формирования кинематических траекторий маневров самолета являются методы вариационного и дифференциального счисления, теории аэродинамики, теорий кинематики и динамики полета, теории управления, трехмерной геометрии, булевой алгебры. Эти методы, обеспечивают решение следующих типовых задач:

- а) решение систем алгебраических и трансцендентных уравнений при расчете ЛТХ самолета;
- б) максимизация и минимизация функций конечного числа переменных при отыскании значений соответствующих характеристик на оптимальных режимах выполнения тактических маневров (например, максимальные значения скороподъемности, дальности и времени полета, минимальные значения радиуса и времени разворота и т.д.);
- в) решение систем дифференциальных уравнений формализации движения летательных аппаратов.

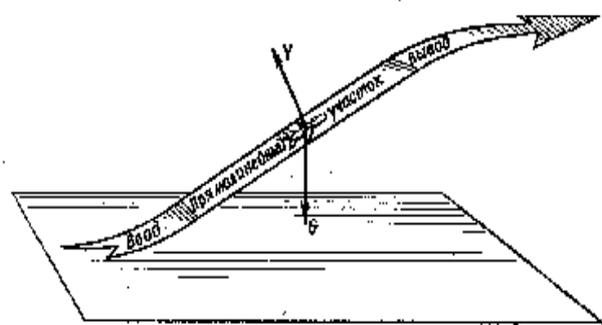
К последним открытым работам в области тактического маневрирования самолетов в воздушном бою можно отнести статьи [32, 33, 38-42]. Практическими целями моделирования в этих работах являются:

- а) поиск новых тактических маневров в воздушном бою при ограничениях на физиологические возможности летчика и конструктивную прочность самолета;
- б) формирование новых тактических маневров, реализующих новые возможности самолетов нового типа с улучшенными ЛТХ, в том числе так называемую «сверхманевренность» самолетов 5-го поколения;
- в) формирование областей возможных атак и маневров по входу в них, наиболее полно реализующих возможности различных комбинаций вооружения самолета и способов его применения;

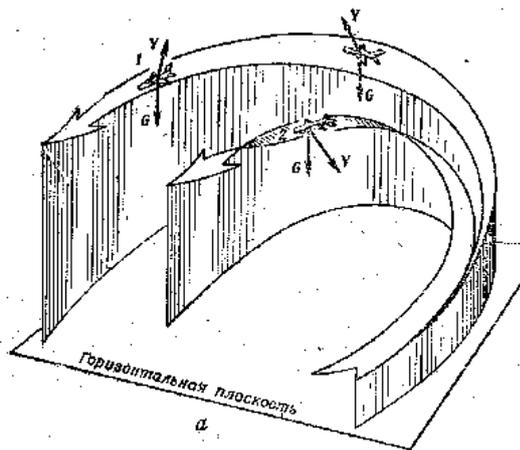
- г) выявление тех пространственных областей по исходным положениям самолетов и тех маневров, которые обеспечивают выигрыш в бою в том случае, когда по некоторым ЛТХ противник имеет превосходство;
- д) выявление рациональных путей совершенствования ЛТХ, обеспечивающих надежное превосходство в бою с заданным типом самолета противника, ЛТХ которого известны.



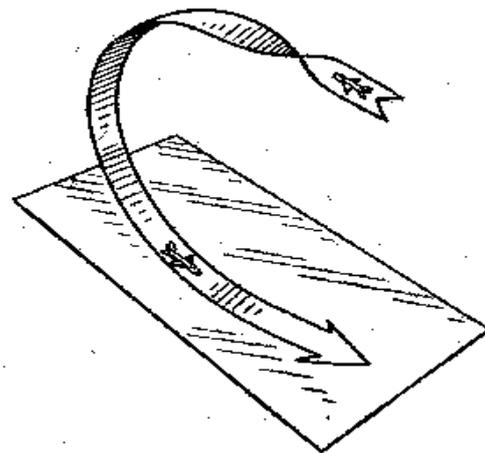
а. Манёвр «пикирование»



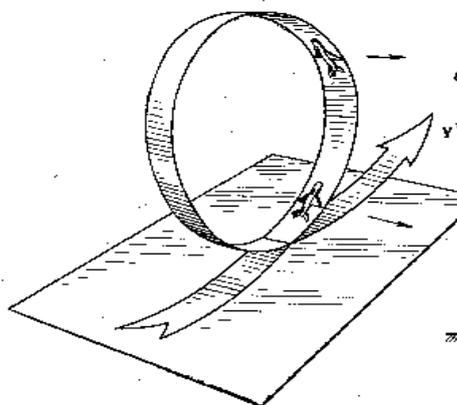
б. Манёвр «горка»



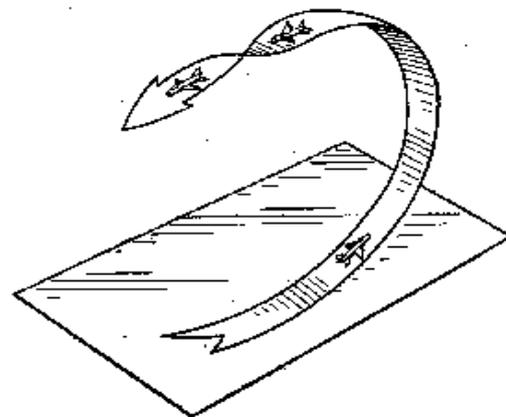
в. Манёвр «боевой разворот»



г. Манёвр «переворот»



д. Манёвр «петля Нестерова»



е. Манёвр «переворот Иммельмана»

Рис. 2. Некоторые тактические приемы воздушного боя [33]

### 2.3. Моделирование логики принятия решений летчиком

Проблематика разработки моделей воздушного боя связана не только с созданием математического аппарата формирования пространственных траекторий нестандартных фигур высшего пилотажа на основе заранее заданных законов движения самолетов в бою, но и с учетом взаимодействия системы «самолет – летчик» и алгоритмизацией процесса выработки управляющих решений, которые были бы адекватны не только тактике маневрирования самолетов, но и логике действий летчиков в бою. В этой связи, важным классом факторов, которые должны формализоваться в моделях воздушного боя, является логика принятия решений летчиками по совершению тактических маневров и применению оружия. Наиболее ценным, с практической точки зрения, является такой метод моделирования принятия решений в воздушном бою, который с заданной степенью адекватности формализует формирование траекторий самолетов в процессе ведения боя на основе логики поведения противоборствующих сторон, выработку летчиками решений по управлению самолетом и его оружием, выбор траектории сближения с целью и формирование соответствующих управляющих команд, по воздействию которых изменяются тяга двигателей, пространственное положение и угловая скорость самолета.

Формализация логики принятия решений летчиками на совершение тактических маневров и применение оружия ведется на основе теории игр, теории управления, теории принятия решений, теории автоматов, теории нечетких множеств, методов динамического программирования, а в последнее время – с использованием методов искусственного интеллекта (ИИ). К последним открытым работам в этой области можно отнести статьи [14, 15, 43-52]. Целями моделирования в этих работах являются:

- а) поиск оптимальной последовательности тактических маневров (приемов) и применения оружия, приводящих к выигрышу в дуэльном ближнем маневренном воздушном бою, для различных начальных условий с заданными ЛТХ в условиях неопределённости действий вражеского летчика;
- б) формализация логики принятия решений и знаний опытных летчиков в виде интеллектуальных моделей;
- в) разработка систем поддержки принятия решений (СППР) для летчиков, ведущих воздушный бой;
- г) разработка систем ИИ для управления БПЛА, ведущих автономный воздушный бой 1×1;
- д) исследование взаимодействия технической и человеческой подсистем в системе «самолет – летчик» в быстроменяющейся, физиологически-агрессивной, неопределенной среде.

Хорошей обзорной статьей в этой области является работа [53]. В данной работе показана эволюция развития математических методов управления самолетами в направлении от методов оптимального управления к использованию искусственных нейронных сетей (ИНС) и методов их глубокого обучения (рис. 3).

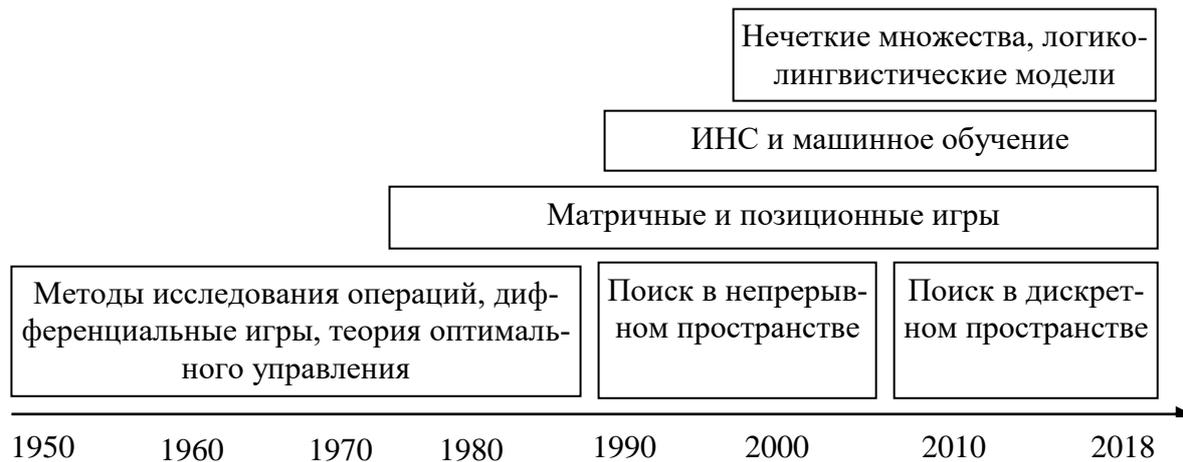


Рис. 3. Исторический график применения методов моделирования в задаче автономного воздушного боя

Более высоким уровнем абстракции моделирования воздушного боя является формализация его итоговой эффективности по показателю вероятности выигрыша в бою в параметрическом пространстве «ЛТХ самолетов – вооружение самолетов – тактические маневры – принимаемые решения – действия противника». Поэтому современные модели управления самолетами, основанные на методах ИИ являются интегральными и объединяют как пространственно-кинематические факторы тактического маневрирования, так и модели принятия решений. Анализ современных достижений в этой области показывает, что наибольшие результаты в области обеспечения эффективности ведения воздушного боя были достигнуты на основе глубокого обучения ИНС с подкреплением. Так в 2020 г. ИНС, разработанная американской компанией Heron Systems, выиграла серию из пяти виртуальных воздушных боев у опытного инструктора военно-воздушных сил (ВВС) США в ближнем воздушном бою во время соревнований Alpha Dogfight в симуляторе Flight Gear. Выигравшая модель сначала обучалась в боях с другими конкурирующими ИНС, затем дообучалась в боях против пилотов ВВС США. В процессе обучения выигравшая ИНС провела 4 млрд симуляций, что эквивалентно 12 годам обучения ведению воздушного боя. Проигравший инструктор ВВС США, участвовавший в испытаниях, прокомментировал их так: «Тактика нейросетевой модели была странной с точки зрения привычных традиционных представлений, но при этом очень эффективной. Стандартные приёмы воздушного боя, которые изучают летчики-истребители, с нейросетью не сработали» [54]. В 2023 г. ИНС, разработанная американской компанией Heron Systems, будучи загруженной в тестовый самолет X-62A, была апробирована уже в реальном тренировочном воздушном бою против F-16, пилотируемым человеком [55]. В это же время, в 2023 г. аналогичные ИНС для ведения виртуального воздушного боя были испытаны и в Китае. Результат испытаний был также не в пользу человека и вызвал оптимизм у инженеров-конструкторов. «Эра воздушных боев, в которой искусственный ин-

теллект станет «королем», уже на горизонте. ... Самолеты с автономными возможностями принятия решений смогут полностью превзойти людей по скорости реакции. ... В связи с развитием технологий малозаметности и радиоэлектронного подавления (РЭП) около 25-40 % воздушных боев в будущем будут вестись на ближней дистанции. Поэтому исследования в области ближнего воздушного боя имеют большое практическое значение» – так прокомментировал испытания глава проекта профессор Хуан Цзюньтао из Китайского центра исследований и разработок аэродинамики [56].

### 3. Моделирование групповых действий авиации

Тактической основой модели группового воздушного боя является противоборство 2-х разнотипных групп самолетов  $m \times n$ .

Основой моделей группового воздушного боя являются модели одиночного боя, которые дополняются компонентами, моделирующими:

- а) планирование боевого применения авиации (целераспределение между «своими» самолетами в группе и, при необходимости, перенацеливание «своих» на другие самолеты противника);
- б) формирование кинематических траекторий самолетов при ведении ближнего воздушного боя с группой воздушного противника.

Другим важным вопросом применения авиационных групп является общая эффективность ведения боевых действий авиацией, выработка рациональных способов и приемов повышения ее боевой эффективности.

Эти вопросы будут рассмотрены далее.

#### 3.1. Планирование действий авиации против воздушного противника

*Планирование боевых действий авиации* – это распределение целей между средствами их поражения – «своими» самолетами, входящими в состав группы, а также формирование замысла и плана их действий с учетом складывающейся тактической обстановки.

Решение задачи планирования производится в несколько этапов [6]:

- а) общая оценка воздушного противника – определение общего характера и замысла налета, состава сил и средств, основных направлений, возможной продолжительности удара, решаемых противником задач;
- б) оценка радиоэлектронной обстановки – осуществляется путем анализа информации о наличии помех, действии самолетов РЭП в эшелонах противника, прикрывающих удар, степени их негативного воздействия на РЛС мониторинга воздушного пространства;
- в) ранжирование целей по степени их важности. Наиболее важными целями являются баллистические и крылатые ракеты, ведущие самолеты ударных групп и самолеты РЭП. В составе ударной группы наиболее важными являются цели – возможные носители наибольшего потенциала средств поражения;
- г) определение для каждой цели: ее состава, скорости и высоты полета, курсового параметра, подлетного времени;

- д) оценка состояния и возможностей своих сил и средств – состояния и боевой готовности самолетов на аэродромах базирования и в местах воздушного патрулирования, их боекомплекта, боевых свойств и характеристик вооружения, а также уровня подготовки и степени слаженности экипажей;
- е) оценка взаимодействующих сил и средств – производится путем анализа информации о зонах, прикрываемых зенитно-ракетными комплексами (ЗРК) противовоздушной обороны (ПВО), зонах действия своих самолетов – постановщиков помех и наземных средств РЭП, зонах действия авиационных комплексов радиолокационного дозора и наведения (АК РЛДН). В результате этой оценки определяется степень боевой готовности взаимодействующих подразделений, их способность выполнять общую боевую задачу, уточняются способы взаимодействия;
- ж) оценка условий ведения противоборства – факторы, которые могут повлиять на боевое применение имеющихся сил и средств (время года и суток, метеорологические условия, наличие естественных и искусственных помех, пространственная конфигурация противоборствующих групп самолетов) – оцениваются с точки зрения их влияния на режимы боевой работы системы ПВО и способы перехвата целей, эффективность стрельб и др.
- з) расчет рубежей обнаружения противника, дальности ведения дальнего воздушного боя, времени и рубежей вступления в ближний воздушный бой; последовательности поражения целей, координат точек встречи целей, используемых методов наведения самолетов и ракет;
- и) назначение по каждой цели действия своих самолетов.

Результатом решения задачи планирования будет построение плана действий группы самолетов-перехватчиков, состоящий из элементов

$$f(n, r, d, x, y, z, i, j, t),$$

определяющих выполняемое действие (тактический прием)  $d$  для каждого своего  $n$ -го самолета  $r$ -го типа, в  $(x, y, z)$ -точке воздушного пространства против  $i$ -й цели в  $j$ -й группе противника в момент времени  $t$ .

Общие модели планирования боевых действий авиации строятся на основе:

- а) теоретико-множественных моделей;
- б) коалиционных игр «нападающий – защищающийся»;
- в) задач линейного программирования;
- г) задач ранжирования и кластеризации;
- д) задач формирования расписания и укладки рюкзака;
- е) задач нахождения максимальных паросочетаний в двудольных графах.

Кроме того, для решения задачи планирования нередко используются подходы с применением метода релаксаций Лагранжа, обучающихся алгоритмов, линейного целочисленного программирования и нелинейных сетевых потоков, динамического программирования, нечетких моделей, нейронных сетей, генетических алгоритмов, муравьиных алгоритмов, а также их комбинаций.

Один из вариантов решения задачи планирования группового воздушного боя представлен в работе А.К. Дьячук [57]. В качестве критерия оптимальности плана действий авиации принят следующий:

$$\begin{cases} C_a(S) \rightarrow \min; \\ U_a(S) \leq U_{a.з}; \\ U_{КГ}(S) \geq U_{КГ.з} \end{cases}$$

где  $U_{КГ}(S)$  – фактический ущерб группе воздушного противника в операции нанесения авиационного удара;  $U_{КГ.з}(S)$  – заданный норматив поражения группы воздушного противника;  $U_a(S)$  – фактические потери своих воздушных судов (ВС), выполняющих задачу поражения группы воздушного противника;  $U_{a.з}$  – максимально заданный уровень потерь своей авиации;  $\omega_S$  – множество допустимых вариантов действий авиации, где для каждого варианта действий  $S \in \omega_S$  суммарная стоимость  $C_a$  сил и средств своей авиации, утрачиваемых в ходе выполнения операции, равна:

$$C_a = \sum_{j=1}^{J_{AK}} \Delta N_{\Sigma_j}^{AK} C_{1_j}^{AK} + \sum_{j=1}^{J_{ACП}} \Delta N_{\Sigma_j}^{ACП} C_{1_j}^{ACП} + N_{\Sigma}^{mon} C_1^{mon}$$

где:  $J_{AK}$ ,  $J_{ACП}$  – число типов ВС и количество типов АСП, используемых при выполнении операции;  $\Delta N_{\Sigma_j}^{AK}$ ,  $C_{1_j}^{AK}$  – суммарные потери ВС  $j$ -го типа в операции и стоимость одного ВС,  $j = \overline{1, J_{AK}}$ ;  $\Delta N_{\Sigma_j}^{ACП}$ ,  $C_{1_j}^{ACП}$  – суммарное число АСП  $j$ -го типа, израсходованных при выполнении операции и утраченных в результате гибели носителей, и стоимость одного АСП  $j$ -го типа,  $j = \overline{1, J_{ACП}}$ ;  $N_{\Sigma}^{mon}$ ,  $C_1^{mon}$  – суммарное количество топлива, используемого ВС в ходе выполнения операции, и стоимость единицы топлива.

Целью планирования в вышеуказанной задаче распределения является формирование оптимального варианта действий своей авиации, обеспечивающей минимум суммарной стоимости утрачиваемых в ходе выполнения операции поражения воздушного противника с одновременным выполнением ограничений по ущербу. Решение этой задачи усложняется необходимостью учета в процессе оптимизации данного критерия большого количества факторов, определяющих изменение состояний всех участников операции в пространстве и во времени. Дополнительные трудности обусловлены игровым характером задачи, порождаемым действиями авиации противника с множеством допустимых вариантов действий  $\omega_R$ .

При решении задачи планирования действий ВС и расчета боевых нарядов АСП в качестве исходных данных принимаются:

- а) боевой порядок и координаты целей в составе эшелонов воздушного противника;
- б) направления ударов АСП и способы применения АСП для каждого из направлений удара;

- в) смещения относительно начального времени  $t_0$  в моментах нанесения удара АСП для каждого из принятых направлений;
- г) заданный уровень вероятности поражения целей в группе противника  $P_{a.з}$ ;
- д) потребный уровень математического ожидания числа пораженных целей из состава группы противника  $F_Z$ ;
- е) боекомплект АСП  $N_{r \max}$  на всех своих ВС, выделенный для определения боевых нарядов поражения противника;
- ж) математическое ожидание плотности залпа АСП  $\lambda(N)$  для каждого направления удара  $N$ .

Решение задачи целераспределения состоит в вычислении для каждого направления удара  $N (N \in \overline{1, NM})$  боевых нарядов АСП  $N_{cr \Sigma}(N)$ , обеспечивающих для любого номера цели  $m \in \overline{1, M}$  выполнение критерия поражения  $P_a(m) \geq P_{a.з}$  и хотя бы для одного из номеров  $m^*, m^* \in \overline{1, M}$  критерия поражения  $F(m^*) \geq F_Z$  при условии что число АСП назначенных на все  $N$  направлений ударов не превысят общее число АСП  $N_{r \max}$ :

$$\sum_{N=1}^{NM} N_{cr \Sigma}(N) \leq N_{r \max},$$

где  $P_a(m)$  – вероятность поражения цели в  $m$ -й поражающей комбинации;  $F(m^*)$  – математическое ожидание числа пораженных целей в  $m$ -й поражающей комбинации;  $N \cdot M$  – общее число заданных направлений удара;  $m$  – номер поражающей комбинации;  $M$  – общее число поражающих комбинаций в матрице;  $N_{cr \Sigma}(N)$  – число АСП, распределенных на  $N$ -е направление удара.

В процессе планирования боевых действий для каждого направления удара  $N \in \overline{1, NM}$  и цели  $j \in \overline{1, K}$  при фиксированном  $m$  решаются следующие задачи:

- 1) вычисляется приращение целевой функции

$$\Delta(m, N, j) = \varphi(m, j) \eta(N, j) A(j) W(N, j, N_{cr}(N, j) + 1),$$

где  $K$  – число целей в группе воздушного противника, номер  $j = 1$  соответствует ведущему группы, либо наиболее приоритетной цели (например, самолету – носителю ядерного оружия);  $\varphi(m, j)$ ,  $\eta(N, j)$  – индикаторные функции, характеризующие присутствие  $j$ -й цели в  $m$ -й поражающей комбинации и в зоне возможных пусков АСП, выполняющей наведение с направления удара  $N$ , соответственно;  $A(j)$  – коэффициент важности  $j$ -й цели;

- 2) определяются

$$(N^*, j^*) = \arg \max_{N \in \overline{1, NM}} \max_{j \in \overline{1, K}} \Delta(m, N, j), N_{cr}(N^*) = N_{cr}(N^*) + 1.$$

При этом величины  $P_a(m)$ ,  $F(m^*)$  определяются с использованием результатов предварительного имитационного моделирования процесса наведения и поражения АСП соответствующей цели.

Потребный боевой наряд  $N_6$  группы самолетов для каждого направления удара получается из решения следующего уравнения:

$$Q_{\Sigma \text{ ПВО}}^x(N_{\text{сп}} = 1) = x \cdot N_{\text{пол}},$$

где  $1/x = N_6$ ;  $N_{\text{пол}}$  – наряд самолетов в данной группе, вычисляемый из условия доставки в зону пуска выделенного наряда АСП, с учетом заданного варианта боевой загрузки этими АСП одного ударного самолета и отсутствия противодействия со стороны системы ПВО противника.

Примеры решения других практических задач планирования действий авиации, например задач целераспределения, представлены в работах [58-64]. Задачи расчета рубежей перехвата и траекторий сближения средств поражения с целью, определение зон возможных атак и пусков ракет, боевой эффективности и боеготовности применительно к самолетам истребительной авиации (ИА) также рассмотрены в работах [1, 2, 7].

### 3.2. Моделирование тактических приемов и действий в групповом воздушном бою

Особенностью группового воздушного боя с воздушным противником является то, что группа самолетов декомпозируется на самостоятельные единицы – пары самолетов. При этом, в общем случае, для моделирования тактических приемов и действий пар в групповом воздушном бою применим тот же подход к формализации дифференциальных игр, что и ранее изложенный в п. 2 данной работы применительно к тактическому маневрированию самолетов в одиночном воздушном бою. Вместе с тем боевым действиям пары, а, следовательно, формализации их кинематических траекторий и принятия решений, свойственны определенные особенности, которые изложены далее.

В классической работе В.К. Бабича [3] показано, что основным тактическим боевым подразделением в групповом воздушном бою является пара самолетов. Между командиром пары и его ведомым постоянно должно сохраняться зрительное, огневое и радиосвязное взаимодействие. Строгое распределение ролей, когда ведущему отводится роль «меча», а ведомому – «щита», обеспечивает успех пары в групповом бою. Ведомый должен не терять своего места, искать противника и докладывать о его обнаружении. Он обязан поддерживать ведущего при любых маневрах в атаке и обороне. В групповом воздушном бою пара обычно действует в составе группы, однако ей могут поручаться и самостоятельные тактические задачи. Например, вылеты на свободную охоту, перехват воздушных разведчиков противника или засады в воздухе. Выполняя их, летчики иногда могут меняться ролями, что предусматривается течением боя – если ведомый первым замечает противника, находится в более выгодном положении для атаки, то проводит ее первым, а ведущий берет на себя функции прикрытия. При попадании в критические ситуации пары могут размыкаться за пределы огневой связи. Это делается, например, при опоздании с обнаружением атакующего противника, когда последний уже достиг рубежа возможного применения оружия. В этом случае оборонительный маневр имеет целью не только вывести противника за пределы области возможных атак, но и уклониться от поражения уже выпущенными ракетами «воздух – воздух». Размыкание пары обязывает противника или парой продолжать преследовать один самолет, или

также разрывать боевой порядок. В последнем случае бой распадается на одиночные схватки, преимущество в которых обычно получает более маневренный самолет [3].

Взаимодействие в группе самолетов, основывается на тесной огневой связи между парами, их способности наносить согласованные удары по самолетам противника в воздухе и прикрывать друг друга от возможных нападений противника. Эскадрилья в составе 8-12 самолетов (4-6 пар) была наибольшей группой, способной выполнять одну боевую задачу. Увеличение числа самолетов в группе стесняет маневр пар и нарушает их взаимодействие в динамике боя. Входившие в состав группы пары в большинстве случаев делились на ударные и прикрывающие. Взаимодействие между ними строилось на тех же принципах, что и между летчиками внутри пары [3].

В предвидении воздушного боя группа рассредоточивается по фронту и эшелонируется в глубину на таком удалении, чтобы между парами постоянно сохранялась зрительная связь. Перед атакой, которую пары наносят последовательно, дистанция между ними увеличивается и боевой порядок представляет собой вытянутый пеленг. Поочередная атака с разных направлений осуществляется из боевого порядка «фронт» на увеличенных интервалах, Одновременные атаки всей группой допускаются только при отсутствии угрозы со стороны свободных самолетов противника. Ближний маневренный бой, начавшийся после сближения групп самолетов на встречных курсах, обычно распадается на бой пар, стремившихся зайти друг другу в заднюю полусферу. Прикрывающие пары могут отбить первую атаку противника, но после завязки ближнего боя выполнять функции прикрытия они будут уже не способны. Восстановление ролей в группе становится возможным лишь после уничтожения этими парами своего противника. Маневрирование пар в составе группы для прицельного применения ракетного оружия связано с ограничениями, однако временная потеря огневого взаимодействия не должна препятствовать ведению боя [3].

Логика взаимодействия самолетов в групповом бою может быть представлена выбором последовательности тактических приемов для каждого самолета с учетом их совместных действий в группе (активная атака, уклонение от атаки, прикрытие другого самолета, полет по заданному маршруту, полет по траектории маневра, полет по траектории поиска СВН, выдерживание боевого порядка ведомыми и т. д.). Эти тактические приемы, а также роли самолетов (ведущий или ведомый в ударной или прикрывающей паре) могут меняться в зависимости от складывающейся тактической ситуации. При формализации группового воздушного боя целесообразно рассматривать следующие его стадии:

- 1) встреча групп самолетов (выход в боевое соприкосновение), в результате чего формируются исходные положения самолетов в пространстве в начале боя;
- 2) принятие решения о распределении целей и ролей в своей группе самолетов;
- 3) формирование прогнозируемых тактических действий противника, распределения целей и ролей в его группе самолетов;

- 4) принятие решения о выборе тактического приема для каждого самолета на текущем этапе  $t_n$ ;
- 5) выполнение тактических приемов каждым самолетом в группе;
- 6) определение пространственного положения всех самолетов к моменту к моменту  $t_{n+1}$ ;
- 7) определение результата боя к моменту  $t_{n+1}$ ;
- 8) переход к стадии 2 или окончание воздушного боя, если противник разгромлен.

В общем случае для моделирования тактических приемов и действий пар в групповом воздушном бою применимы методы формализации дифференциальных игр ранее изложенные в п. 2 данной работы применительно к тактическому маневрированию самолетов в одиночном воздушном бою.

Формализация же процесса принятия решений о распределении целей и ролей между самолетами в группе, а также об использовании тех или иных тактических приемов или маневров ведется на основе теории игр, теории управления, теории принятия решений, теории нечетких множеств, методов выпуклого программирования. К последним работам по моделированию группового воздушного боя можно отнести [65-70]. Важным отличием формализации процесса принятия решений в групповом воздушном бою от аналогичного процесса в одиночном бою является необходимость правильного распознавания тактических ситуаций и прогнозирование групповых действий противника. К работам в этой области можно отнести статьи [71-74]. Прикладными задачами моделирования группового воздушного боя являются:

- а) поиск оптимальной последовательности распределения ролей, тактических приемов и маневров в парах и между парами в группе, приводящих к выигрышу в групповом воздушном бою, для различных начальных условий с заданными ЛТХ в условиях прогнозируемых действий самолетов в группе противника;
- б) формализация логики принятия решений и знаний опытных летчиков-командиров в виде интеллектуальных моделей;
- в) разработка распределенной СППР для летчиков, ведущих групповой воздушный бой.

Принципиально новым направлением развития моделирования группового воздушного боя является учет возможности использования в нем БПЛА. Варианты использования БПЛА в групповом воздушном бою могут заключаться в следующем:

- а) замена ведомых в парах, ведущих групповой воздушный бой, на БПЛА-аналоги с той же функциональной нагрузкой;
- б) полная замена группы пилотируемых самолетов на группу БПЛА, ведущих групповой воздушный бой;
- в) использование пилотируемых самолетов как носителей БПЛА, выпускающих группу БПЛА, которые в дальнейшем входят в боевое соприкосновение с противником и ведут групповой воздушный бой, который управляется с пилотируемого самолета.

Все вышеуказанные варианты требуют особого подхода не только в развитии ИИ управления БПЛА в части выполнения тактических приемов и маневров, но и в динамическом целераспределении, распознавании складывающейся тактической обстановки, назначении ролей отдельным БПЛА в воздушном бою, а также обеспечения их взаимодействия в группе. В настоящее время исследование этих вопросов представлено в работах [75-83]. Однако, задачи управления группой БПЛА в воздушном бою, а также обеспечения эффективного взаимодействия БПЛА с пилотируемыми самолетами, являются новыми и не до конца решенными задачами. Как правило, для формирования моделей управления группой БПЛА используют интегрированные модели, в которых взаимодействие отдельных самолетов и БПЛА в группе формализуется на основе теории игр, теории мультиагентных систем, теории сложных систем, методов имитационного моделирования, а логика функционирования отдельных БПЛА в рамках своей роли и тактической задачи – частными нейросетевыми моделями, подобными тем, которые используются для управления БПЛА при ведении одиночного воздушного боя.

### 3.3. Моделирование поражения авиацией наземных и морских целей

В процессе авиационной поддержки сухопутных войск (наступления или обороны) или действий военно-морского флота авиация применяется для нанесения ударов по наземным или морским целям. Задачи моделирования действий группы самолетов ударной авиации против подразделений сухопутных войск противника отражены в работах [84-93], а против группировок надводных кораблей и объектов морского базирования – в работах [94-99].

Например, в работе [93] представлена модель обнаружения и поражения авиацией сухопутного противника, в которой силы и средства авиации формализованы в теоретико-множественном виде, а функции разведки и поражения – в формализме IDEF0 (Integration Definition for Function Modeling).

Силы и средства авиации представлены множеством:

$$S = S_1 \cup S_2$$

где  $S_1$  – множество сил и средств воздушной разведки;  $S_2$  – множество сил и средств ударной авиации.

При этом:

$$S_1 = S_{11} \cup S_{12} \cup S_{13} \cup S_{14},$$

где  $S_{11}$  – множество сил и средств разведки;  $S_{12}$  – множество органов управления разведкой;  $S_{13}$  – множество сил и средств связи в интересах передачи команд управления и разведывательных данных;  $S_{14}$  – множество сил и средств контроля.

$$S_{11} = S_{111} \cup S_{112} \cup S_{113} \cup S_{114} \cup S_{115},$$

где  $S_{111}$  – множество сил и средств радиоэлектронной разведки;  $S_{112}$  – множество сил и средств оптико-электронной разведки;  $S_{113}$  – подсистема обработки

разведывательных данных;  $S_{114}$  – подсистема принятия информационных решений;  $S_{115}$  – подсистема целеуказания для ударной авиации.

Множество сил и средств ударной авиации декомпозируется:

$$S_2 = S_{21} \cup S_{22} \cup S_{23},$$

где  $S_{21}$  – множество пилотируемых самолетов – носителей АСП;  $S_{22}$  – множество БПЛА – носителей АСП;  $S_{23}$  – множество АСП.

При этом разведывательно-ударные функции авиации в отношении сухопутных войск противника и наземных объектов описываются моделью IDEF0 (рис. 4).

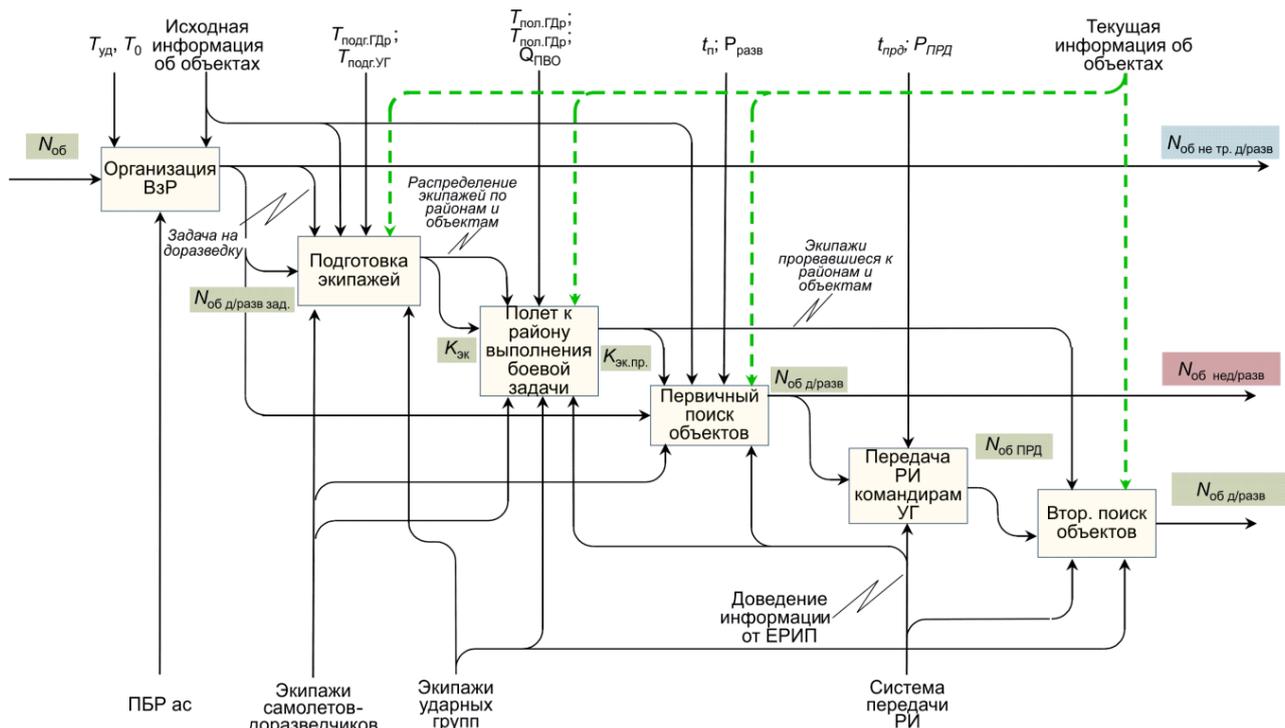


Рис. 4. Модель IDEF0 разведывательно-ударных функций авиации в отношении сухопутного противника и наземных объектов. Обозначения на рисунке: ВЗР – воздушная разведка; ЕРИП – единое разведывательное информационное пространство; РИ – разведывательная информация; УГ – ударная группа; ПРД – передача [33]

#### 4. Моделирование боевой эффективности действий авиации

##### 4.1. Боевая эффективность одиночного воздушного судна, одиночного авиационного комплекса

Классически боевая эффективность современного ВС по уничтожению воздушных целей определяется его ЛТХ, ТТХ бортовой прицельной системы и АСП. Боевая эффективность одиночного ВС характеризуется пространственными, временными и вероятностными показателями.

Пространственными показателями являются диапазон высот и скоростей уничтожаемых целей ( $H_u, V_u$ ), а также максимальное (по запасу топлива) удаление рубежа уничтожения воздушной цели от места базирования ВС ( $R_{ун}$ ).

К временным показателям относится время боевого полета (или отдельных его этапов – время взлета из соответствующей готовности, время дежурства в воздухе), а также время подготовки самолета к полету.

Частные вероятностные показатели характеризуют эффективность отдельных этапов боевого полета (наведение на цель, поиск и обнаружение цели, атаки и поражения цели). Каждому этапу боевого полета соответствует определенная вероятность успешного выполнения данного этапа полета:

- а) вероятность наведения истребителя на цель –  $P_{нав}$ ;
- б) вероятность поиска и обнаружения цели –  $P_{обн}$ ;
- в) вероятности атаки и поражения цели –  $P_{ат}$  и  $P_{пор}$ .

Общим вероятностным показателем является вероятность уничтожения цели  $P_{ун}$  (вероятность выполнения боевой задачи). Вероятность уничтожения цели (вероятность выполнения боевой задачи) равна произведению частных вероятностных показателей [6]:

$$P_{ун} = P_{нав} P_{обн} P_{ат} P_{пор}, \quad (2)$$

где  $P_{нав}$  – вероятность наведения, т.е. вероятность того, что самолет будет введен в определенное пространство относительно цели, откуда возможна успешная атака;  $P_{обн}$  – вероятность обнаружения цели, т.е. вероятность того, что в заданной области пространства самолет обнаружит цель и будут выполнены предварительные условия для осуществления ее атаки;  $P_{ат}$  – вероятность атаки, т.е. вероятность выхода истребителя в определенное пространство относительно цели, откуда может быть произведен прицельный пуск ракет (стрельба из пушек);  $P_{пор}$  – вероятность поражения, т.е. вероятность того, что после пуска ракет (стрельбы из пушек) обеспечивается попадание боевого заряда в область поражения цели.

Как показано в работе [105] анализ боевой эффективности ВС может быть произведен не только с точки зрения пространственных, временных и вероятностных показателей выполнения им боевой задачи, но и с учетом его включенности в состав АК, а АК в состав авиационного воинского формирования. В работах оценки боевой эффективности АК преобладают следующие основные направления:

- а) оценка боевой эффективности АК на основе исследования полноты реализации боевого потенциала – работы А.С. Бонина и М.В. Фомина [106];
- б) оценка боевой эффективности АК на основе многокритериального анализа боевых возможностей – работа В.Д. Степанова [107];
- в) оценка боевой эффективности АК на основе ее включенности в соответствующее авиационное воинское формирование – работы [7, 108, 109].

Помимо этого, как справедливо указывается в [105], существенный вклад в боевую эффективность АК вносит качество управления комплексом, которое в свою очередь напрямую зависит от качества и принципов организации связи, а также от качества управления, определяющихся ТТХ АСУ АК.

## 4.2. Имитационное моделирование боевой эффективности действий авиации

Вопросы оценки боевой эффективности действий авиации при решении её целевых задач отражены в классических работах [2, 5]. К наиболее новым работам в этой области относятся [100-104]. В частности, в работе [104] для моделирования оценки боевой эффективности предложено использование имитационной модели, формализующей причинно-следственные связи различных процессов и параметров целевого применения АК оперативно-тактической авиации (ОТА) (рис. 5).

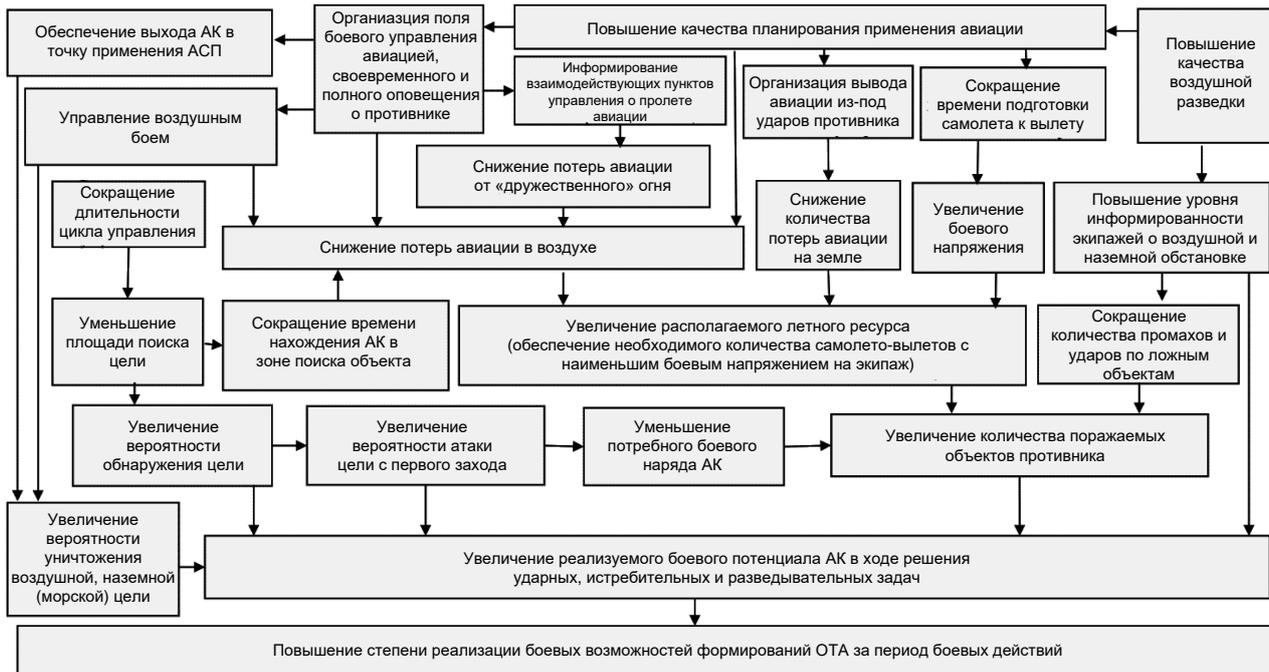


Рис. 5. Причинно-следственные связи различных процессов и параметров целевого применения АК ОТА в имитационной модели оценки боевой эффективности [104]

В качестве интегрального показателя боевой эффективности АК ОТА предложено использовать вектор:  $W = (W_1, W_{21}, W_{22}, W_3, W_4)^T$ , составляющими которого являются следующие компоненты.

1. Боевая эффективность авиации по поражению наземных (морских) целей:

$$W_1 = W_{y\partial}(\bar{X}) = \sum_{h=1}^H \sum_{m=1}^M R_m(h) \cdot W_{mh}^{y\partial}(\bar{X}),$$

где  $R_m(h)$  – коэффициент оперативно-тактической важности поражения наземной (морской) цели  $m$ -го типа на  $h$ -м этапе боевых действий;  $W_{mh}^{y\partial}(\bar{X})$  – математическое ожидание количества пораженных наземных (морских) целей  $m$ -го типа на  $h$ -м этапе боевых действий с учетом характеристик системы управления  $X$ .

2. Боевая эффективность авиации по поражению воздушных целей:

$$W_{21} = W_{ucm1}(\overline{X}) = \sum_{h=1}^H \sum_{m=1}^{M_2} Q_m(h) \cdot W_{mh}^{ucm1}(\overline{X}),$$

$$W_{22} = W_{ucm2}(\overline{X}) = \sum_{h=1}^H \sum_{m=1}^{M_3} L_m(h) \cdot W_{mh}^{ucm2}(\overline{X}),$$

где  $Q_m(h)$  – коэффициент важности поражения воздушной цели  $m$ -го типа на  $h$ -м этапе боевых действий;  $W_{mh}^{ucm1}(\overline{X})$  – математическое ожидание количества пораженных воздушных целей  $m$ -го типа на  $h$ -м этапе боевых действий с учетом характеристик системы управления  $X$ ;  $L_m(h)$  – коэффициент важности прикрываемого наземного объекта  $m$ -го типа на  $h$ -м этапе боевых действий;  $W_{mh}^{ucm2}(\overline{X})$  – математическое ожидание количества уничтоженных (пораженных) прикрываемых наземных объектов нашей стороны  $m$ -го типа на  $h$ -м этапе боевых действий с учетом характеристик системы управления  $X$ .

3. Боевая эффективность авиации при решении разведывательных задач:

$$W_3 = W_{разв}(\overline{X}) = \sum_{h=1}^H \frac{I_h^{доб}(\overline{X})}{I_{полн}},$$

где  $I_h^{доб}(\overline{X})$  – добытая средствами воздушной разведки информация на  $h$ -м этапе боевых действий;  $I_{полн}$  – полная информация о целях противника.

4. Потери авиации  $W_4$ .

При этом в работе [104] показатели  $W_1$ ,  $W_{21}$ ,  $W_3$  рассматриваются как основные в процессе проведения моделирования, а показатели  $W_{22}$  и  $W_4$  – как вспомогательные.

При моделировании боевой эффективности применения ударной авиации в имитационной модели [104] учитывается возможность подавления системы ПВО противника, выход в зону поиска целей, потери авиации в процессе поиска, атака основной или запасной цели, потери на обратном маршруте, в том числе от своих средств ПВО. При нанесении массированных авиационных ударов количество участвующих АК определяется замыслом удара и количеством АК, находящихся в состоянии готовности к вылету на момент нанесения удара. При действиях авиации по вызову (групповые и одиночные удары) считается, что боевая задача ставится самолетам, находящимся в наивысших степенях готовности к вылету, что отражается на времени, прошедшем с момента постановки боевой задачи до вылета самолета. При моделировании боевых действий истребительной авиации учитываются задачи патрульного сопровождения ударных групп и перехват воздушных целей. В основу математического описания динамики боевых действий авиации в модели оценки боевой эффективности положена система рекуррентных конечноразностных алгебраических уравнений, отражающих изменение математических ожиданий численности сил (средств) противоборствующих сторон. При этом модель функционирования системы управления авиацией основана на унифицированной модели АСУ ОТА и включает следующие частные модели:

- а) модель подсистемы сбора и обработки данных воздушной разведки;

- б) модель командной подсистемы АСУ ОТА;
- в) модель подсистемы управления инженерно-авиационным и аэродромно-техническим обеспечением авиации;
- г) модель подсистемы боевого управления авиацией в воздухе.

Структура комплекса имитационного моделирования оценки боевой эффективности ОТА, изложенная в работе [104], представлена на рис. 6.



Рис. 6. Структура комплекса имитационного моделирования оценки боевой эффективности ОТА [104]

### Заключение

В статье произведен обзор и анализ моделей боевых действий в воздушном пространстве, произведен анализ математического аппарата моделирования боевых действий авиации, представлены модели одиночного и группового воздушного боя.

В целом, моделирование воздушного боя есть один из важных путей повышения тактического мастерства летчика, реализации максимальных боевых возможностей АК ВВС и повышения их эффективности в воздушном бою. Количественный анализ таких сложных процессов, какими являются воздушный бой, перехват цели, необходимо начинать с построения их упрощенных схем, моделей, учитывающих главные, определяющие факторы и не учитывающих второстепенные факторы, существенно не влияющие на качество функциони-

рования рассматриваемого процесса или сложной системы, что и составляет суть моделирования.

### Литература

1. Дуров В. Р. Боевое применение и боевая эффективность истребителей-перехватчиков. – М.: Воениздат, 1972. – 280 с.
2. Абрамов В. Н. Боевое применение и боевая эффективность авиационных комплексов войск ПВО страны / Под ред. В. Н. Абрамова. – М.: Военное издательство МО СССР, 1979. – 520 с.
3. Бабич В. К. Истребители меняют тактику. – М.: Воениздат, 1983. – 151 с.
4. Бабич В. К. Воздушный бой (зарождение и развитие). – М.: Воениздат, 1991. – 191 с.
5. Справочник офицера противовоздушной обороны / Г. В. Зимин, Ф. Т. Бутурлин, С. К. Бурмистров и др.; под ред. Г. В. Зимины. – М.: Воениздат, 1981. – 431 с.
6. Справочник офицера воздушно-космической обороны / Под общей редакцией С. К. Бурмистрова. – Тверь: ВА ВКО, 2006. – 564 с.
7. Арбузов И. В., Болховитинов О. В., Волочаев О. В., Вольнов И. И., Гостев А. В., Мышкин Л. В., Хабилов Р. Н., Шеховцов В. Л. Боевые авиационные комплексы и их эффективность: учебник для слушателей и курсантов инженерных ВУЗов ВВС / Под ред. О.В. Болховитинова. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 224 с.
8. Бабич В. К., Баханов Л. Е., Герасимов Г. П. и др. Авиация ПВО России и научно-технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра. Монография / Под ред. Е. А. Федосова. – М.: Дрофа, 2001. – 816 с.
9. Антонов Д. А., Бабич Р. М., Балыко Ю. П. и др. Авиация ВВС России и научно-технический прогресс: боевые комплексы и системы вчера, сегодня, завтра. Монография / Под ред. Е. А. Федосова. – М.: Дрофа, 2005. – 734 с.
10. Альховиков В. М., Денисов В. М., Зарубин А. И. и др. Авиация ВМФ России и научно-технический прогресс: концепции создания, пути развития, методология исследований. Монография / Под ред. Е. А. Федосова. – М.: Дрофа, 2005. – 336 с.
11. Каштан М. И., Жихарев А. Д., Алешин Б. С. и др. Авиационные стратегические ударные комплексы. Монография / Под ред. Е. А. Федосова. – М.: Военный парад, 2005. – 212 с.
12. Каштан М. И., Жихарев А. Д., Алешин Б. С. и др. Авиационные стратегические ударные комплексы. Монография / Под ред. М. А. Погосьяна. – М.: Военный парад, 2012. – 212 с.
13. Желнин Ю. Н., Шелехов С. А., Ярошевский В. А. Определение вероятностей исходов воздушного боя // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2004. № 5. С. 171-174.
14. Ярошевский В. А. К решению модельной игровой задачи о дальнем воздушном бое с учетом запаздывания в вариантах «шумной» и «бесшумной»

дуэли // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2004. № 6. С. 132-142.

15. Ярошевский В. А. Решение одной модельной игровой задачи о дальнем воздушном бое // Ученые записки ЦАГИ. 2004. Т. 35. № 1-2. С. 68-82.

16. Афонин И. Е., Макаренко С. И., Митрофанов Д. В. Анализ концепции «Быстрого глобального удара» средств воздушно-космического нападения и обоснование перспективных направлений развития системы воздушно-космической обороны в Арктике в интересах защиты от него // Воздушно-космические силы. Теория и практика. № 15. 2020. С. 75-87.

17. Макаренко С. И., Ковальский А. А., Афонин И. Е. Обоснование перспективных направлений развития системы противокосмической обороны Российской Федерации в интересах своевременного вскрытия и отражения «Быстрого глобального удара» средств воздушно-космического нападения // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2020. № 16. С. 99-115.

18. Афонин И. Е., Макаренко С. И., Петров С. В., Привалов А. А. Анализ опыта боевого применения групп беспилотных летательных аппаратов для поражения зенитно-ракетных комплексов системы противовоздушной обороны в военных конфликтах в Сирии, в Ливии и в Нагорном Карабахе // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 4. С. 163-191. DOI 10.24411/2410-9916-2020-10406.

19. Афонин И. Е., Макаренко С. И., Петров С. В. Описательная модель комплексов разведки, используемых для вскрытия системы воздушно-космической обороны и целеуказания при нанесении удара средствами воздушно-космического нападения // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 1. С. 190-214. DOI: 10.24411/2410-9916-2021-10108.

20. Афонин И. Е., Макаренко С. И., Петров С. В. Описательная модель подсистемы радиоэлектронного подавления в составе средств воздушно-космического нападения, используемых для нарушения функционирования элементов системы воздушно-космической обороны // Системы управления, связи и безопасности. 2021. № 2. С. 76-95. DOI: 10.24412/2410-9916-2021-2-76-95.

21. Макаренко С. И., Афонин И. Е., Копичев О. С., Мамончикова А. С. Обобщенная модель Ланчестера, формализующая конфликт нескольких сторон // Автоматизация процессов управления. 2021. № 2. С. 66-76. DOI: 10.35752/1991-2927-2021-2-64-66-76.

22. Афонин И. Е., Петров С. В., Макаренко С. И. Переход к адаптивно-сетевой структуре системы управления воздушно-космической обороной, как один из основных путей повышения ее устойчивости // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2021. № 19. С. 159–178. DOI: 10.24412/2500-4352-2021-19-159-178.

23. Афонин И. Е., Петров С. В., Гимбицкий В. А., Попов М. А., Валиев Р. М. Об актуальности повышения устойчивости системы управления воздушно-космической обороной в конфликте со средствами воздушно-космического нападения // Передача, обработка, отображение информации: сборник материалов 32-Всероссийской научно-практической конференции.

Краснодар – пос. Терскол, Кабардино-Балкарской Республики, 23–30 апреля 2022 г. – М.: РУСАЙНС, 2022. – С. 43-51.

24. Афонин И. Е. Информационный конфликт систем воздушно-космической обороны и средств воздушно-космического нападения противника при развитии военного конфликта. Обоснование актуальности // Проблемы создания и применения космических аппаратов и систем средств выведения в интересах решения задач Вооруженных Сил Российской Федерации: материалы III Всероссийской научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 12-13 апреля 2021 года. – СПб.: Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского, 2022. – С. 184-189.

25. Афонин И. Е., Макаренко С. И., Михайлов Р. Л. Быстрый глобальный удар: ретроспективный анализ концепции, вероятный сценарий нанесения, состав сил и средств, последствия и приоритетные мероприятия по противодействию. Монография. – СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. – 174 с.

26. Афонин И. Е., Макаренко С. И., Михайлов Р. Л. Описательная модель боевых потенциалов сторон в конфликте системы воздушно-космической обороны со средствами воздушно-космического нападения // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 3. С. 41-66. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-3-41-66.

27. Афонин И. Е., Табырца Д. В. Перспективы использования новых информационных технологий в системе управления воздушно-космической обороной // Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Робототехника»: Сборник статей V Всероссийской научно-технической конференции, Анапа, 19-20 июля 2023 года. – Анапа: Федеральное государственное автономное учреждение «Военный инновационный технополис «ЭРА», 2023. – С. 421-431.

28. Афонин И. Е., Макаренко С. И., Петров С. В. Модель оценивания устойчивости системы управления воздушно-космической обороной в конфликте со средствами воздушно-космического нападения // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 3. С. 227-266. DOI: 10.24412/2410-9916-2023-3-227-266.

29. Афонин И. Е., Макаренко С. И., Михайлов Р. Л. Средства воздушно-космического нападения ведущих зарубежных стран. Часть 1. Межконтинентальные баллистические ракеты // Системы управления, связи и безопасности. 2024. № 1. С. 138-190. DOI: 10.24412/2410-9916-2024-1-138-190.

30. Макаренко С. И., Старостин А. В. Противовоздушная оборона страны от ударов беспилотных летательных аппаратов и крылатых ракет: новые угрозы, проблемные вопросы, технико-экономический анализ вариантов архитектуры // Системы управления, связи и безопасности. 2024. № 2. С. 86-148. DOI: 10.24412/2410-9916-2024-2-086-148.

31. Айзекс Р. Дифференциальные игры. – М.: «Мир», 1967. – 479 с.

32. Евдокименков В. Н., Ляпин Н. А. Минимаксная оптимизация маневров преследования противника в условиях ближнего воздушного боя // Труды МАИ. 2019. № 106. С. 12.

33. Воробьев К. А., Сенчурин Я. Ю. Моделирование траектории движения маневрирующей цели в среде MATLAB // Математическая морфология. Электронный математический и медико-биологический журнал. 2013. Том 12. № 1. URL: <http://sgma.alpha-design.ru/MMORPH/N-37-html/vorobyov/vorobyov.htm> (дата обращения 17.07.2024).
34. Баринов С. В., Корсунов С. В., Ягелло В. В. Этапы воздушного боя и тенденции их развития // Межвузовский сборник научных трудов. – Краснодар: КВВАУЛ, 2018. С. 64-70.
35. Даниленко Р. А. Анализ тенденций воздушного боя в период управляемого ракетного вооружения // Военный научно-практический вестник. 2022. № 1 (16). С. 79-84.
36. Петров В. П. Маневрирование в воздушном бою // Зарубежное военное обозрение. 1985. № 1. С. 53-57.
37. Булинский В. А. Динамика маневрирования самолета-истребителя в воздушном бою. – М.: Воениздат, 1957. – 200 с.
38. Киселев М. А. Методика и результаты решения задачи преследования подвижного объекта двухступенчатой динамической системой // Научный вестник МГТУ ГА. 2017. № 2. С. 57-64.
39. Леньшин А. В., Лихачев В. П., Рязанцев Л. Б. Моделирование процесса самонаведения истребителя на маневренную воздушную цель в интересах оценки точности вычисления точки прицеливания // Вестник ВИ МВД России. 2012. № 1. С. 109-115.
40. Ефанов В. В., Закота А. А., Гунькина А. С. Методика оценки вероятности наведения истребителя в зону разрешенных пусков управляемых ракет в условиях неполного приборного обеспечения // Труды МАИ. 2021. № 118. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-otsenki-veroyatnosti-navedeniya-istrebitelya-v-zonu-razreshennyh-puskov-upravlyaemyh-raket-v-usloviyah-nepolnogo> (дата обращения: 26.06.2024).
41. Желонкин М. В. Полунатурное моделирование ближнего воздушного боя современных истребителей для оценки возможности использования режимов сверхманевренности // Вестник Концерна ВКО Алмаз-Антей. 2018. № 1 (24). С. 100-104. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/polunaturnoe-modelirovanie-blizhnego-vozdushnogo-boya-sovremennyh-istrebiteley-dlya-otsenki-vozmozhnosti-ispolzovaniya-rezhimov> (дата обращения: 26.06.2024).
42. Николаев С. В. Оценка возможностей авиационных комплексов в ближнем воздушном бою // Автоматизация. Современные технологии. 2018. Т. 72. № 1. С. 41-47.
43. Желонкин М. В. Принципы формирования бортовой системы информационно-интеллектуальной поддержки летчика // Инженерный журнал: наука и инновации. 2019. № 9 (93). С. 1-10. DOI: 10.18698/2308-6033-2019-9-1919.
44. Евдокименков В. Н., Ким Р. В., Якименко В. А. Согласование технического и биологического сегментов эргатической системы «самолет-летчик» с использованием нейросетевого подхода // Труды МАИ. 2016. № 89. С. 14. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/soglasovanie-tehnicheskogo-i>

biologicheskogo-segmentov-ergaticheskoy-sistemy-samolet-letchik-s-ispolzovaniem-neyrosetevogo-podhoda (дата обращения: 26.06.2024).

45. Дубов Ю. Б., Желонкин М. В. Особенности системы информационно-интеллектуальной поддержки летчика на режиме сверхманевренности и их реализация на комплексе моделирования // Известия ЮФУ. Технические науки. 2019. № 7 (209). С. 181-188. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-sistemy-informatsionno-intellektualnoy-podderzhki-letchika-na-rezhime-sverhmanevrennosti-i-ih-realizatsiya-na-komplekse> (дата обращения: 26.06.2024).

46. Архипова О. В. Бортовая оперативно советующая экспертная система дальнего воздушного боя один на один маневренного самолета // Труды МАИ. 2011. № 45. С. 19. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bortovaya-operativno-sovetuyuschaya-ekspertnaya-sistema-dalnego-vozdushnogo-boya-odin-na-odin-manevrennogo-samoleta> (дата обращения: 26.06.2024).

47. Желнин Ю. Н., Шелехов С. А., Ярошевский В.А. Определение вероятностей исходов воздушного боя // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2004. № 5. С. 171-174.

48. Ma Y., Ma X., Song X. A Case Study on Air Combat Decision Using Approximated Dynamic Programming // Mathematical Problems in Engineering [Электронный ресурс]. 25.09.2014. – URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2014/183401> (дата обращения: 09.09.2024).

49. Ramteke V., Comandur V., Makkapati V. R., Kothari M. A Game-Theoretic Model for One-on-One Air Combat // IFAC-PapersOnLine. 2022. Vol. 55 (22). P. 261-267.

50. Mao Y., Chen Z., Yang Y., Hu Y. A novel adaptive heuristic dynamic programming-based algorithm for aircraft confrontation games // Fundamental Research. 2021. No. 1. P. 792-799.

51. Zheng Z., Duan H. UAV maneuver decision-making via deep reinforcement learning for short-range air combat // Intelligence & Robotics. 2023. Vol. 3 (1). P. 76-94.

52. Duan Z., etc. Optimal confrontation position selecting games model and its application to one-on-one air combat // Defence Technology. 2024. No. 31. P. 417-428.

53. Dong Y., Ai J, Liu J. Guidance and control for own aircraft in the autonomous air combat: A historical review and future prospects // Journal of Aerospace Engineering. 2019. Vol. 233 (16). P. 5943–5991.

54. AlphaDogfight Trials Go Virtual for Final Event // DARPA [Электронный ресурс]. 2020. – URL: <https://www.darpa.mil/news-events/2020-08-07> (дата обращения: 26.06.2024).

55. US Air Force stages dogfights with AI-flown fighter jet // Defense News [Электронный ресурс]. 2024. – URL: <https://www.defensenews.com/air/2024/04/19/us-air-force-stages-dogfights-with-ai-flown-fighter-jet/> (дата обращения: 26.06.2024).

56. AI pilot beats human in landmark real-life dogfight, Chinese military researchers report // South China Morning Post [Электронный ресурс]. 02.03.2023. –

URL: <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3211976/chinese-military-researchers-report-ai-pilot-beats-human-landmark-real-life-dogfight> (дата обращения: 26.06.2024).

57. Дьячук А. К. Разработка интерактивной автоматизированной системы планирования действий авиации в операциях поражения корабельных групп. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: МАИ, 2011. – 20 с.

58. Галий В. А., Иванищев С. Н., Букрий В. Н. Математическая модель решения задачи целераспределения зенитных огневых средств в контуре ПВО надводного корабля (системе ПВО группы кораблей) при угрозе нападения и при отражении атак противокорабельных крылатых ракет // Вестник ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова. 2022. Т. 25. № 2. С. 23-33.

59. Халимов Н. Р., Мефедов А. В. Распределенная сетевая система управления группой ударных беспилотных летательных аппаратов // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 1-13. DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10301.

60. Медведев М. Ю., Лазарев В. С. Метод планирования движения группы подвижных объектов с использованием динамических репеллеров и целераспределения // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2017. № 1 (66). С. 41-52.

61. Верба В. С., Меркулов В. И., Плящечник А. С. Методы и алгоритмы целераспределения при групповом противоборстве // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2018. Т. 16. № 1. С. 3-20.

62. Кочкаров А. А., Рахманов А. А., Тимошенко А. В., Пулято С. А. Структурно-пространственная модель распределения средств системы мониторинга специального назначения по объектам наблюдения // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2020. № 13. С. 124-132.

63. Воронов Е. М. Методы оптимизации управления многообъектными многокритериальными системами на основе стабильно-эффективных игровых решений: Учебник / Под ред. Н. Д. Егупова. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 576 с.

64. Аюш К. Х., Балаян С. Т., Верницкий Е. В., Пригарин В. Н., Судариков Г. И. Моделирование процесса наведения управляемых авиационных ракет и их целераспределение на групповую воздушную цель // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2022. № 3. С. 118-136.

65. Богданов А. В., Закомолдин Д. В., Булов В. А. Оценка эффективности групповых действий истребителей при совместном наведении атакующих истребителей и истребителей прикрытия // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2022. № 1. С. 58-69.

66. Закомолдин Д. В., Богданов А. В., Булов В. А. Метод наведения группы истребителей с учетом характера решаемых ими задач // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2021. Т. 14. № 7. С. 747-762.

67. Закомолдин Д. В., Богданов А. В. Метод оптимизации управления тактическим назначением истребителей в группе в зависимости от

сложившейся воздушной целевой обстановки // Успехи современной радиоэлектроники. 2022. Т. 76. № 1. С. 31-42.

68. Богданов А. В., Закомолдин Д. В. Метод наведения пары истребителей с распределением между ними задач подавления и поражения воздушной цели // Радиотехника. 2021. Т. 85. № 2. С. 133-146.

69. Закомолдин Д. В., Богданов А. В., Булов В. А. Траекторное управление двухпозиционной системой в составе ударного истребителя и истребителя прикрытия, обеспечивающее эффективное решение задач каждым из них // Радиотехника. 2021. Т. 85. № 9. С. 65-76.

70. Анциферов А. А., Бедрицкий А. И., Богданов А. В., Кучин А. А., Лютиков И. В., Муравьева А. С., Филонов А. А. Пути повышения эффективности поражения групповых воздушных целей в противовоздушном бою // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2021. Т. 14. № 7. С. 763-775.

71. Хрипунов С. П. Способ прогнозирования тактики противника в групповом воздушном бою // Сборник материалов XV школы-семинара «Аэродинамика летательных аппаратов». – М.: Центральный Аэрогидродинамический институт имени проф. Н. Е. Жуковского, 2004. – С. 85-86.

72. Хрипунов С. П. Методы аналитико-эвристического прогнозирования поведения противника в групповом воздушном бою // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2008. Т. 6. № 7. С. 61-72.

73. Хрипунов С. П., Демин А. Н. Алгоритм прогнозирования тактики противника в групповом воздушном бою // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2008. Т. 6. № 7. С. 73-82.

74. Хрипунов С. П., Демин А. Н. Бортовая интеллектуальная система прогнозирования поведения противника в групповом воздушном бою в условиях априорной неопределенности // Нелинейный мир. 2014. Т. 12. № 9. С. 38-44.

75. Чиров Д. С., Хрипунов С. П. Интеллектуальные методы распознавания тактических ситуаций в условиях автономного применения робототехнических комплексов военного назначения // Вопросы безопасности. 2017. № 1. С. 22-34.

76. Ермолов И. Л., Хрипунов С. П. Проблемы группового применения робототехнических комплексов и пути их решения // Экстремальная робототехника. 2018. № 1 (29). С. 279-285.

77. Гонтарь Д. Н., Соловьев В. В., Джаныбеков Р. Ю., Палеев А. В., Семак В. В. Алгоритм оценки боевой эффективности применения разведывательно-ударного робототехнического комплекса военного назначения // Известия ЮФУ. Технические науки. 2024. № 1 (237). С. 43-57.

78. Воробьёв А. А., Сергеев В. В., Булатов О. Г. Перспективы группового применения робототехнических комплексов в операциях (боевых действиях) // Военная мысль. 2024. № 3. С. 53-63.

79. Закомолдин Д. В., Богданов А. В., Часовских С. А., Курмояров С. Г. Метод оптимизации наведения БЛА-постановщика помех при прикрытии им

атакующего истребителя // Успехи современной радиоэлектроники. 2023. Т. 77. № 6. С. 26-34.

80. Пшихопов В. Х., Гонтарь Д. Н., Мартьянов О. В. Концептуальные подходы к формированию сценариев боевого применения групп робототехнических комплексов // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 3. С. 138-182.

81. Yao Z., Li M., Chen Z., Zhou R. Mission decision-making method of multi-aircraft cooperatively attacking multi-target based on game theoretic framework // Chinese Journal of Aeronautics. 2016. Vol. 29 (6). P. 1685-1694.

82. Wang C., etc. Optimal deployment of swarm positions in cooperative interception of multiple UAV swarms // Digital Communications and Networks. 2022. Vol. 9 (4). P. 567-579.

83. Wang E., etc. MADRL-based UAV swarm non-cooperative game under incomplete information // Chinese Journal of Aeronautics. 2024. Vol. 37 (6). P. 293-306.

84. Махнин В. Л. К вопросу о методологии оценки эффективности огневого поражения противника ударной авиацией // Военная мысль. 2020. № 5. С. 131-142.

85. Ананьев А. В., Филатов С. В. Метод выбора рационального способа применения группы ударных беспилотных летательных аппаратов для поражения объектов противника // Военная мысль. 2017. № 2. С. 72-78.

86. Ананьев А. В., Рыбалко А. Г., Иванников К. С., Клевцов Р. П. Динамическая модель процесса поражения временно неподвижных наземных целей группой ударных беспилотных летательных аппаратов малого класса // Труды МАИ. 2020. № 115. С. 18.

87. Ананьев А. В., Рыбалко А. Г., Рязанцев Л. Б., Клевцов Р. П. Применение разведывательно-ударных групп беспилотных летательных аппаратов малого класса по объектам аэродромных участков дорог // Военная мысль. 2020. № 1. С. 85-97.

88. Ананьев А. В., Рыбалко А. Г., Лазорак А. В. Методика обоснования направления захода на цель на основе теории рисков при действии по наземным объектам авиационными комплексами // Труды МАИ. 2020. № 112. С. 19.

89. Ананьев А. В., Петренко С. П., Филатов С. В. Обоснование нового способа задержки выдвижения резервов противника с использованием ударных беспилотных летательных аппаратов при авиационной поддержке сухопутных войск // Вестник Академии военных наук. 2019. № 1 (66). С. 23-28.

90. Глушак А. А., Пересыпкин Д. А. Пространственно-временная модель поражения объектов противоракетной обороны противника оперативно-тактической авиацией с применением высокоточного оружия // Военная мысль. 2023. № 10. С. 46-52.

91. Козирацкий Ю. Л., Иванцов А. В., Тишанинов И. А. Проблемные вопросы развития системы наведения ударной авиации на наземные цели // Военная мысль. 2021. № 11. С. 36-40.

92. Дьячук А. К., Нестеров В. А., Оркин Б. Д., Оркин С. Д., Сыпало К. И., Топоров Н. Б. Комплекс имитационного моделирования совместных действий

пилотируемой и беспилотной авиации и крылатых ракет в операции поражения наземных объектов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2017. № 7 (157). С. 3-13.

93. Михайлов Д. В., Моор А. Н., Ильинов Е. В. Совокупность взаимосвязанных моделей совместного применения оперативно-тактической авиации и беспилотных летательных аппаратов для доразведки объектов противника // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2021. № 19. С. 48-56. DOI 10.24412/2500-4352-2021-19-48-56.

94. Жолобицкий А. И. О способах поражения кораблей из состава авианосной ударной группы противника // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2019. № 12. С. 20-27.

95. Ананьев А. В., Иванников К. С., Кажанов А. П. Модель совместных действий расчетов беспилотных летательных аппаратов малого класса и экипажей ударной авиации при поражении морского десанта // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2021. № 20. С. 10-23.

96. Дьячук А. К., Нестеров В. А., Оркин Б. Д., Оркин С. Д., Сыпало К. И., Топоров Н. Б. Комплекс имитационного моделирования совместных действий пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов в операции поражения авианосной корабельной группы // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2017. № 6 (156). С. 31-40.

97. Дьячук А. К., Оркин Б. Д., Оркин С. Д. Программный комплекс для проведения планирования и имитационного моделирования действий авиации по морским объектам // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2011. № 5 (83). С. 9-15.

98. Дьячук А. К., Оркин Б. Д., Оркин С. Д. Интерактивная автоматизированная система планирования действий авиации различного тактического назначения по морским объектам // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2011. № 4. С. 102-117.

99. Нестоцкий В. А. Комплексная методика выбора рационального способа и оценки эффективности боевых действий командования дальней авиации совместно с воинскими формированиями беспилотных летательных аппаратов большой дальности по выполнению оперативных задач поражения морских группировок противника // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2019. № 12. С. 53-59.

100. Герасимов В. А., Стёпкин А. Ю. Направления повышения эффективности боевых действий истребительной авиации при решении задач противовоздушной обороны в арктической зоне // Вестник Военной академии воздушно-космической обороны. 2020. № 5. С. 70-75.

101. Мистюков Г. А. Повышение боевой эффективности группового применения авиации // Авиационная промышленность. 2007. № 3. С. 2-7.

102. Васильев А. В., Федюнин П. А., Блинов А. В., Стафеев М. А., Ивануткин А. Г. Программа для исследования потенциальных возможностей средств и способов управления авиацией по повышению боевой эффективности авиационных комплексов // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ. № 2018661373. 2018.

103. Николаев С. В. Система экспертной оценки боевых свойств авиационных комплексов в летных испытаниях // Авиакосмическое приборостроение. 2017. № 4. С. 44-55.

104. Ревин С. А., Смирнов А. А. Состояние и перспективы моделирования боевых действий авиации с учетом характеристик системы управления // Сборник статей II Всероссийской научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «АСУ, информационно-телекоммуникационные системы». – Анапа: Военный инновационный технополис «ЭРА», 2020. – С. 133-138.

105. Ананьев А. В., Филатов С. В. Обоснование необходимости создания межвидового разведывательно-ударного комплекса беспилотных летательных аппаратов малого класса для авиационного формирования // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2020. № 13. С. 21-38.

106. Бонин А. С., Фомин М. В. Основные принципы и методический подход к обоснованию уровневых значений показателей боевых свойств перспективных авиационных комплексов военного назначения // Военная мысль. 2009. № 1. С. 52-59.

107. Степанов В. Д. Оценка показателей эффективности авиационных комплексов // Военная мысль. 2013. № 5. С. 44-53.

108. Бонин А. С. Основные положения методических подходов к оценке боевых потенциалов и боевых возможностей авиационных формирований // Военная мысль. 2008. № 1. С. 43-47.

109. Бонин А. С., Горчица Г. И. О боевых потенциалах образцов ВТТ, войсковых формирований и соотношениях сил группировок сторон // Военная мысль. 2010. № 4. С. 61-67.

## References

1. Durov V. R. *Boevoe primeneniye i boevaya effektivnost' istrebitelej-perekhvatchikov* [Combat use and combat effectiveness of interceptor fighters]. Moscow, Voenizdat Publ., 1972. 280 p. (in Russian).

2. Abramov V. N. *Boevoe primeneniye i boevaya effektivnost' aviacionnykh kompleksov vojsk PVO strany* [Combat use and combat effectiveness of aviation complexes of the country's air defense forces]. Moscow, Voennoye izdatel'stvo MO SSSR Publ., 1979. 520 p. (in Russian).

3. Babich V. K. *Istrebiteli menyayut taktiku* [Fighters are changing tactics]. Moscow, Voenizdat Publ., 1983. 151 p. (in Russian).

4. Babich V. K. *Vozdushnyy boj (zarozhdeniye i razvitiye)* [Air combat (origin and development)]. Moscow, Voenizdat Publ., 1991. 191 p. (in Russian).

5. *Spravochnik oficera protivovozdushnoy oborony* [Air Defense Officer's Handbook]. Moscow, Voenizdat Publ., 1981. 431 p. (in Russian).

6. *Spravochnik oficera vozdushno-kosmicheskoy oborony* [Handbook of the Aerospace Defense Officer]. Tver, Military Academy of Aerospace Defense Publ., 2006. 564 p. (in Russian).

7. Arbuzov I. V., Bolkhovitinov O. V., Volochaev O. V., Vol'nov I. I., Gostev A. V., Myshkin L. V., Khabirov R. N., Shekhovtsov V. L. *Boevye aviatsionnye komplekсы i ikh effektivnost': uchebnyk dlya slushateley i kursantov inzhenernykh VUZov VVS* [Combat Aircraft Systems and their Effectiveness: a Textbook for Cadets of Engineering Universities of the Air Force]. Moscow, Air force engineering Academy named after Professor N. E. Zhukovskogo, 2008. 224 p. (in Russian).

8. Babich V. K., Bahanov L. E., Gerasimov G. P., etc. *Aviatsiya PVO Rossii i nauchno-tekhnicheskij progress: boevye komplekсы i sistemy vchera, segodnya, zavtra. Monografiya* [Russian Air defense aviation and scientific and technological progress: combat complexes and systems yesterday, today, tomorrow. Monography]. Moscow, Drofa Publ., 2001. 816 p. (in Russian).

9. Antonov D. A., Babich R. M., Balyko Yu. P., etc. *Aviatsiya VVS Rossii i nauchno-tekhnicheskij progress: boevye komplekсы i sistemy vchera, segodnya, zavtra. Monografiya* [Aviation of the Russian Air Force and scientific and technological progress: combat complexes and systems yesterday, today, tomorrow. Monography]. Moscow, Drofa Publ., 2005. 734 p. (in Russian).

10. Al'hovikov V. M., Denisov V. M., Zarubin A. I., etc. *Aviatsiya VMF Rossii i nauchno-tekhnicheskij progress: koncepcii sozdaniya, puti razvitiya, metodologiya issledovanij. Monografiya* [Aviation of the Russian Navy and scientific and technological progress: concepts of creation, ways of development, research methodology. Monography]. Moscow, Drofa Publ., 2005. 336 p. (in Russian).

11. Kashtan M. I., Zhiharev A. D., Aleshin B. S., etc. *Aviacionnye strategicheskie udarnye komplekсы. Monografiya* [Aviation strategic strike complexes. Monography]. Moscow, Voennyj parad Publ., 2005. 212 p. (in Russian).

12. Kashtan M. I., Zhiharev A. D., Aleshin B. S., etc. *Aviacionnye strategicheskie udarnye komplekсы. Monografiya* [Aviation strategic strike complexes. Monography]. Moscow, Voennyj parad Publ., 2012. 212 p. (in Russian).

13. Zhelnin Yu. N., Shelekhov S. A., Yaroshevskij V. A. *Opredelenie veroyatnostej iskhodov vozdushnogo boya* [Determining the probabilities of air combat outcomes]. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2004, no. 5, pp. 171-174 (in Russian).

14. Yaroshevskij V. A. *K resheniyu model'noj igrovoj zadachi o dal'nem vozdushnom boe s uchetom zapazdyvaniya v variantah "shumnoj" i "besshumnoj" dueli* [To solve the model game problem of long-range air combat, taking into account the delay in the variants of "noisy" and "silent" duel]. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2004, no. 6, pp. 132-142 (in Russian).

15. Yaroshevskij V. A. *Reshenie odnoj model'noj igrovoj zadachi o dal'nem vozdushnom boe* [Solving one model game problem about long-range air combat]. *Uchenye zapiski CAGI*, 2004, vol. 35, no. 1-2, pp. 68-82 (in Russian).

16. Afonin I. E., Makarenko S. I., Mitrofanov D. V. *Analysis of the concept of "Prompt global strike" of air-space attack means and substantiation of prospective directions of air-space defense system development in the arctic in the interest of defense. Aerospace forces. Theory and practice*, 2020, no. 15, pp. 75-87. (in Russian).

17. Makarenko S. I., Kovalskiy A. A., Afonin I. E. Justification of Perspective Directions of Development of the Russian Federation's Anti-Space Defense System in the Interests of Timely Opening and Repulse the Aerospace Attack Means "Prompt Global Strike". *Aerospace forces. Theory and practice*, 2020, vol. 16, pp. 99-115 (in Russian).

18. Afonin I. E., Makarenko S. I., Petrov S. V., Privalov A. A. Analysis of combat experience as groups of unmanned aerial vehicles are used to defeat anti-aircraft missile means of the air defense system in Syria, Libya and Nagorno-Karabakh wars. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 4, pp. 163-191 (in Russian). DOI 10.24411/2410-9916-2020-10406.

19. Afonin I. E., Makarenko S. I., Petrov S.V. Descriptive model of intelligence systems used to detection the elements of an aerospace defense system and target designation when aerospace attack means are doing prompt global strike. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 1, pp. 190-214 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2021-10108.

20. Afonin I. E., Makarenko S. I., Petrov S. V. Descriptive model of the electronic warfare subsystem as part aerospace attack means used to suppression elements of an aerospace defense system. *Systems of Control, Communication and Security*, 2021, no. 2, pp. 76-95 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2021-2-76-95.

21. Makarenko S. I., Afonin I. E., Kopichev O. S., Mamonchikova A. S. The general Lanchester model defining multilateral conflicts. *Automation of Control Processes*, 2021, no. 2, pp. 66-76 (in Russian). DOI: 10.35752/1991-2927-2021-2-64-66-76.

22. Afonin I. E., Petrov S. V., Makarenko S. I. Transition to the adaptive network structure of the aerospace defense control system as one of the main ways for increase of its stability. *Aerospace forces. Theory and practice*, 2021, no. 19, pp. 159-178 (in Russian). DOI: 10.24412/2500-4352-2021-19-159-178.

23. Afonin I. E., Petrov S. V., Gimbickij V. A., Popov M. A., Valiev R. M. Ob aktual'nosti povysheniya ustojchivosti sistemy upravleniya vozdushno-kosmicheskoy oboronoj v konflikte so sredstvami vozdushno kosmicheskogo napadeniya [On the relevance of increasing the stability of the aerospace defense control system in a conflict with the means of aerospace attack]. *Peredacha, obrabotka, otobrazhenie informacii. Sbornik materialov 32-Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Transmission, processing, and display of information. Collection of materials of the 32nd All-Russian Scientific and Practical Conference]. Krasnodar – Terskol, Moscow, Rus-Science Publ., 2022, pp. 43-51 (in Russian).

24. Afonin I. E. Informacionnyj konflikt sistem vozdushno-kosmicheskoy oborony i sredstv vozdushno-kosmicheskogo napadeniya protivnika pri razvitii voennogo konflikta. Obosnovanie aktual'nosti [Information conflict of aerospace defense systems and enemy aerospace attack means during the development of a military conflict. Justification of relevance]. *Problemy sozdaniya i primeneniya kosmicheskikh apparatov i sistem sredstv vyvedeniya v interesah resheniya zadach Vooruzhennyh Sil Rossijskoj Federacii: materialy III Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [The problems of creating and using spacecraft and launch vehicle systems in the interests of solving the tasks of the Armed Forces of the

Russian Federation. Materials of the 3rd All-Russian Scientific and Practical Conference]. Saint-Petersburg, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky Publ., 2022, pp. 184-189 (in Russian).

25. Afonin I. E., Makarenko S. I., Mikhailov R. L. *Bystryj globalnyj udar: retrospektivnyj analiz koncepcii, veroyatnyj scenarij naneseniya, sostav sil i sredstv, posledstviya i prioritety meropriyatiya po protivodejstviyu. Monografiya* [A prompt global strike: a retrospective analysis of the concept, the likely scenario of the application, the composition of additional funds, consequences and priority measures to counteract. Monograph]. Saint Petersburg, Naukoemkie Tehnologii Publ., 2022. 174 p. (in Russian).

26. Afonin I. E., Makarenko S. I., Mikhailov R. L. Descriptive model of combat potentials of sides in the conflict between the aerospace defense system and the aerospace attack means. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 3, pp. 41-66 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2022-3-41-66.

27. Afonin I. E., Tabyrca D. V. Perspektivy ispol'zovaniya novyh informacionnyh tekhnologij v sisteme upravleniya vozdushno-kosmicheskoy oboronoj [Prospects for the use of new information technologies in the aerospace defense control system]. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya sovremennoj nauki po napravleniyu "Robototekhnika". Sbornik statej V Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [The state and prospects of development of modern science in the field of Robotics. Collection of articles of the V All-Russian Scientific and Technical Conference]. Anapa, Federal State Autonomous Institution "Military Innovative Technopolis "ERA", 2023, pp. 421-431 (in Russian).

28. Afonin I. E., Makarenko S. I., Petrov S. V. Model for assessing the stability of an aerospace defense control system in conflict with aerospace attack means. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 3, pp. 227-266 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2023-3-227-266.

29. Afonin I. E., Makarenko S. I., Mikhailov R. L. Aerospace Attack Means by Leading Foreign Countries. Part 1. Intercontinental Ballistic Missiles. *Systems of Control, Communication and Security*, 2024, no. 1, pp. 138-190 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2024-1-138-190.

30. Makarenko S. I., Starostin A. V. Country's air defense system against strikes with unmanned aerial vehicles and cruise missiles: new threats, problematic issues, technical and economic analysis of architecture variants. *Systems of Control, Communication and Security*, 2024, no. 2, pp. 86-148 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2024-2-086-148.

31. Ajzeks R. *Differencial'nye igry* [Differential games]. Moscow, Mir Publ., 1967. 479 p. (in Russian).

32. Evdokimenkov V. N., Lyapin N. A. Minimaksnaya optimizaciya manevrov presledovaniya protivnika v usloviyah blizhnego vozdushnogo boya [Minimax optimization of enemy pursuit maneuvers in close air combat]. *Trudy MAI*, 2019, no. 106, pp. 12 (in Russian).

33. Vorobev K. A., Senchurin Ya. Yu. Design of trajectory of motion manoeuvring purpose in environment MATLAB. *Matematicheskaya morfologiya. Elektronnyj matematicheskij i mediko-biologicheskij zhurnal* [Mathematical

morphology. *Electronic Mathematical and Biomedical Journal*], 2013, vol. 12, no. 1. Available at: <http://sgma.alpha-design.ru/MMORPH/N-37-html/vorobyov/vorobyov.htm> (accessed 17 July 2024) (in Russian).

34. Barinov S. V., Korsunov S. V., Yagello V. V. Etapy vozdushnogo boya i tendencii ih razvitiya [Stages of air combat and trends in their development]. *Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov*. Krasnodar, Krasnodar higher military aviation school of pilots, 2018, pp. 64-70 (in Russian).

35. Danilenko R. A. Analiz tendencij vozdushnogo boya v period upravlyaemogo raketnogo vooruzheniya [Analysis of trends in air combat during the period of guided missile weapons]. *Voennyj nauchno-prakticheskij vestnik*, 2022, vol. 16, no. 1, pp. 79-84 (in Russian).

36. Petrov V. P. Manevrovanie v vozdushnom boju [Maneuvering in air combat]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 1985, no. 1, pp. 53-57 (in Russian).

37. Bulinskij V. A. *Dinamika manevrirovaniya samoleta-istrebitelya v vozdushnom boju* [Dynamics of fighter aircraft maneuvering in aerial combat]. Moscow, Voenizdat Publ., 1957. 200 p. (in Russian).

38. Kiselev M. A. Metodika i rezul'taty resheniya zadachi presledovaniya podvizhnogo ob'ekta dvuhstupenchatoj dinamicheskoj sistemoj [Methods and results of solving the problem of chasing a moving object with a two-stage dynamic system]. *Civil aviation high technologies*, 2017, no. 2, pp. 57-64 (in Russian).

39. Lenshin A. V., Lihachev V. P., Ryazancev L. B. Modelirovanie processa samonavedeniya istrebitelya na manevrennyuyu vozdushnyuyu cel' v interesah ocenki tochnosti vychisleniya tochki pricelivaniya [Modeling the process of homing a fighter to a maneuverable aerial target in the interests of evaluating the accuracy of calculating the aiming point]. *Vestnik Voennogo instituta Ministerstva vnutrennih del Rossii*, 2012, no. 1, pp. 109-115 (in Russian).

40. Efanov V. V., Zakota A. A., Gun'kina A. S. Probability assessing technique for a fighter guidance to the allowed guided missiles launches zone under conditions of incomplete instrumentation. *Trudy MAI*, 2021, no. 118. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metodika-otsenki-veroyatnosti-navedeniya-istrebitelya-v-zonu-razreshennyh-puskov-upravlyaemyh-raket-v-usloviyah-nepolnogo> (accessed 26 June 2024) (in Russian).

41. Zhelonkin M. V. Semiempirical simulation of contemporary fighter planes engaging in dogfight in order to estimate the possibility of using supermanoeuvrability modes. *Journal of "Almaz-Antey" Air and Space Defence Corporation*, 2018, vol. 24, no. 1, pp. 100-104. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/polunaturnoe-modelirovanie-blizhnego-vozdushnogo-boya-sovremennyh-istrebiteley-dlya-otsenki-vozmozhnosti-ispolzovaniya-rezhimov> (accessed 26 June 2024) (in Russian).

42. Nikolaev S. V. Ocenka vozmozhnostej aviacionnyh kompleksov v blizhnem vozdushnom boju [Assessment of the capabilities of aviation complexes in close air combat]. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii*, 2018, vol. 72, no. 1, pp. 41-47 (in Russian).

43. Zhelonkin M. V. Principy formirovaniya bortovoj sistemy informacionno-intellektual'noj podderzhki letchika [Principles of formation of the on-board

information and intellectual support system for the pilot]. *Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii*, 2019, vol. 93, no. 9, pp. 1-10 (in Russian). DOI: 10.18698/2308-6033-2019-9-1919.

44. Evdokimenkov V. N., Kim R. V., Yakimenko V. A. Technical and biological parts of ergatic system "pilot-aircraft" accommodation using artificial neural network approach. *Trudy MAI*, 2016, no. 89, pp. 14. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/soglasovanie-tehnicheskogo-i-biologicheskogo-segmentov-ergaticheskoy-sistemy-samolet-letchik-s-ispolzovaniem-neyrosetevogo-podhoda> (accessed 26 June 2024) (in Russian).

45. Dubov Yu. B., Zhelonkin M. V. Singularities of system informational-intellectual support of the pilot on the regime of supermaneuverability and their implementation on the modelling complex. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2019, vol. 209, no. 7, pp. 181-188. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-sistemy-informatsionno-intellektualnoy-podderzhki-letchika-na-rezhime-sverhmanevrennosti-i-ih-realizatsiya-na-komplekse> (accessed 26 June 2024) (in Russian).

46. Arhipova O. V. Bortovaya operativno sovetuyushchaya ekspertnaya sistema dal'nego vozdushnogo boya odin na odin manevrennogo samoleta [On-board operationally advising expert long-range air combat system for one-on-one maneuverable aircraft]. *Trudy MAI*, 2011, no. 45, pp. 19. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/bortovaya-operativno-sovetuyushchaya-ekspertnaya-sistema-dal'nego-vozdushnogo-boya-odin-na-odin-manevrennogo-samoleta> (accessed 26 June 2024) (in Russian).

47. Zhelnin Yu. N., Shelekhov S. A., Yaroshevskij V. A. Opredelenie veroyatnostej iskhodov vozdushnogo boya [Determining the probabilities of air combat outcomes]. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2004, no. 5, pp. 171-174 (in Russian).

48. Ma Y., Ma X., Song X. A Case Study on Air Combat Decision Using Approximated Dynamic Programming. *Mathematical Problems in Engineering*. Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2014/183401> (accessed 9 September 2024).

49. Ramteke V., Comandur V., Makkapati V. R., Kothari M. A Game-Theoretic Model for One-on-One Air Combat. *IFAC-PapersOnLine*, 2022, vol. 55 (22), pp. 261-267.

50. Mao Y., Chen Z., Yang Y., Hu Y. A novel adaptive heuristic dynamic programming-based algorithm for aircraft confrontation games. *Fundamental Research*, 2021, no. 1, pp. 792-799.

51. Zheng Z., Duan H. UAV maneuver decision-making via deep reinforcement learning for short-range air combat. *Intelligence & Robotics*, 2023, vol. 3, no. 1, pp. 76-94.

52. Duan Z., etc. Optimal confrontation position selecting games model and its application to one-on-one air combat. *Defence Technology*, 2024, no. 31, pp. 417-428.

53. Dong Y., Ai J., Liu J. Guidance and control for own aircraft in the autonomous air combat: A historical review and future prospects. *Journal of Aerospace Engineering*, 2019, vol. 233, no. 16, pp. 5943–5991.

54. AlphaDogfight Trials Go Virtual for Final Event. *DARPA*, 2020. Available at: <https://www.darpa.mil/news-events/2020-08-07> (accessed 26 June 2024).

55. US Air Force stages dogfights with AI-flown fighter jet. *Defense News*, 2024. Available at: <https://www.defensenews.com/air/2024/04/19/us-air-force-stages-dogfights-with-ai-flown-fighter-jet/> (accessed 26 June 2024).

56. AI pilot beats human in landmark real-life dogfight, Chinese military researchers report. *South China Morning Post*, 02.03.2023. Available at: <https://www.scmp.com/news/china/science/article/3211976/chinese-military-researchers-report-ai-pilot-beats-human-landmark-real-life-dogfight> (accessed 26 June 2024).

57. Dyachuk A. K. *Razrabotka interaktivnoj avtomatizirovannoj sistemy planirovaniya dejstvij aviatsii v operatsiyah porazheniya korabel'nyh grupp*. Avtoref. diss. kand. tehn. nauk [Development of an interactive automated system for planning aviation actions in operations against ship groups. Extended Abstract of Ph.D. Tesis]. Moscow, Moscow Aviation Institute, 2011. 20 p. (in Russian).

58. Galij V. A., Ivanishchev S. N., Bukrij V. N. Matematicheskaya model' resheniya zadachi celeraspredeleniya zenitnyh ognevyh sredstv v konture PVO nadvodnogo korablya (sisteme PVO gruppy korablej) pri ugroze napadeniya i pri otrazhenii atak protivokorabel'nyh krylatyh raket [A mathematical model for solving the problem of targeting anti-aircraft firepower in the air defense contour of a surface ship (air defense system of a group of ships) in the event of a threat of attack and repelling attacks by anti-ship cruise missiles]. *Bulletin of Kalashnikov ISTU*, 2022, vol. 25, no. 2, pp. 23-33 (in Russian).

59. Halimov N. R., Mefedov A. V. The distributed network-centric control system of an attacking unmanned aerial vehicles group. *Systems of Control, Communication and Security*, 2019, no. 3, pp. 1-13 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2019-10301.

60. Medvedev M. Yu., Lazarev V. S. Metod planirovaniya dvizheniya gruppy podvizhnyh ob"ektov s ispol'zovaniem dinamicheskikh repellerov i celeraspredeleniya [A method for planning the movement of a group of moving objects using dynamic repellers and target distribution]. *Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2017, vol. 66, no. 1, pp. 41-52 (in Russian).

61. Verba V. S., Merkulov V. I., Plyashechnik A. S. Metody i algoritmy celeraspredeleniya pri gruppovom protivoborstve [Methods and algorithms of targeting in group warfare]. *Journal Information-measuring and Control Systems*, 2018, vol. 16, no. 1, pp. 3-20 (in Russian).

62. Kochkarov A. A., Rahmanov A. A., Timoshenko A. V., Putyato S. A. Structural and spatial model of the special purpose monitoring system means distribution by observation objects. *Aerospace forces. Theory and practice*, 2020, no. 13, pp. 124-132 (in Russian).

63. Voronov E. M. *Metody optimizatsii upravleniya mnogoob"ektnymi mnogokriterial'nymi sistemami na osnove stabil'no-effektivnyh igrovyyh reshenij*

[Methods for optimizing the management of multi-object multi-criteria systems based on stable and efficient gaming solutions]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2001. 576 p. (in Russian).

64. Ayush K. H., Balanyan S. T., Vernickij E. V., Prigarin V. N., Sudarikov G. I. Modelirovanie processa navedeniya upravlyaemyh aviacionnyh raket i ih celeraspredelenie na gruppovuyu vozdushnyuyu cel' [Simulation of the guided missile guidance process and their targeting to a group aerial target]. *Vestnik of Russian New University. Series Complex systems: models, analysis, management*, 2022, no. 3, pp. 118-136 (in Russian).

65. Bogdanov A. V., Zakomoldin D. V., Bulov V. A. Evaluation of the effectiveness of group actions of airfighters, with joint guidance of attacking fighters and cover airfighters. *Journal of the Siberian Federal University. Engineering and technology*, 2022, no. 1, pp. 58-69 (in Russian).

66. Zakomoldin D. V., Bogdanov A. V., Bulov V. A. The method of targeting a group of fighters, taking into account the nature of the tasks they solve. *Journal of the Siberian Federal University. Engineering and technology*, 2021, vol. 14, no. 7, pp. 747-762 (in Russian).

67. Zakomoldin D. V., Bogdanov A. V. Metod optimizacii upravleniya takticheskim naznacheniem istrebitel'ej v grupe v zavisimosti ot slozhivshejsya vozduшной celevoj obstanovki [A method for optimizing the management of the tactical assignment of fighters in a group, depending on the current air target situation]. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2022, vol. 76, no. 1, pp. 31-42 (in Russian).

68. Bogdanov A. V., Zakomoldin D. V. Metod navedeniya pary istrebitel'ej s raspredeleniem mezhdum nimi zadach podavleniya i porazheniya vozduшной celi [A method of targeting a pair of fighters with the distribution of tasks between them to suppress and defeat an aerial target]. *Radiotekhnika*, 2021, vol. 85, no. 2, pp. 133-146 (in Russian).

69. Zakomoldin D. V., Bogdanov A. V., Bulov V. A. Traektornoe upravlenie dvuhpozicionnoj sistemoj v sostave udarnogo istrebitelya i istrebitelya prikrytiya, obespechivayushchee effektivnoe reshenie zadach kazhdym iz nih [Trajectory control of a two-position system consisting of a strike fighter and a cover fighter, providing an effective solution to the tasks of each of them]. *Radiotekhnika*, 2021, vol. 85, no. 9, pp. 65-76 (in Russian).

70. Anciferov A. A., Bedrickij A. I., Bogdanov A. V., Kuchin A. A., Lyutikov I. V., Murav'eva A. S., Filonov A. A. Ways to improve the effectiveness of defeating group air targets in anti-aircraft combat. *Journal of the Siberian Federal University. Engineering and technology*, 2021, vol. 14, no. 7, pp. 763-775 (in Russian).

71. Hripunov S. P. Sposob prognozirovaniya taktiki protivnika v gruppovom vozduшном boju [A method for predicting enemy tactics in a group dogfight]. *Sbornik materialov XV shkoly-seminara "Aerodinamika letatel'nyh apparatov"* [Collection of materials of the 15th school-seminar "Aerodynamics of aircraft"]. Moscow, The Central Aerohydrodynamic Institute named after prof. N. E. Zhukovsky, 2004, pp. 85-86 (in Russian).

72. Hripunov S. P. Metody analitiko-evristicheskogo prognozirovaniya povedeniya protivnika v gruppovom vozdushnom boyu [Methods of analytical and heuristic forecasting of enemy behavior in group air combat]. *Journal Information-measuring and Control Systems*, 2008, vol. 6, no. 7, pp. 61-72 (in Russian).

73. Hripunov S. P., Demin A. N. Algoritm prognozirovaniya taktiki protivnika v gruppovom vozdushnom boyu [An algorithm for predicting enemy tactics in a group dogfight]. *Journal Information-measuring and Control Systems*, 2008, vol. 6, no. 7, pp. 73-82 (in Russian).

74. Hripunov S. P., Demin A. N. Bortovaya intellektual'naya sistema prognozirovaniya povedeniya protivnika v gruppovom vozdushnom boyu v usloviyah apriornoj neopredelennosti [On-board intelligent system for predicting enemy behavior in group air combat under conditions of a priori uncertainty]. *Nelineinyi mir*, 2014, vol. 12, no. 9, pp. 38-44 (in Russian).

75. Chirov D. S., Hripunov S. P. Intellektual'nye metody raspoznavaniya takticheskikh situacij v usloviyah avtonomnogo primeneniya robototekhnicheskikh kompleksov voennogo naznacheniya [Intelligent methods for recognizing tactical situations in the conditions of autonomous use of military robotic complexes]. *Security Issues*, 2017, no. 1, pp. 22-34 (in Russian).

76. Ermolov I. L., Hripunov S. P. Issues of group-based usage of unmanned vehicles. *Extreme Robotics*, 2018, vol. 29, no. 1, pp. 279-285 (in Russian).

77. Gontar' D. N., Solov'ev V. V., Dzhanybekov R. Yu., Paleev A. V., Semak V. V. Algoritm ocenki boevoj effektivnosti primeneniya razvedyvatel'no-udarnogo robototekhnicheskogo kompleksa voennogo naznacheniya [An algorithm for evaluating the combat effectiveness of the use of a military reconnaissance and strike robotic complex]. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2024, vol. 237, no. 1, pp. 43-57 (in Russian).

78. Vorobyov A. A., Sergeev V. V., Bulatov O. G. Perspektivy gruppovogo primeneniya robototekhnicheskikh kompleksov v operatsiyah (boevyh dejstviyah) [Prospects for the group application of robotic systems in operations (combat operations)]. *Military Thought*, 2024, no. 3, pp. 53-63 (in Russian).

79. Zakomoldin D. V., Bogdanov A. V., Chasovskih S. A., Kurmoyarov S. G. Metod optimizacii navedeniya BLA-postanovshchika pomekh pri prikrytii im atakuyushchego istrebitelya [A method for optimizing the guidance of a jamming UAV when it covers an attacking fighter]. *Uspekhi sovremennoi radioelektroniki*, 2023, vol. 77, no. 6, pp. 26-34 (in Russian).

80. Pshikhopov V. Kh., Gontar D. N., Martyanov O. V. Conceptual Approaches to the Formation of Scenarios for the Combat Use of Groups of Robotic Systems. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 3, pp. 138-182 (in Russian).

81. Yao Z., Li M., Chen Z., Zhou R. Mission decision-making method of multi-aircraft cooperatively attacking multi-target based on game theoretic framework. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2016, vol. 29, no. 6, pp. 1685-1694.

82. Wang C., etc. Optimal deployment of swarm positions in cooperative interception of multiple UAV swarms. *Digital Communications and Networks*, 2022, vol. 9, no. 4, pp. 567-579 (in English).

83. Wang E., etc. MADRL-based UAV swarm non-cooperative game under incomplete information. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2024, vol. 37, no. 6, pp. 293-306 (in English).

84. Mahnin V. L. K voprosu o metodologii ochenki effektivnosti ognеvogo porazheniya protivnika udarnoj aviaciej [On the issue of methodology for evaluating the effectiveness of enemy fire damage by strike aircraft]. *Military Thought*, 2020, no. 5, pp. 131-142 (in Russian).

85. Ananев A. V., Filatov S. V. Metod vybora racional'nogo sposoba primeneniya gruppy udarnyh bespilotnyh letatel'nyh apparatov dlya porazheniya ob"ektov protivnika [The method of choosing a rational method of using a group of strike unmanned aerial vehicles to destroy enemy targets]. *Military Thought*, 2017, no. 2, pp. 72-78 (in Russian).

86. Ananев A. V., Rybalko A. G., Ivannikov K. S., Klevcov R. P. Dynamic model of temporarily fixed ground targets hitting process by a group of small-class attack unmanned aerial vehicles. *Trudy MAI*, 2020, no. 115, pp. 18 (in Russian).

87. Ananев A. V., Rybalko A. G., Ryazancev L. B., Klevcov R. P. Primenenie razvedyvatel'no-udarnyh grupp bespilotnyh letatel'nyh apparatov malogo klassa po ob"ektam aerodromnyh uchastkov dorog [The use of reconnaissance and strike groups of small-class unmanned aerial vehicles on objects of airfield road sections]. *Military Thought*, 2020, no. 1, pp. 85-97 (in Russian).

88. Ananев A. V., Rybalko A. G., Lazorak A. V. A technique for target run-in direction justification based on theory of risk when striking ground-based objects by aircraft complexes. *Trudy MAI*, 2020, no. 112, pp. 19 (in Russian).

89. Ananев A. V., Petrenko S. P., Filatov S. V. The justification method of the enemy reserve movement preventing with usage of strike unmanned aerial vehicles at air support of land forces. *Vestnik Akademii voennykh nauk*, 2019, vol. 66, no. 1, pp. 23-28 (in Russian).

90. Glushak A. A., Peresyppkin D. A. Prostranstvenno-vremennaya model' porazheniya ob"ektov protivoraketnoj oborony protivnika operativno-takticheskoy aviaciej s primeneniem vysokotochnogo oruzhiya [A spatiotemporal model of the destruction of enemy missile defense facilities by operational and tactical aircraft using high-precision weapons]. *Military Thought*, 2023, no. 10, pp. 46-52 (in Russian).

91. Kozirackij Yu. L., Ivancov A. V., Tishaninov I. A. Problemnye voprosy razvitiya sistemy navedeniya udarnoj aviacii na nazemnye celi [Problematic issues of the development of a strike aircraft guidance system for ground targets]. *Military Thought*, 2021, no. 11, pp. 36-40 (in Russian).

92. Dyachuk A. K., Nesterov V. A., Orkin B. D., Orkin S. D., Sypalo K. I., Toporov N. B. A simulation complex of manned, unmanned aviation and winged missiles joint warfare in the ground-based objects defeat operation. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii*, 2017, vol. 157, no. 7, pp. 3-13 (in Russian).

93. Mihajlov D. V., Moor A. N., Ilinov E. V. A combination of interrelated models of cooperative application of the operational-tactical aviation and unmanned

aerial vehicles for the pre-reconnaissance of enemy objects. *Aerospace forces. Theory and practice*, 2021, no. 19, pp. 48-56 (in Russian).

94. Zholobickij A. I. About methods of damaging ships from the enemy carrier strike group. *Aerospace forces. Theory and practice*, 2019, no. 12, pp. 20-27 (in Russian).

95. Ananев A. V., Ivannikov K. S., Kazhanov A. P. Strike aircraft crews and small-class unmanned aerial vehicles groups joint actions model in the event of a marine landing. *Aerospace forces. Theory and practice*, 2021, no. 20, pp. 10-23 (in Russian).

96. Dyachuk A. K., Nesterov V. A., Orkin B. D., Orkin S. D., Sypalo K. I., Toporov N. B. A simulation complex of manned and unmanned aerial vehicles joint warfare in the aircraft-carrier naval group defeat operation. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii*, 2017, vol. 156, no. 6, pp. 31-40 (in Russian).

97. Dyachuk A. K., Orkin B. D., Orkin S. D. The program complex for planning and simulation of air force actions against naval targets. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii*, 2011, vol. 83, no. 5, pp. 9-15 (in Russian).

98. Dyachuk A. K., Orkin B. D., Orkin S. D. Interactive automated planning system for actions of aviation of different tactical designation against naval objects. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2011, no. 4, pp. 102-117 (in Russian).

99. Nestockij V. A. Comprehensive method of selecting the rational method and estimating the effectiveness of the battle actions commands of long-range aviation together with military formations of unmanned aerial vehicles of long range to perform operational tasks of defeating enemy naval groups. *Aerospace forces. Theory and practice*, 2019, no. 12, pp. 53-59 (in Russian).

100. Gerasimov V. A., Styopkin A. Yu. Directions of increasing the effectiveness of combat actions of fighter aircraft when solving air defense mission in the arctic zone. *Vestnik Voennoj akademii vozdushno-kosmicheskoy oborony*, 2020, no. 5, pp. 70-75 (in Russian).

101. Mistyukov G. A. Povyshenie boevoy effektivnosti gruppovogo primeneniya aviatsii [Improving the combat effectiveness of the group use of aviation]. *Aviacionnaya promyshlennost'*, 2007, no. 3, pp. 2-7 (in Russian).

102. Vasil'ev A. V., Fedyunin P. A., Blinov A. V., Stafeev M. A., Ivanutkin A. G. Programma dlya issledovaniya potencial'nyh vozmozhnostej sredstv i sposobov upravleniya aviatsiej po povysheniyu boevoy effektivnosti aviacionnykh kompleksov [A program to explore the potential of aviation management tools and methods to improve the combat effectiveness of aviation complexes]. The Certificate on Official Registration of the Computer Program in Russia. No. 2018661373, 2018.

103. Nikolaev S. V. System of expert evaluation of military properties aviation complexes in flight tests. *Aerospace Instrument-Making*, 2017, no. 4, pp. 44-55 (in Russian).

104. Revin S. A., Smirnov A. A. Sostoyanie i perspektivy modelirovaniya boevykh dejstvij aviatsii s uchetom harakteristik sistemy upravleniya [The state and prospects of modeling aviation combat operations, taking into account the

characteristics of the control system]. Sbornik statej II Vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Sostoyanie i perspektivy razvitiya sovremennoj nauki po napravleniyu "ASU, informacionno-telekommunikacionnye sistemy" [Collection of articles of the 2nd All-Russian Scientific and Technical Conference "The state and prospects of development of modern science in the field of automated control systems, information and telecommunication systems"]. Anapa, Federal State Autonomous Institution "Military Innovative Technopolis "ERA", 2023, pp. 133-138 (in Russian).

105. Anan'ev A. V., Filatov S. V. Substantiation of the need to create an interspecific reconnaissance-strike complex of small-class unmanned aerial vehicles for air force unit. *Aerospace forces. Theory and practice*, 2020, no. 13, pp. 21-38 (in Russian).

106. Bonin A. S., Fomin M. V. Osnovnye principy i metodicheskij podhod k obosnovaniyu urovnevnyh znachenij pokazatelej boevykh svojstv perspektivnykh aviacionnykh kompleksov voennogo naznacheniya [Basic principles and methodological approach to substantiating the level values of indicators of combat properties of promising military aviation complexes]. *Military Thought*, 2009, no. 1, pp. 52-59 (in Russian).

107. Stepanov V. D. Ocenka pokazatelej effektivnosti aviacionnykh kompleksov [Evaluation of performance indicators of aviation complexes]. *Military Thought*, 2013, no. 5, pp. 44-53 (in Russian).

108. Bonin A. S. Osnovnye polozheniya metodicheskikh podhodov k ocenke boevykh potencialov i boevykh vozmozhnostej aviacionnykh formirovanij [The main provisions of methodological approaches to the assessment of combat capabilities and combat capabilities of aviation formations]. *Military Thought*, 2008, no. 1, pp. 43-47 (in Russian).

109. Bonin A. S., Gorchica G. I. O boevykh potencialah obrazcov VTT, vojskovykh formirovanij i sootnosheniyah sil gruppirovok storon [On the combat potentials of weapons and military equipment samples, military formations and the power ratios of the factions of the parties]. *Military Thought*, 2010, no. 4, pp. 61-67 (in Russian).

**Статья поступила 13 июля 2024 г.**

### **Информация об авторах**

*Макаренко Сергей Иванович* – доктор технических наук, доцент. Профессор кафедры информационной безопасности. Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина). Советник генерального директора. ПАО «Интелтех». Область научных интересов: сети и системы связи; радиоэлектронная борьба; информационное противоборство; ведение боевых действий и комплексы вооружения. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Адрес: Россия, 197376, Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, 5.

*Афонин Илья Евгеньевич* – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры авиационного и радиоэлектронного оборудования. Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков. Область научных интересов: информационный конфликт средств воздушно-космического нападения и системы воздушно-космической обороны; радиолокационные системы обнаружения, распознавания и целеуказания; обработка радиолокационных сигналов. E-mail: [ilyaafonin@yandex.ru](mailto:ilyaafonin@yandex.ru)

Адрес: Россия, 350090, г. Краснодар, ул. Дзержинского, д. 135.

---

## Modeling of aviation combat operations and evaluation of their effectiveness - analysis of papers, models and actual research directions

S. I. Makarenko, I. E. Afonin

**Relevance.** *The analysis of modern military conflicts has shown that an important component of success in waging war is the conquest of air superiority, and the combat use of aviation remains one of the main ways to defeat the enemy. At the same time, an appropriate area of research is the development of methods of combat use of aviation of the air force and increasing its combat effectiveness. Such development can be based on a deep and comprehensive analysis of scientific research on this topic. In this regard, it is relevant to analyze well-known articles and models, approaches to modeling. The purpose of the paper is to analyze existing publications, models and modeling methods, as well as current research in the field of aviation combat operations and its combat effectiveness. Special attention will be paid to the analysis of modeling of single and group air battles, assessment of the combat effectiveness of individual aircraft (aviation complexes) and aviation actions in general. The methods used.* During the research, methods of induction and deduction based on the principles of logic were applied. **Results.** *As a result of the analysis of more than 100 open sources, general and particular patterns have been identified regarding the study of aviation combat operations and its combat effectiveness. In particular, the following aspects were considered: simulation of air battles; modeling of kinematic trajectories of aircraft movement; modeling of decision-making by pilots; the impact of the flight and technical characteristics of aircraft, as well as the methods of their combat use on the effectiveness of operational and tactical aviation. The novelty of the research lies in the identification of general and particular patterns and approaches to the study of aviation combat operations and the assessment of its combat effectiveness. To do this, various modeling methods and scientific and methodological apparatus were analyzed. Practical significance.* The analysis presented in the article can be used by technical specialists to substantiate new technological solutions in the field of improving aircraft, aviation complexes and control systems. Military experts can also use this analysis to justify new ways of conducting armed struggle, taking into account the prospects for improving military aviation. In addition, the analysis will be useful to researchers and applicants engaged in scientific research in the field of aviation operations of the Air Force.

**Key words:** *combat operations, simulation, combat simulation, military aviation, air force aviation, air force, air combat, single air combat, group air combat, long-range air combat, close air combat, combat planning, aerial opponent, method of combat use, combat effectiveness, decision-making, flight-technical characteristics, defeat of an aerial enemy, defeat of ground objects, defeat of marine objects, tactical technique, maneuver, aviation complex, unmanned aerial vehicle, aircraft, aircraft.*

### Information about Authors

*Sergey Ivanovich Makarenko* – Dr. habil. of Engineering Sciences, Docent. Professor of Information Security Department. Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI'. Advisor to the CEO. JSC "Inteltech". Field of research: stability of

network against the purposeful destabilizing factors; electronic warfare; information struggle; combat operations and weapon systems. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Address: Russia, 197376, Saint Petersburg, Professor Popov Street, 5.

*Ilya Evgenievich Afonin* – Ph.D. of Engineering Sciences, Docent. Associate Professor at the Department of aviation and radio-electronic equipment. Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots. Field of research: information conflict of air and space attacking means and air and space defense systems; radar detection; recognition and target designation systems; radar signal processing. E-mail: ilyaafonin@yandex.ru

Address: Russia, 350090, Krasnodar, Dzerzhinsky Street, 135.