

УДК 623.76

Анализ подходов к математическому моделированию процесса противодействия беспилотным летательным аппаратам

Бойко А. А., Майхуб Х. И., Мосолов И. А.

Постановка задачи: в настоящее время задача противодействия малогабаритным (то есть нано-, микро-, мини- и ближнего радиуса действия) беспилотным летательным аппаратам на критически важных объектах военного и гражданского назначения имеет особую актуальность. Системы, обеспечивающие выполнение этой задачи, являются технически сложными. Они должны объединять в себе подсистемы связи, разведки, управления, радиоэлектронной борьбы и огневого поражения. Сегодня такие системы строятся эмпирически, без учета этой особенности, нередко даже без отдельных подсистем, и потому не могут гарантировать выполнение возложенной на них задачи в экстремальных условиях, когда для нанесения максимального ущерба критически важному объекту используется значительное количество малогабаритных беспилотных летательных аппаратов, в том числе в виде роя, управляемого искусственным интеллектом. Для повышения эффективности подобных систем требуется развитый научно-методический аппарат ее оценки. В основе этого аппарата должна лежать совокупность моделей процесса противодействия беспилотным летательным аппаратам на критически важном объекте, воспроизводящая указанную особенность. **Цель работы:** выявление способности известных математических моделей процесса противодействия беспилотным летательным аппаратам учитывать взаимное влияние процессов разведки, связи, управления, огневого поражения и радиоэлектронной борьбы. **Используемый метод:** системный анализ. **Новизна:** рассмотрение процесса противодействия малогабаритным беспилотным летательным аппаратам на критически важных объектах в контексте антагонистического конфликта двух высокотехнологичных организационно-технических систем, каждая из которых для достижения своих целей реализует цикл применения процессов разведки, связи, управления, огневого поражения и радиоэлектронной борьбы. **Результат:** выявлена необходимость совершенствования существующих высоко детализированных имитационных моделей процесса противодействия беспилотным летательным аппаратам, учитывающих преимущественно процессы разведки и огневого поражения, за счет дополнительного воспроизведения процессов связи, управления и радиоэлектронной борьбы, а также аналитических моделей этого процесса за счет воспроизведения радиоэлектронной борьбы каждой из сторон. **Значимость:** результат работы является побудительным фактором для совершенствования научно-методического аппарата оценки эффективности противодействия малогабаритным беспилотным летательным аппаратам на критически важном объекте.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, критически важный объект, эффективность, противодействие, имитационное и аналитическое моделирование боя.

Актуальность

Современный уровень развития малогабаритных (то есть нано-, микро-, мини- и ближнего радиуса действия) беспилотных летательных аппаратов и систем управления ими (далее кратко – БпЛА) делает их опасным оружием в ходе диверсионной и террористической деятельности на критически важных объек-

Библиографическая ссылка на статью:

Бойко А. А., Майхуб Х. И., Мосолов И. А. Анализ подходов к математическому моделированию процесса противодействия беспилотным летательным аппаратам // Системы управления, связи и безопасности. 2024. № 4. С. 48-71. DOI: 10.24411/2410-9916-2024-4-48-71

Reference for citation:

Boyko A. A., Maihoub H. I., Mosolov I. A. Countering UAVs Mathematical Models Overview. *Systems of Control, Communication and Security*, 2024, no. 4, pp. 48-71 (in Russian). DOI: 10.24411/2410-9916-2024-4-48-71

тах (КВО) военного и гражданского назначения. Основными способами противодействия таким БпЛА являются радиоэлектронное поражение (в том числе подавление), огневое поражение (ОП) (в том числе с помощью БпЛА-истребителей) и перехват управления [1, 2, 3]. Применение этих способов характеризуется важной особенностью – требует прогнозирования, планирования, координации и контроля одновременно реализуемых в рамках единого технологического цикла системы противодействия БпЛА на КВО процессов функционирования ее подсистем разведки, связи, управления, ОП и радиоэлектронной борьбы (РЭБ). Такую систему предлагается называть *полнофункциональной*. Однако сегодня системы противодействия БпЛА строятся без учета этой особенности, нередко даже без отдельных подсистем, и потому не могут гарантировать выполнение возложенной на них задачи в экстремальных условиях, когда для нанесения максимального ущерба КВО используется значительное количество БпЛА, в том числе в виде роя.

Изложенное свидетельствует о *противоречии в практике между* потребностью в прогнозировании, планировании, координации и контроле совокупности одновременно реализуемых и взаимосвязанных процессов разведки, связи, управления, ОП и РЭБ при противодействии БпЛА и отсутствием таких возможностей у существующих систем противодействия малогабаритным БпЛА на КВО. Для устранения этого противоречия нужна высоко детализированная модель конфликта, воспроизводящая не только существующие способы применения и противодействия БпЛА на КВО, но и совокупность используемых для этого взаимосвязанных процессов разведки, связи, управления, ОП и РЭБ.

Постановка задачи

Принимая в настоящей работе за ориентир повышение эффективности системы противодействия БпЛА на КВО, нужно прояснить, что именно подразумевается под эффективностью. Эффективность сложной системы – это многогранное понятие, объединяющее в себе [4]:

- внешнюю функциональную (или боевую) эффективность;
- внутреннюю функциональную (или техническую) эффективность;
- экономическую эффективность;
- социальную эффективность;
- эффективность управления;
- эффективность жизненного цикла.

Разработчики систем противодействия БпЛА, говоря об их эффективности, обычно имеют в виду техническую эффективность. Показатели технической эффективности могут разделяться на информационно-боевые (например, оперативность боевого цикла) и информационные (например, вероятность распознавания цели или ее поражения). Не умаляя важность иных составляющих эффективности, в настоящей работе рассматривается именно боевая эффективность, которой в современных отечественных научных публикациях незаслуженно уделяется мало внимания. Хотя только боевая эффективность учитывает системность всех разнородных взаимовлияющих процессов, имеющих место в

конфликте, частью которого является объект разработки. Основными показателями боевой эффективности традиционно являются соотношение сил (боевых потенциалов), пространственные и временные показатели выполнения боевой задачи.

Боевая эффективность средств противодействия БпЛА на КВО может быть оценена с использованием высоко детализированной модели соответствующего антагонистического конфликта, а не его отдельных дуэльных ситуаций типа «средство (группа однородных средств) – средство (группа однородных средств)», применяемых для оценки технической эффективности. Опираясь в этом случае нужно на известные и широко распространенные системы моделирования боевых действий.

В данном контексте следует исходить из того, что информация о содержании моделей боя, заложенных в известных зарубежных системах поддержки принятия решения командира (таких как, например, широко известные «JWARS», «JTLS» или анонсируемый «Palantir»), весьма противоречива и поэтому не может рассматриваться в качестве отправной точки исследования. В свою очередь модели боя в современных компьютерных играх жанра «war game» ориентированы на экспертную (хотя *иногда* и сравнительно адекватную) оценку ущерба элементам боевых порядков от различного вида материального и информационного воздействия. Эмпиризм и экспертное мнение в данном случае «играют злую шутку», когда экспертам крайне сложно учесть все многообразие взаимовлияющих материальных и информационных факторов в современном антагонистическом конфликте.

Как следствие в качестве отправной точки исследования следует рассматривать отечественные образцы систем высоко детализированного моделирования боевых действий (например, расчетно-моделирующий комплекс Сухопутных войск ВС РФ [5], изделие «Спектр» компании «РусБИТех» [6]). Результаты анализа доступной открытой информации показывают, что эти системы не учитывают временные и вероятностные характеристики процессов разведки, связи, управления, ОП и РЭБ, взаимосвязанных в рамках боевых циклов противостоящих сторон в конфликте БпЛА и соответствующих систем защиты КВО. Поэтому результаты применения таких систем моделирования не могут считаться достаточной основой для синтеза эффективной системы противодействия малогабаритным БпЛА на КВО.

Цель работы – *анализ существующих математических моделей процесса противодействия малогабаритным БпЛА на предмет выявления их способности учитывать взаимное влияние процессов ОП, разведки, управления, связи и РЭБ, связанных единым информационным пространством.*

Анализ математических моделей

Начнем анализ математических моделей, позволяющих оценить эффективность процесса противодействия БпЛА на КВО, с пионерских результатов научной школы М. В. Сильникова.

В 2016 году в работе [7] **М. В. Сильников** и **А. В. Андреев** предложили модель этого процесса, на основе которой разработана методика распределения потенциала системы противовоздушной обороны (ПВО) при прикрытии объектов обороны в заданном районе. Исходные данные:

- по различным типам стационарных объектов в границах заданного района воздействуют нескольких типов БпЛА;
- количество воздействий определенного типа средств поражения в границах района ограничено;
- каждое воздействие наносит объекту фиксированный ущерб, который определяется *методом экспертной оценки*;
- прикрывают объекты определенное количество средств ПВО с некоторой эффективностью.

Показатель эффективности применения огневых средств ПВО – величина суммарного предотвращения ущерба. В основе методики лежит классическая для задач распределения ресурсов модель, основанная на применении *теории вероятностей и алгебраических выражений*.

Далее в 2022 году в работе [8] **М. В. Сильников** совместно с **В. И. Лазоркиным** развивают идею работы [7] и с использованием *того же математического аппарата* рассматривают модель противодействия рою БпЛА-камикадзе на отдельном стационарном объекте с горизонтального полета или с пикирования с одного или с нескольких направлений (см. рис. 1). Средство поражения БпЛА-камикадзе на маршрутах полета (в пределах дальней зоны защиты) – неуправляемые ракеты дальнего действия (НУР ДД). Средство поражения атакующих БпЛА-камикадзе (в пределах ближней зоны) – малые управляемые ракеты ближнего действия (МУР БД).

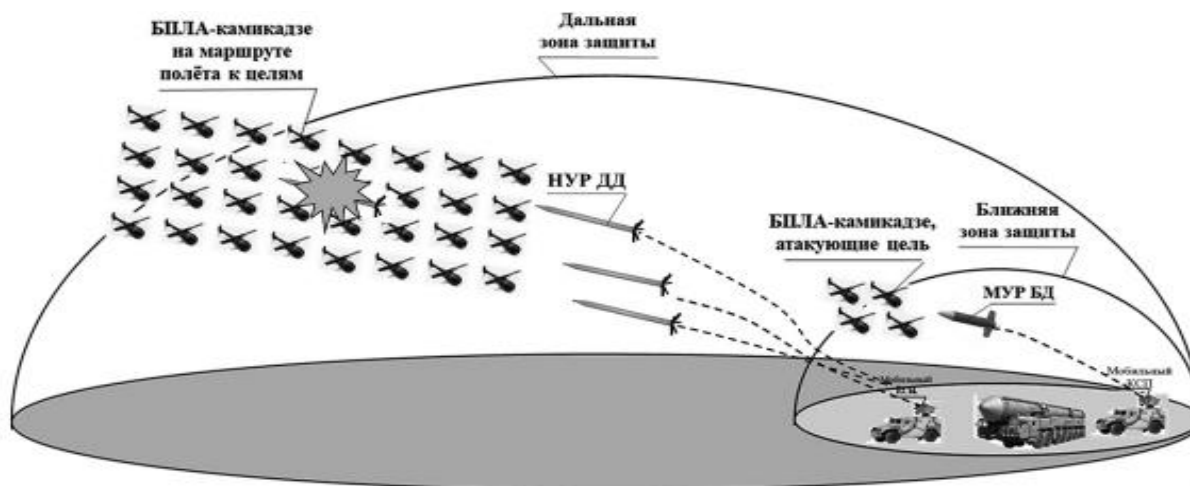


Рис. 1. Схема построения зоны защиты объектов

Результаты моделирования, приведенные в [8], показывают, что зона защиты объектов должна включать как минимум два эшелона защиты: первый эшелон должен обеспечивать поражение БпЛА, находящихся на маршрутах полета к целям (удаление границы дальней зоны защиты от объекта защиты – порядка 5...8 км), второй – поражение атакующих БпЛА. Также модель поясняет

необходимость применения МУР БД для противодействия малогабаритным БпЛА на КВО. На эту модель можно опираться, выстраивая комплексную защиту не только мобильных, но и площадных объектов, располагая МУР БД непосредственно вблизи охраняемых объектов. Однако в данной модели не учитывается применение средств РЭБ. Хотя общеизвестно, что, с использованием этих средств в комплексе со средствами ПВО защита стационарных объектов становится более эффективной.

В ставшей уже классической работе [9] в 2019 году **В. В. Ростопчин** предложил *имитационную модель* отражения налета группы БпЛА на прикрываемый зенитно-ракетным комплексом (ЗРК) участок местности. Задачей ЗРК является поражение всех БпЛА, стремящихся войти в зону ответственности. Исходные данные:

- на удалении 25 км от прикрываемой зоны располагается 10 км зона, из которой одновременно стартует неупорядоченная однородная группа из 15 БпЛА самолетного типа со стартовой массой 10 кг, летящих со скоростями 100...300 км/ч на высотах 200...800 м;
- полет БпЛА (каждый имеет свой номер) осуществляется автономно в секторе 90° и не синхронизируется с другими членами группы;
- дальность обнаружения БпЛА с помощью средств оптико-электронной и радиолокационной разведки в зависимости от высоты полета составляет 1,5...2,5 км;
- время налета 10 минут.

Результаты моделирования:

- ЗРК не обеспечил прикрытие объекта (10 из 15 БпЛА вошли в зону ответственности ЗРК и смогли применить бортовые средства поражения);
- ЗРК израсходовал весь боезапас, не выполнив задачу по прикрытию объекта;
- большие углы доворота осей ЗРК на первые 10 воздушные цели привели к физической невозможности поражения этих БпЛА.

Применение этой имитационной модели показало, что поражение БпЛА средствами ЗРК в большинстве случаев является низкоэффективным, поскольку приводит к высокому расходу боеприпасов – невозможности материального ресурса, а применение нескольких волн налетов групп дешевых БпЛА может парализовать ПВО. Автор справедливо полагает, что в связи с этим перспективным направлением противодействия БпЛА является применение средств РЭБ, ресурс которых, при наличии внешнего питания, практически неограничен. Однако учет этих средств в модели отсутствует.

В 2020 году в работе [10] **А. С. Гусева, Р. А. Дурнев, А. С. Кудряшов и Е. В. Свиридок** на основе использования *логико-вероятностного метода* предложили модель процесса противодействия массированному налету БпЛА, приводящему к быстрому исчерпанию ресурса средств ПВО и последующей их неспособности отразить удар других средств воздушного нападения (пилотируемой авиации, крылатых ракет и т.п.). Модель позволяет оценить эффективность применения мини-БпЛА типа «квадрокоптер» с учетом технических характеристик и тактических особенностей их использования. Далее в 2021 году в

работе [11] те же авторы совершенствуют свою модель, прибегая к использованию *математического аппарата теории массового обслуживания и марковских процессов*. В [11] установлено, что если система противодействия справляется с большими потребными углами поворота осей направленности стволов зенитных пушек или направляющих зенитных ракет для стрельбы по малогабаритным БпЛА, расстояние между которыми или время пролета определенных рубежей носят ярко выраженный случайный характер (как для марковских потоков), то данная система не будет иметь затруднений при регулярном потоке воздушных целей. Гарантированность результата ведет к перерасходу используемых сил и средств (систем противодействия малогабаритным БпЛА, их боекомплекта). Здесь следует отметить, что, во-первых, если среди множества систем одна гарантированно обеспечит решение задачи противодействия массивному применению БпЛА, даже если затратит больше ресурсов, то такую систему необходимо планировать к применению, хотя бы в составе резерва. Во-вторых, модели теории массового обслуживания можно поэтапно уточнять. Таким образом, предложенная в [10, 11] модель позволяет оценить эффективность противодействия БпЛА по критерию «эффективность-стоимость». Ее достоинство в том, что она обладает гибкостью, позволяя рассматривать в качестве оружия различные образцы при их известных ошибках стрельбы. Недостаток модели состоит в том, что в ней не учитываются средства радиоэлектронного противодействия БпЛА.

В 2020 году в работе [12] **T. L. Cline** и **J. Dietz** предположили, что существует критическая скорость угрозы для гипотетической системы противодействия БпЛА. Эта критическая скорость зависит от географического расположения и структуры защищаемого объекта (в качестве защищаемого объекта рассматривалась тюрьма), параметрах из внешней сети и запретов агентов, входящих в систему противодействия БпЛА. Этими авторами с использованием *имитационной модели* предложено воспроизвести физические аспекты пространства, используемого в эксперименте. Достоинство составленной модели заключается в том, что она позволяет определить параметры системы, необходимые для обеспечения требуемого уровня защиты, для фиксированного уровня защиты или может поочередно предложить соответствующее размещение датчиков и методы запрета в адаптивном режиме. Но в этой модели авторы также не учитывают радиоэлектронное противодействие БпЛА.

В том же 2020 году в работе [13] **А. Р. Исхаков** и **Р. Ф. Маликов** для оценки эффективности системы ПВО предложили использовать математический аппарат *теории массового обслуживания*, в частности систему массового обслуживания (СМО) с ограниченным временем ожидания. Систему ПВО авторы предлагают структурно рассматривать в виде совокупности системы управления и комплекса огневых средств. Допустимыми требованиями к задаче являются:

- 1) требования к обслуживанию принимаются в порядке очередности их поступления в СМО, т.е. ПВО сопровождает и начинает обстрел тех БпЛА, которые поступили в СМО в виде требований;

- 2) в первую очередь обстреливаются те БпЛА, которые наиболее близко располагаются к объекту обороны, т.е. обслуживаются требования, имеющие минимальное время до отказа в обслуживании;
- 3) детерминированной величиной может быть количество БпЛА, отправленных на выполнение боевой задачи противника, т.е. количество поступающих требований в СМО является конкретным значением или ограничено доступными ресурсами;
- 4) случайным является также и время нахождения каждого конкретного БпЛА в рое, т.е. время ожидания каждого требования во входящем потоке является случайным, ибо зависит от локальной задачи каждого БпЛА;
- 5) случайным является время обстрела отдельного БпЛА, т.е. время обслуживания требования является случайным и не зависит от предыдущих аналогичных показателей.

Особенность рассмотренного подхода в том, что он распространен на случай роевой атаки не эшелонированной системы ПВО. В работе сформулированы рекомендации по сохранению свойств стационарности, ординарности и отсутствия последействия при рассмотрении атаки роя БпЛА в виде пуассоновского потока требований в СМО. Однако эта модель также, как и предыдущие, не учитывает радиоэлектронное противодействие БпЛА.

В 2021 году в работе [14] **M. R. Brust, G. Danoy, D. H. Stolf** и **P. Bouvry** предложили *имитационную модель* автономной системы защиты от БпЛА, состоящую из совместно работающих элементов. Достоинствами представленного подхода являются сбалансированная кластеризация и локальный контроль для реализации перехвата БпЛА с учетом количества элементов систем защиты, диапазона связи, радиуса действия и порога столкновения. В работе представлены эмпирические доказательства способности системы защиты противодействовать рою БпЛА. Недостаток модели в том, что радиоэлектронное противодействие БпЛА не учитывается, а система, по сути, лишена своего главного свойства – синергии, поскольку представляет собой множество одновременно работающих средств противодействия БпЛА.

В 2020...2021 годах в работах [15, 16, 17] **А. А. Бойко** предложил аналитическую модель боя, воспроизводящую в виде единой системы процессы ОП, разведки, связи, управления, имитации обстановки, радиоэлектронного подавления, поражения электромагнитным излучением и кибератак на информацию в ее источнике, при передаче и в потребителе в боевых циклах двух противоборствующих воинских формирований. В модели используется математический аппарат *теории вероятностей, теории марковских процессов и логико-алгебраические выражения*. Эта модель позволяет получить значение боевого показателя соотношения сил (боевых потенциалов) сторон на основе вычисления времен до их уничтожения, представляя бой в виде одного боевого эпизода, в котором взаимовлияющие элементы боевых порядков сторон неподвижны и влияют друг на друга с неизменной интенсивностью. Данная модель успешно верифицирована не только на классических моделях боя Осипова-Ланчестера, но и на исходных данных и результатах реальных боев. Однако она не воспро-

изводит динамику элементов боевых порядков сторон в пространстве. Стороны представляются совокупностью подсистем и дальше не детализируются. У каждой стороны есть подсистемы разведки, связи, управления и ОП, и только одна из сторон дополнительно включает подсистему РЭБ.

В 2022 году в работе [18] **Е. М. Воронов, А. Л. Репкин, Ф. М. Хромов, Д. А. Тимофеев и А. Ю. Гераськин** предложили *имитационную модель* функционирования системы ПВО соединения надводных кораблей при воздействии сетцентрических группировок управляемых объектов. В основу модели заложен алгоритм логико-временной циклограммы обнаружения объектов группировки радиолокационными средствами системы ПВО и расчета вероятностных оценок обнаружения. При встраивании алгоритма в общую программу имитации матрица времени обслуживания объектов группировки со стороны зенитных управляемых ракет формируется по массиву обнаруженных объектов согласно процедуре перестройки матрицы обнаружения для средств ПВО, исходя из движения объектов группировки. Коррекция указанного времени может проводиться по матрице коэффициентов коррекции подлетного времени активных объектов средств ПВО до каждого объекта группировки. Недостатком модели аналогично является отсутствию учета радиоэлектронного противодействия.

В 2022 году в работе [19] **Д. Г. Белоножко** рассматривает *аналитическую модель* динамики БпЛА в условиях как непреднамеренных деструктивных воздействий, так и преднамеренных деструктивных воздействий, к источникам которых автор относит средства огневого и физического поражения, радиоэлектронного подавления, функционального поражения электромагнитным и лазерным излучением. В этой работе не приводится метод получения численных значений показателей эффективности указанных преднамеренных деструктивных воздействий, а обобщенный показатель всех таких воздействий (вероятность поражения отдельного БпЛА в результате преднамеренного деструктивного воздействия) *используется в теоретико-множественном выражении в качестве элемента кортежа параметров*, влияющих на устойчивость управления БпЛА. Источником в перечне литературы рассматриваемой работы, в котором содержатся сведения о способе получения численных значений показателей эффективности вышеуказанных преднамеренных деструктивных воздействий, является совокупность работ **В. А. Анохина и Д. В. Холуенко** (в первую очередь, работа [20]). Они посвящены оценке эффективности дезорганизации информационно-управляющих систем. В этих работах предлагается учитывать возможности РЭБ в так называемом «полном» боевом потенциале воинского формирования наряду с ОП, управлением и разведкой в качестве слагаемого с соответствующим весовым коэффициентом, определяемым *методом экспертных оценок*. Однако, как отмечено в [15], такой подход не учитывает реальные характеристики техники РЭБ, динамику применения образцов вооружения и воинских формирований, противодействие противника и влияние техники РЭБ на его огневую мощь.

Также в 2022 году вышла публикация работы [21], где **Ф. И. Пшеничный, И. Д. Королев и С. В. Иванов** предложили показатели, характеризующие функционирование информационно-управляющей системы комплексов с

БпЛА (безопасность, оперативность (своевременность), достоверность, устойчивость, помехоустойчивость, помехозащищенность, техническая надежность, скрытность (разведзащищенность), киберустойчивость, имитостойкость и живучесть), и аналитические выражения для их оценки, базирующиеся на математическом аппарате *теории вероятностей*. Несмотря на весьма глубокий уровень теоретической проработки, математическая модель конфликта комплексов с БпЛА и средств противодействия им в этой работе не учитывает взаимное влияние вероятностных и временных характеристик процессов разведки, связи, управления, ОП и РЭБ сторон.

В 2022 году, кроме того, опубликована работа [22] **А. В. Сухова** и **С. И. Пузийчука**, посвященная весьма оригинальному подходу к оценке эффективности радиоэлектронного противодействия несанкционированным БпЛА. В этой работе в основу модели функционирования БпЛА положен его информационный ресурс, который рассматривается как энтропия покрытия от способности использования БпЛА имеющихся радиоканалов (радиолинии управления БпЛА, радиолинии навигационных определений по космическим навигационным системам и радиолинии передачи телеметрии) в условиях радиоэлектронного противоборства. То есть за основу взят математический аппарат *теории вероятностей*. Несмотря на значительную проработанность вопроса практического применения предложенной в этой работе модели, она может использоваться только в сугубо гражданских условиях, когда применение по БпЛА средств ОП не является оправданным. Однако такие условия в современных реалиях активизации диверсионной и террористической деятельности на КВО гражданского и военного назначения в основном не являются актуальными. Вместе с тем данный подход также, как и подход, используемый в предыдущей работе, не учитывает взаимное влияние вероятностных и временных характеристик процессов разведки, связи, управления, ОП и РЭБ противоборствующих сторон.

Несомненный интерес представляют результаты, полученные в 2021...2023 годах научной школой Н. В. Быкова.

В 2021 году в работе [23] **Н. В. Быков**, **М. С. Товарнов**, **В. А. Федулов**, **Н. С. Власова** и **А. А. Пожарский** предлагают *имитационную модель* огневого противодействия БпЛА типа «квадрокоптер». Процесс противодействия БпЛА с помощью автоматических пушек рассматривается в контексте обстрела БпЛА одиночными выстрелами или очередью. Исходными для модели являются характеристики цели и средства противодействия. Движение БпЛА представляет собой движение абсолютно жесткого тела в трехмерном пространстве, для которого траектория центра локальной системы координат описывается с помощью кривой Безье третьего порядка. Модель позволяет в любой момент времени определить положение и ориентацию БпЛА. Однако она не учитывает ошибки стрельбы и радиоэлектронное противодействие БпЛА.

В 2022 году в работе [24] **В. А. Федулов** и **Н. В. Быков** развивают модель в [23] и предлагают модель системы обнаружения, локализации и противодействия БпЛА в трехмерной среде (см. рис. 2). Подсистема противодействия воспроизводится моделью автоматического стрелкового оружия. Перед моде-

лированием с заданными параметрами инициализируются экземпляры антенн, обнаружителя, средств огневого поражения, подсистемы противодействия и подсистемы обнаружения и локализации. Созданные таким образом экземпляры элементов подсистем образуют модель системы обнаружения, локализации и противодействия БпЛА, содержащую свойства и методы, необходимые для запуска и связи процессов моделирования объектов. Также инициализируются экземпляры БпЛА и экземпляр среды дискретно-событийного *имитационного моделирования*. Инициализированные объекты подаются на вход модуля «Симулятор», запускающего два параллельных процесса – процесс моделирования полета каждого БпЛА (полет) и процесс функционирования системы обнаружения, локализации и противодействия БпЛА (работа). Экземпляр системы в модели, в свою очередь, также запускает два параллельных процесса – процесс противодействия и процесс обнаружения и локализации целей радара. Процесс противодействия запускает процессы поражения каждого средства огневого поражения (команда на уничтожение). Процесс применения радиолокационной станции инициализирует процессы детектирования каждой антенны, которые, в свою очередь, при обнаружении сигнала от объекта запускают процесс обнаружителя, в ходе которого формируется список обнаруженных целей.

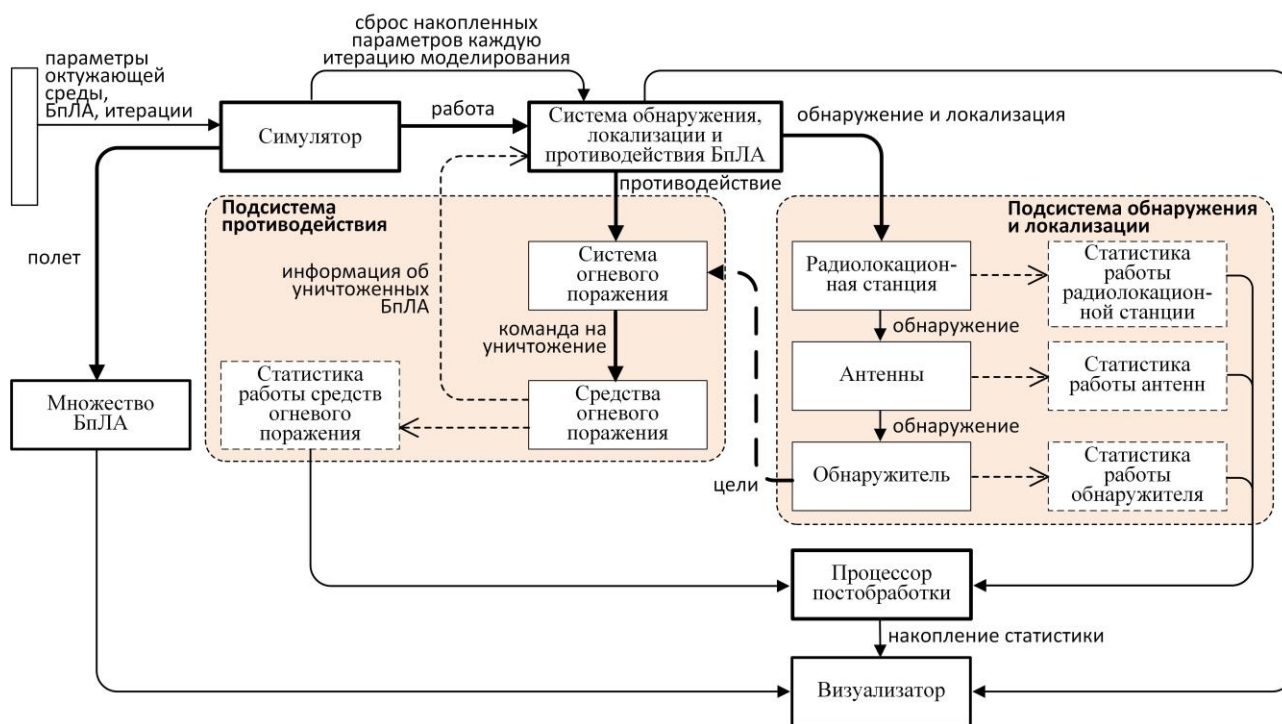


Рис. 2. Общая схема процесса противодействия БпЛА

При очевидных значимых достоинствах, недостатком данной модели является отсутствие возможности перемещения экземпляров средств противодействия в пространстве по заданным траекториям для их рационального размещения в процессе противодействия налету БпЛА. Также в модели отсутствует учет радиоэлектронного противодействия БпЛА.

В 2023 году в работе [25] В. А. Федулов, Н. В. Быков и В. Д. Баскаков предложили очередное развитие своих работ [23, 24]. В ней описана общая мо-

дель БпЛА, состоящая из двух частей: модели БпЛА как физического объекта (т.е. как системы составляющих его тел) и модели системы управления. Внешними сигналами для модели БпЛА могут являться сигналы о поражении БпЛА, сигналы об изменении координат точки назначения и др. Модель системы управления БпЛА представляет собой *конечный автомат*, состояние которого меняется по заданной логике при наступлении заданных событий в *имитационной модели*. В радиолокационную станцию входят модели антенн и модель обнаружителя. Модель радара осуществляет взаимодействие между антеннами и обнаружителем: последнему передается первичная радиолокационная информация с антенн. В этой модели возможно реализовать ограничение на число одновременно отслеживаемых целей. В разделе модели подсистемы нейтрализации малоразмерных БпЛА описаны средства противодействия, оказывающие огневое воздействие на БпЛА посредством пуль, дроби и др. В модели введено допущение, что объекты КВО удалены или обособлены от населенных районов города. Ошибки стрельбы распределены по двумерному нормальному закону. Предлагается моделирование стрельбы одиночными выстрелами или очередью с учетом скорострельности, емкости магазина, времени между очередями, времени между выстрелами в одной очереди, времени перезарядки, средней скорости передвижения средств противодействия в пространстве (если это возможно). Подсистема нейтрализации (поражения) состоит из нескольких средств воздействия. Схема модели подсистемы нейтрализации БпЛА представлена на рис. 3. Ее основная функция – распределение целей между средствами воздействия. Основные показатели взяты из теории эффективности стрельбы. Предложены показатели вероятности и интенсивности уничтожения малоразмерных БпЛА, вероятности и интенсивности их падения в запретные зоны.

Вид сверху на систему поражения БпЛА представлен на рис. 4. На рис. 5 показаны схожие гистограммы, характеризующие распределения точек обнаружения целей антеннами радиолокационных станций при значениях параметра N_d (количество одновременно налетающих БпЛА), равных 3 и 21. Эти данные могут использоваться для анализа площади покрытия пространства радаром. На указанных графиках видны более насыщенные цветом области – это области пересечений зон обзора антенн. Каждая из трех антенн работала в своем режиме, т.е. антенны различались зоной обзора (полный или секторный обзор), дальностью обнаружения целей, скоростью вращения и пр. На рис. 6 показана вероятность уничтожения БпЛА с использованием боеприпасов разных типов, а на рис. 7 приведена зависимость вероятности уничтожения средства нейтрализации и антенны радиолокационной станции от количества одновременно налетающих БпЛА. В каждом налете используются от 1 до 4 БпЛА, способных атаковать систему противодействия. Выбор антенны или средства противодействия равновероятен.

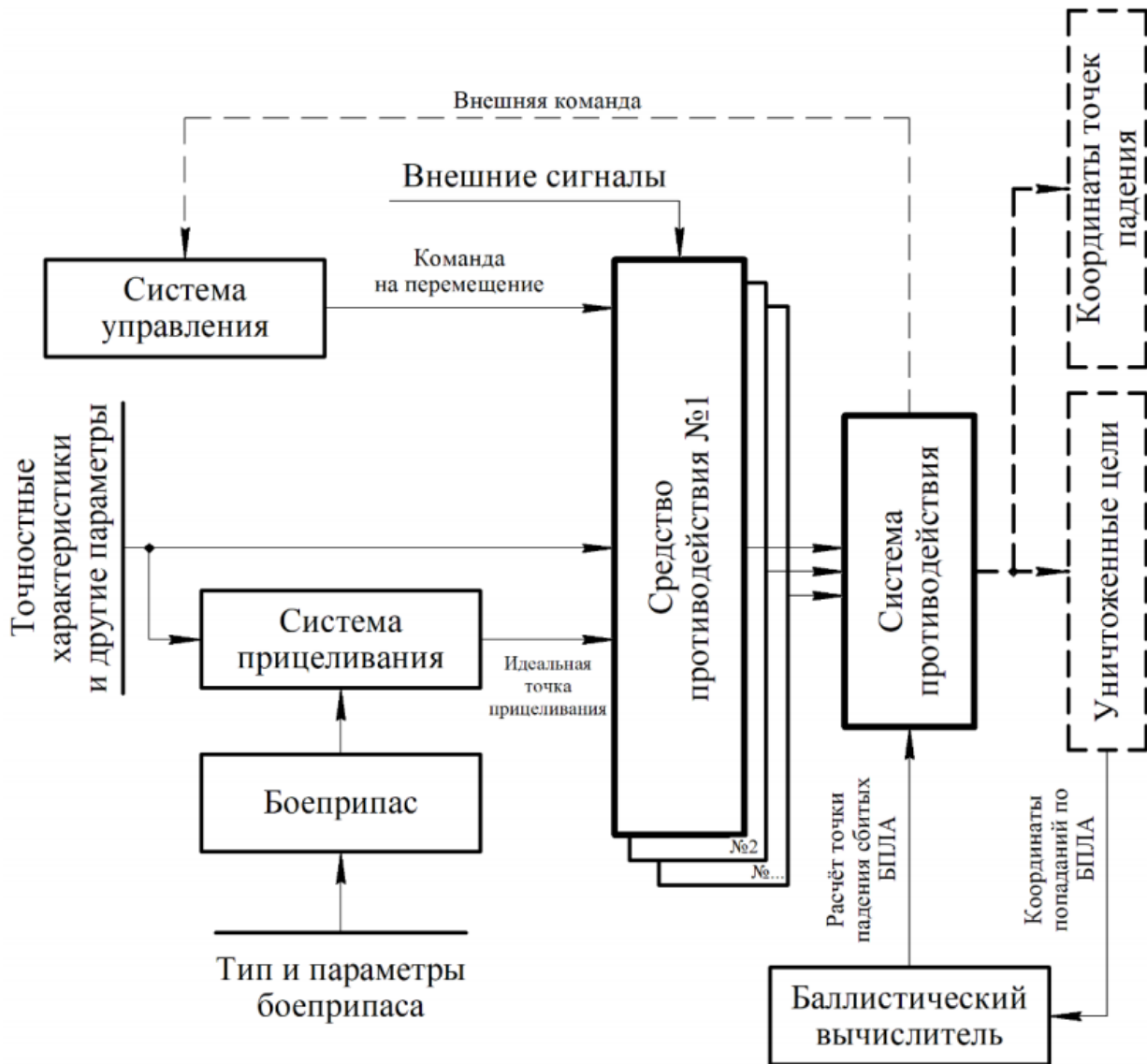


Рис. 3. Схема модели подсистемы нейтрализации БПЛА

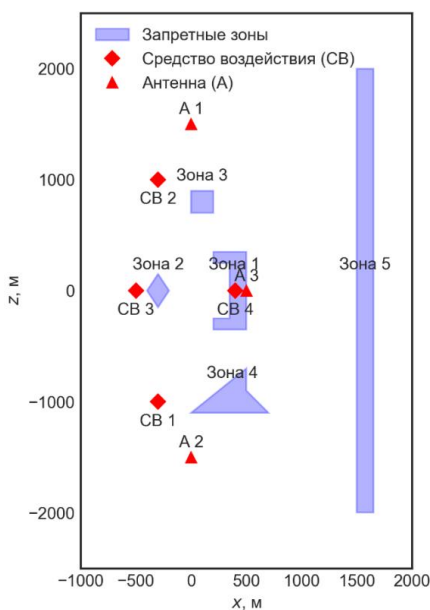


Рис. 4. Вид сверху на систему поражения БПЛА

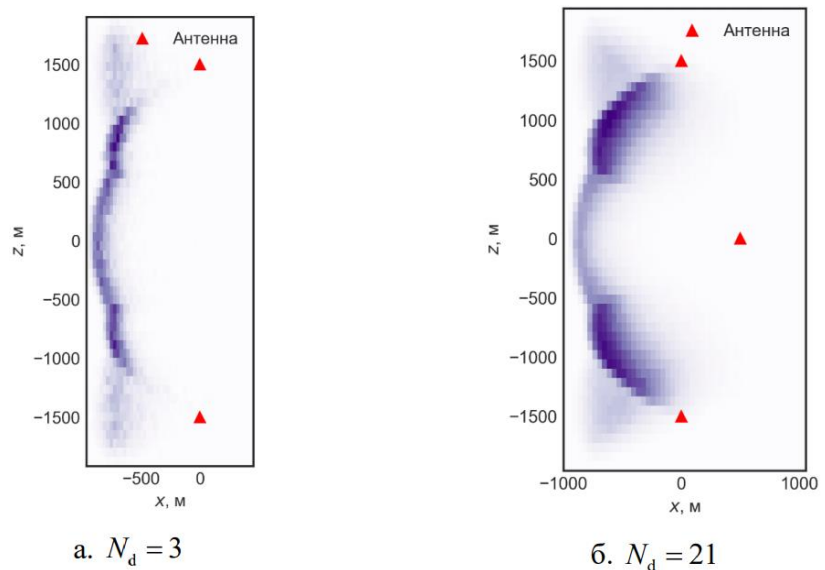


Рис. 5. Качественная гистограмма плотности обнаружения БПЛА радаром

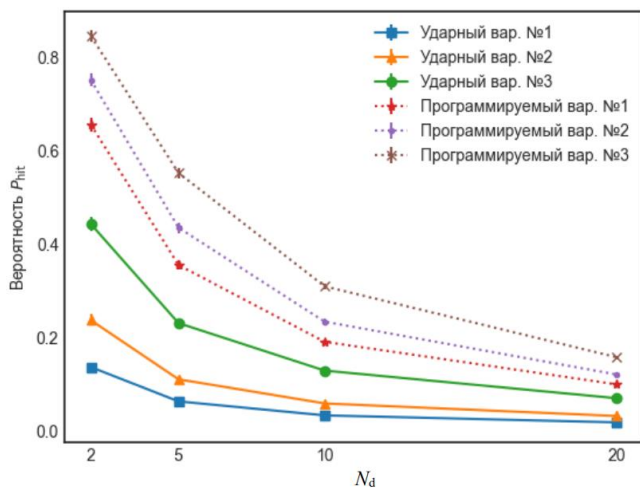


Рис. 6. Вероятность уничтожения БпЛА боеприпасами различного типа

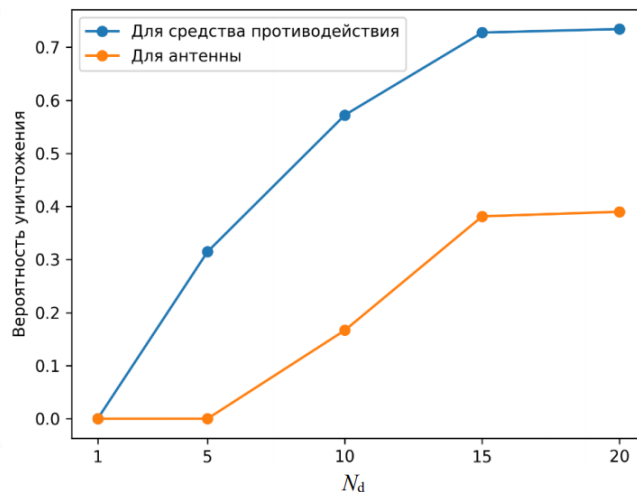


Рис. 7. Вероятность уничтожения элементов системы поражения атакующими БпЛА

Модель позволяет [25]:

- оценивать эффективность противодействия БпЛА по различным показателям: вероятности уничтожения целей, расходу боеприпасов, времени выполнения задачи, вероятности падения БпЛА в запретные зоны, интенсивности уничтожения целей и др.;
- моделировать систему поражения БпЛА с различным набором элементов и различной пространственной структурой. Возможно, например, исследовать только подсистему нейтрализации, только подсистему обнаружения или любые их комбинации. Отдельные элементы системы могут иметь различные тактико-технические характеристики;
- оценивать эффективность системы поражения при противодействии БпЛА, которые могут изменять свою траекторию в полете;
- исследовать эффективность системы поражения в сценариях с БпЛА, которые способны атаковать ее элементы, а также сценарии с БпЛА, которые реализуют определенную тактику налета с отвлекающими и атакующими БпЛА;
- оценивать эффективность системы поражения в сценариях, в которых рассматривается защита определенных областей пространства;
- исследовать эффективность системы поражения в сценариях налета БпЛА с различных направлений, когда элементы системы поражения способны перемещаться;
- проводить сравнительную оценку эффективности вариантов системы поражения малоразмерных БпЛА.

Однако, несмотря на несомненные достоинства, недостатком модели является отсутствие учета радиоэлектронного противодействия БпЛА.

В 2022 году в работе [26] **М. С. Иванов, И. Е. Афонин и С. И. Макаренко** предложили так называемую геотопологическую модель зоны полетов БпЛА на театре военных действий. Эта *аналитическая модель* учитывает в качестве препятствий для полета БпЛА два типа дестабилизирующих воздей-

ствий – физическое воздействие ПВО и воздействие средств РЭБ, которые формализуются в виде интегральной метрики узлов графа геотопологической модели зоны полетов. При этом для формирования «бесполетных» зон, в которых высока вероятность поражения БпЛА и зон нарушения управления вследствие воздействия средств РЭБ на каналы управления БпЛА, используется математический алгоритм иерархической кластеризации Ланса-Вильямса, а проверка связности маршрутной сети основана на методе определения сильносвязных областей графа. В основу модели положен *математический аппарат теории графов и теории вероятностей*. Однако, несмотря на большую ценность результатов данной работы для высоко детализированного воспроизведения процесса противодействия БпЛА на КВО, в ней не затрагиваются вопросы оценки вероятности поражения БпЛА средствами физического поражения и подавления их каналов управления средствами РЭБ.

В 2023 году в работе [27] **В. В. Ланцов, К. В. Ланцов и Л. А. Мартынова** предложили *имитационную модель*, предназначенную для оценки эффективности отведения БпЛА с маршрутной траектории так, чтобы он не попал в пределы критической зоны. Такое поведение БпЛА и охраняемого объекта наиболее характерно для морской акватории. Модель воспроизводит движение охраняемого объекта, движение БпЛА, вращение антенны средств обнаружения и погодные условия. В этой работе использован математический аппарат теории вероятностей, алгебраические и тригонометрические выражения. В качестве показателей эффективности рассматриваются вероятность обнаружения БпЛА и вероятность его отведения от критической зоны. Результаты этого исследования весьма полезны для соответствующих специфических условий применения БпЛА. В то же время в работе авторы не конкретизируют процесс воздействия на БпЛА, оперируя только границей круговой критической зоны защищаемого морского объекта.

В 2024 году в работе [28] **С. А. Сахнов** для обоснования требований к системе противодействия робототехническим комплексам предложил использовать модель процесса функционирования этой системы на основе математического аппарата *теории массового обслуживания*. Модель включает следующие состояния:

- все средства противодействия не задействованы;
- ведется обнаружение 1, 2, ... n БпЛА;
- производится функциональное подавление 1, 2, ... m БпЛА.

Переход между состояниями в модели регулируется простейшими потоками случайных событий: появление БпЛА в зоне обнаружения, завершение обнаружения БпЛА, функциональное подавление БпЛА и прорыв БпЛА. С использованием модели автор предложил аналитическое выражение для оценки вероятности выполнения боевой задачи БпЛА. Неоспоримым достоинством этой модели является то, что она ориентирована на воспроизведение процесса функционального подавления БпЛА по сути любыми доступными способами. Однако и эта модель не позволяет учесть взаимное влияние процессов ОП, разведки, управления и РЭБ, связанных единым информационным пространством.

Сведения об авторах вышеизложенных моделей приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Авторы математических моделей процесса противодействия БПЛА

№	Авторы, основная организация	Годы	Математический аппарат		Источник	
1.	В. В. Ростопчин SDT Industry Technology. Dmbh (г. Оттобрунн, Германия)	2019	имитационное моделирование		[9]	
2.	Т. L. Cline, J. Dietz NASA Johnson Space Center (г. Хьюстон, США)	2020			[12]	
3.	М. R. Brust, G. Danoy, D. H. Stolf, P. Bouvry University of Luxembourg (Люксембург)	2021			[14]	
4.	Е. М. Воронов, А. Л. Репкин, Ф. М. Хромов, Д. А. Тимофеев, А. Ю. Гераськин МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва)	2022			[18]	
5.	Н. В. Быков, М. С. Товарнов, В. А. Федулов, Н. С. Власова, А. А. Пожарский, В. Д. Баскаков МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва)	2021 ... 2023			[23, 24, 25]	
6.	В. В. Ланцов, К. В. Ланцов, Л. А. Мартынова ГосНИИПП (г. Санкт-Петербург)	2023			[27]	
7.	Ф. И. Пшеничный, И. Д. Королев, С. В. Иванов Краснодарское высшее военное училище	2022	теория вероятностей		[21]	
8.	А. В. Сухов, С. И. Пузийчук ФКУ НПО «СТиС МВД России (г. Москва)	2022			[22]	
9.	М. С. Иванов, И. Е. Афонин, С. И. Макаренко Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»	2022			теория графов	[26]
10.	М. В. Сильников, А. В. Андреев, В. И. Лазоркин НПО специальных материалов (г. Санкт-Петербург)	2016 ... 2022			алгебра логики	[7, 8]
11.	А. А. Бойко ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж)	2020 ... 2021			теория марковских процессов	[15, 16, 17]
12.	А. С. Гусева, Р. А. Дурнев, А. С. Кудряшов, Е. В. Свиридок Российская академия ракетных и артиллерийских наук (г. Москва)	2020 ... 2021	[10, 11]			
13.	А. Р. Исхаков, Р. Ф. Маликов Башкирский государственный педагогический университет (г. Уфа)	2020	теория массового обслуживания		[13]	
14.	С. А. Сахнов Санкт-Петербургский военный институт войск национальной гвардии	2024			[28]	
15.	Д. Г. Белоножко Краснодарское высшее военное училище	2022	теория множеств	метод экспертных оценок	[19]	

Выводы

Безусловно, в настоящей статье рассмотрены только те доступные математические модели, которые наиболее близки к вопросу противодействия БпЛА на КВО. Показать все проанализированные в ходе исследования модели, позволяющие хотя бы в какой-то мере воспроизвести антагонистический конфликт и обладающие неоспоримыми достоинствами, которые обусловлены целями исследования их авторов, нет возможности. Такие модели являются предметом исследования операций во всем мире уже на протяжении сотни лет, начиная с классических моделей боя Осипова-Ланчестера. Тем не менее, результаты их анализа совместно с результатами анализа рассмотренных выше математических моделей дают возможность сделать следующие выводы:

- 1) большая часть работ сосредоточена на обнаружении и идентификации БпЛА без рассмотрения процессов противодействия им;
- 2) ни одна известная имитационная модель не воспроизводит совокупность процессов разведки, связи, управления, ОП и РЭБ при организации комплексной защиты КВО от малогабаритных БпЛА;
- 3) существующие имитационные модели противодействия БпЛА воспроизводят только процессы разведки и огневого поражения БпЛА, не уделяя внимания вопросам радиоэлектронного противодействия каналам управления, передачи данных и навигации БпЛА и их целевых нагрузок;
- 4) аналитическая модель боя в [15, 16, 17] воспроизводит в виде единой системы процессы ОП, разведки, связи, управления и РЭБ, но не учитывает динамику элементов боевых порядков сторон в пространстве, не предусматривает их детализацию, а также воспроизводит процесс ведения РЭБ только с одной стороны.

Это свидетельствует о требующем скорейшего разрешения *противоречии в теории между* потребностью в оценке влияния всего спектра воздействий на малогабаритные БпЛА при защите КВО с учетом параметров и характеристик совокупности используемых для этого взаимосвязанных процессов разведки, связи, управления, ОП и РЭБ и недостаточной степенью разработанности существующего научно-методического аппарата оценки эффективности этого процесса.

Направления дальнейшего исследования

Вышеизложенное позволяет сформулировать следующее содержание общей характеристики необходимого научного исследования:

- *предмет исследования* – процесс противодействия малогабаритным БпЛА на КВО;
- *объект исследования* – модели, методики и алгоритмы противодействия малогабаритным БпЛА на КВО;
- *цель исследования* – повышение эффективности противодействия малогабаритным БпЛА на КВО;

- задача исследования – совершенствование существующего научно-методического аппарата оценки эффективности противодействия малогабаритным БпЛА на КВО в части учета влияния всего спектра воздействий на малогабаритные БпЛА при защите КВО и совокупности используемых для этого взаимосвязанных процессов разведки, связи, управления, ОП и РЭБ.

Направлениями дальнейшего исследования являются:

- разработка аналитической (для экспресс-оценки) и имитационной (для высоко детализированной оценки) моделей процессов применения и противодействия БпЛА на КВО, воспроизводящих взаимное влияние процессов ОП, разведки, управления, связи и РЭБ сторон конфликта, связанных единым информационным пространством;
- разработка комплекса методик экспресс- и детальной оценки эффективности противодействия малогабаритным БпЛА на КВО;
- разработка комплекса методик параметрического экспресс- и детального синтеза полнофункциональной системы противодействия малогабаритным БпЛА на КВО.

Структурная схема необходимого научно-методического аппарата, ориентированного на две области применения – 1) ситуационное конфигурирование и оперативная координация и 2) проектирование – показана на рис. 7.

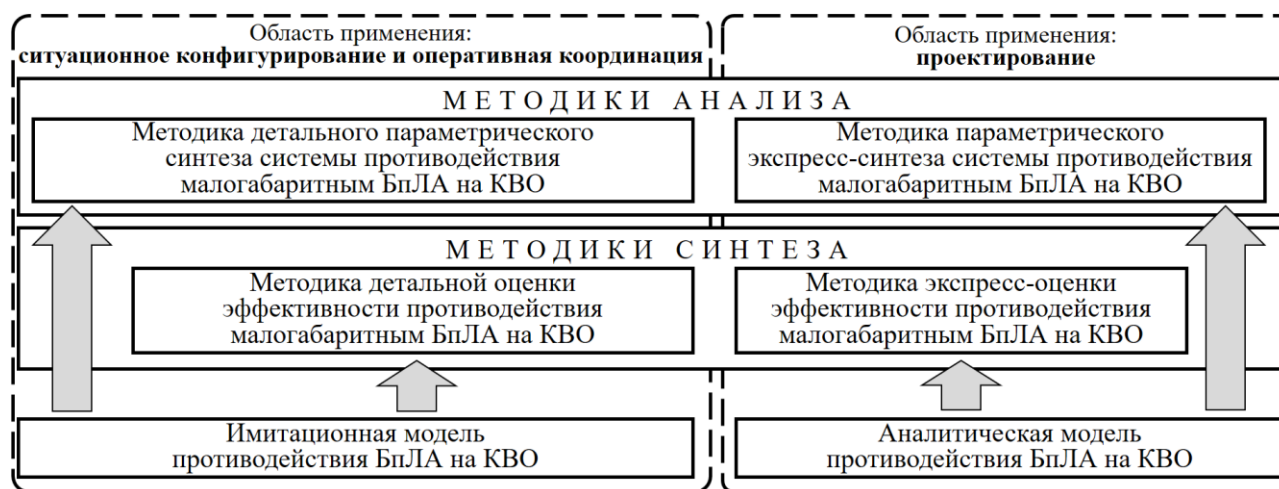


Рис. 7. Структурная схема необходимого научно-методического аппарата оценки эффективности противодействия БпЛА на КВО

На основе имитационной модели и методик, ориентированных на ситуационное конфигурирование и оперативную координацию, также представляется необходимой разработка совокупности взаимосвязанных алгоритмов применения полнофункциональной системы противодействия БпЛА на КВО.

Заключение

Таким образом, в результате анализа математических моделей противодействия малогабаритным беспилотным летательным аппаратам отечественных и зарубежных авторов установлена необходимость решения научной задачи со-

вершенствования существующего научно-методического аппарата оценки эффективности противодействия малогабаритным беспилотным летательным аппаратам на критически важном объекте. В основе необходимого научно-методического аппарата должна лежать аналитическая (для экспресс-оценки) и имитационная (для высоко детализированной оценки) модели антагонистического конфликта, системно воспроизводящие процессы огневого поражения, разведки, связи, управления и радиоэлектронной борьбы, с учетом известных способов противодействия малогабаритным беспилотным летательным аппаратам.

Литература

1. Макаренко С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам. – СПб.: Научное издание, 2020. – 204 с.
2. Лысов А. В. Проблемы борьбы с малыми коммерческими беспилотными летательными аппаратами на поле боя. – СПб.: Медиапайр, 2023. – 444 с.
3. Маркин А. В. Обобщение боевого опыта южного крыла СВО до апреля 2024 года / Центр специальных программ. – М.: Социально-политическая МЫСЛЬ, 2024. – 220 с.
4. Резников Б. А. Системный анализ и методы системотехники. Часть 1. Методология системных исследований. Моделирование сложных систем. – М.: Издательство Министерства обороны СССР, 1990. – 522 с.
5. Горчица Г. И., Ищук В. А. Проблемы применения и направления развития систем моделирования в интересах сопровождения создания перспективных комплексов вооружения // Известия РАРАН. 2018. № 4. С. 15–22.
6. Программно-технический комплекс автоматизированного планирования действий войск (сил) и обеспечения оперативной и боевой подготовки «Спектр-7Э» – URL: <https://rusbitech.ru/products/tks/ptk-spektr-7e/> (дата обращения: 02.09.2024).
7. Сильников М. В., Андреев А. В. Методика распределения потенциала огневых средств противовоздушной обороны при отражении удара средств воздушного нападения противника // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2016. № 9–10. С. 38–41.
8. Сильников М. В., Лазоркин В. И. Защита стационарных объектов от роя БПЛА-камикадзе // Известия Российской академии Ракетных и артиллерийских наук. 2022. № 3(123). С. 46–50.
9. Ростопчин В. В. Ударные беспилотные летательные аппараты и противовоздушная оборона – проблемы и перспективы противостояния // Беспилотная авиация [Электронный ресурс]. 2019. – URL: https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye_letatelnye_apparaty_i_protivovozdusnaa_oborona_-problemy_i_perspektivy_protivostoania (дата обращения: 08.09.2024).
10. Гусева А. С., Дурнев Р. А., Кудряшов А. С., Свиридок Е. В. От живучести элементов мини-БПЛА к оценке эффективности его поражения: методический подход // Известия РАРАН. 2020. № 4(114). С. 55–58.

11. Гусева А. С., Дурнев Р. А., Кудряшов А. С., Свиридок Е. В. Оценка эффективности систем противодействия массированному применению мини-БПЛА: методические основы // Известия РАН. 2021. № 1(116). С. 57–61.
12. Cline T. L., Dietz J. Agent Based Modeling for a C-UAS Protocol Prison // International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace. 2020. № 7(2).
13. Исхаков А. Р., Маликов Р. Ф. Оценка эффективности ПВО при малом времени пребывания роя БПЛА в зоне обстрела // Труды Первой всероссийской научно-практической конференции по имитационному моделированию и его применению в военной сфере «Имитационное моделирование систем военного назначения, действий войск и процессов их обеспечения». – СПб.: Изд-во ВА МТО. – АО СТСС, 2020. – С. 157–164.
14. Brust M. R., Danoy G., Stolf D. H., Bouvry P. Swarm-based counter UAV defense system // Discover Internet of Things. 2021.
15. Бойко А. А. Боевая эффективность кибератак: аналитическое моделирование современного боя // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 4. С. 101–133. doi: 10.24411/2410-9916-2020-10404.
16. Бойко А. А. Боевая эффективность кибератак: практические аспекты // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 4. С. 134–162. doi: 10.24411/2410-9916-2020-10405.
17. Бойко А. А. Киберзащита автоматизированных систем воинских формирований. – СПб.: Научно-технологические технологии, 2021. – 300 с.
18. Воронов Е. М., Репкин А. Л., Хромов Ф. М., Тимофеев Д. А., Гераськин А. Ю. Математическая модель для имитационной реализации функционирования системы противовоздушной обороны соединения надводных кораблей // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2022. № 1. С. 62–84.
19. Белоношко Д. Г. Алгоритм обеспечения требуемого уровня устойчивости управления беспилотным летательным аппаратом в условиях противодействия // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 1. С. 95–105. doi: 10.15827/0236-235X.137.095-105.
20. Анохин В. А., Холуенко Д. В. Методические основы оценки эффективности дезорганизации сетцентрических информационно-управляющих систем // Военная Мысль. 2020. № 12. С. 92–98.
21. Пшеничный Ф. И., Королев И. Д., Иванов С. В. Оценка показателей информационно-управляющей системы комплексов с беспилотными летательными аппаратами военного назначения в условиях информационно-технических воздействий // Научно-технологические технологии в космических исследованиях Земли. 2022. Т. 14. № 1. С. 28–35. doi: 10.36724/2409-5419&2022-14-1-28-35.
22. Сухов А. В., Пузийчук С. И. Информационный анализ эффективности радиопротиводействия беспилотным воздушным судам // Информационные системы и процессы. 2022. № 5. С. 58–70.
23. Быков Н. В., Товарнов М. С., Федулов В. А., Власова Н. С., Пожарский А. А. Имитационная модель оценки эффективности огневого

противодействия беспилотным летательным аппаратам // ИММОД. 2021. С. 135–141.

24. Федулов В. А., Быков Н. В. Имитационная модель системы обнаружения, локализации и противодействия малоразмерным беспилотным летательным аппаратам // Пятнадцатая всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». – М: МГТУ им. Н. Э. Баумана, Союз машиностроителей России. 2022. Т. 2. – С. 404–412.

25. Федулов В. А., Быков Н. В., Баскаков В. Д. Оценка эффективности системы поражения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов методом имитационного моделирования // Системы управления, связи и безопасности. 2023. № 4. С. 63–104.

26. Иванов М. С., Афонин И. Е., Макаренко С. И. Повышение устойчивости автоматизированной системы управления комплекса с беспилотными летательными аппаратами в условиях воздействия средств физического поражения и радиоэлектронного подавления // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 2. С. 92–134. doi: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134.

27. Ланцов В. В., Ланцов К. В., Мартынова Л. А. Имитационная модель оценки эффективности системы защиты подвижного объекта от малоразмерных робототехнических комплексов // Седьмая международная научно-практическая конференция «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем». Труды конференции. – СПб.: ИПК «НП-Принт», 2023. С. 117–126.

28. Сахнов С. А. Обоснование требований к подсистеме противодействия робототехническим комплексам // Труды СПбГМТУ. 2024. № 3 (11). С. 50–61.

References

1. Makarenko S. I. *Protivodeystviye bespilotnym letatel'nyim apparatam* [Counteracting Unmanned Aerial Vehicles]. Saint Petersburg, Naukoemkie tekhnologii Publ., 2020. 203 p. (in Russian).

2. Lysov A. V. *Problemy bor'by s malymi kommercheskimi bespilotnymi letatel'nyimi apparatami na pole* [Problems of Fighting Small Commercial Unmanned Aerial Vehicles on the Battlefield]. Saint Petersburg, Mediapapir Publ., 2023. 444 p. (in Russian).

3. Markin A. V. *Generalization of the Combat Experience of the Southern Wing of Special Military Operation till April 2024*. Moscow, Social-political THOUGHT, 2024. 220 p. (in Russian).

4. Reznikov B. A. *Sistemnyy analiz i metody sistemotekhniki. Chast' 1. Metodologiya sistemnykh issledovaniy. Modelirovanie slozhnykh sistem* [System Analysis and System Engineering Methods. Part 1. System Research Methodology]. Moscow, Ministry of Defense of the USSR, 1990. 522 p. (in Russian).

5. Gorchitsa G. I., Ishchuk V. A. *Problemi primeneniya i napravleniya razvitiya sistem modelirovaniya v interesakh soprovozhdeniya sozdaniya perspektivnykh kompleksov vooruzheniya* [Problems of Application and Directions of

Development of Modeling Systems in the Interests of Supporting the Creation of Advanced Weapons Systems]. *Izvestiya Rossijskoj Akademii Raketnyh i Artillerijskih Nauk*, 2018, no. 4, pp. 15–22 (in Russian).

6. Software and Hardware Complex for Automated Planning of Troop (Force) Actions and Provision of Operational and Combat Training "Spektr-7E". Available at: <https://rusbitech.ru/products/tks/ptk-spektr-7e/> (accessed 02 September 2024) (in Russian).

7. Silnikov M. V., Andreev A. V., Kudryashov A. S., Sviridok E. V. Metodika raspredeleniya potentsiala ognevykh sredstv protivovozdushnoy oborony pri otrazhenii udara [Methodology for Distributing the Potential of Air Defense Fire Weapons when Repelling an Attack by Enemy Air Attack Weapons]. *Enginery problems. Series 16. Anti-terrorist Engineering Means*, 2016, no. 9–10, pp. 38–41 (in Russian).

8. Silnikov M. V., Lazorkin V. I. Zashchita statsionarnykh ob"yektov ot roya BpLA-kamikadze [Protection of stationary objects from the pile of BpLA-kamikaze]. *Izvestiya Rossijskoj Akademii Raketnyh i Artillerijskih Nauk*, 2022, no. 3 (123), pp. 46–50 (in Russian).

9. Rostopchin V. V. Attack Drones and Air Defense – Problems and Prospects of Confrontation. *ResearchGate*, 2019, no. 10. Available at: https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye_letatelny_e_apparaty_i_protivovozdusnaa_oborona_-problemy_i_perspektivy_protivostoania (accessed 08 September 2024) (in Russian).

10. Guseva A. S., Durnev R. A., Kudryashov A. S., Sviridok E. V. Ot zhivuchesti elementov mini-BpLA k otsenke effektivnosti yego porazheniya [From the Survivability of Mini-UAV Elements to Assessing the Effectiveness of its Destruction: a Methodological Approach]. *Izvestiya Rossijskoj Akademii Raketnyh i Artillerijskih Nauk*, 2020, no. 4(114), pp. 55–58 (in Russian).

11. Guseva A. S., Durnev R. A., Kudryashov A. S., Sviridok E. V. Otsenka effektivnosti sistem protivodeystviya massirovannomu primeneniyu mini-BPLA: metodicheskiye osnovy [Evaluation of the Effectiveness of Systems to Counter the Massive use of Mini-UAVs: Methodological Principles]. *Izvestiya Rossijskoj Akademii Raketnyh i Artillerijskih Nauk*, 2021, no. 1(116), pp. 57–61 (in Russian).

12. Cline T. L., Dietz J. Agent Based Modeling for a C-UAS Protocol Prison. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, 2020, no. 7(2).

13. Iskhakov A. R., Malikov R. F. Otsenka effektivnosti PVO pri malom vremeni prebivaniya roya BpLA v zone obstrela [Evaluation of Air Defense Effectiveness with a Short Time of Stay of a Swarm of UAVs in the Firing Zone]. *IMSVN-2020* (Saint Petersburg, 25 November 2020). Saint Petersburg: VA MTO Publ. AO STSS, 2020, pp. 157–164 (in Russian).

14. Brust M. R., Danoy G., Stolf D. H., Bouvry P. Swarm-based Counter UAV Defense System. *Discover Internet of Things*, 2021, pp. 1–19.

15. Boyko A. A. Combat Effectiveness of Cyber-attacks: Analytical Modeling of Modern Warfare. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 4, pp. 101–133. doi: 10.24411/2410-9916-2020-10404 (in Russian).

16. Boyko A. A. Combat Effectiveness of Cyber-attacks: Practical Aspects. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 4, pp. 134–162. doi: 10.24411/2410-9916-2020-10405 (in Russian).

17. Boyko A. A. *Kiberzashchita avtomatizirovannikh sistem voinskikh formirovaniy* [Cyberprotection of Military Formations Automated Systems]. Saint Petersburg, Naukoemkie tekhnologii Publ., 2021. 300 p. (in Russian).

18. Voronov Y. M., Repkin A. L., Khromov F. M., Timofeev D. A., Geraskin A. Y., *Matematicheskaya model dlya imitatsionnoi realizatsii funktsionirovaniya sistemi protivovozdushnoi oboroni soedineniya nadvodnikh korabli* [Mathematical Model for Simulating the Functioning of the Air Defense System of a Surface Ship Formation]. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2022, no. 1, pp. 62–84 (in Russian).

19. Belonozhko D. G. An Algorithm for Ensuring the Required Level of Stability of Control of an Unmanned Aerial Vehicle in the Conditions of Counteraction. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 1, pp. 95–105. doi: 10.15827/0236-235X.137.095-105 (in Russian).

20. Anokhin V. A., Kholuenko D. V. The Methodological Basis of Estimating the Efficiency of Disrupting Networkcentric Information Control Systems. *Military Thought*, 2020, no. 12, pp. 92–98 (in Russian).

21. Pshenichnyj F. I., Korolev I. D., Ivanov S. V. Evaluation of the Indicators of the Information Management System of Complexes with Unmanned Aerial Vehicles for Military Purposes in the Conditions of Information and Technical impacts. *H&ES Reserch*, 2022, vol. 14, no 1, pp. 28–35. doi: 10.36724/2409-5419-2022-14-1-28-35 (in Russian).

22. Sukhov A. V., Puziichuk S. I. Information Analysis of the Effectiveness of Radio Interference Unmanned Aerial Vehicle. *Information systems and processes*, 2022, no. 5, pp. 58–70 (in Russian).

23. Bikov N. V., Tovarnov M. S., Fedulov V. A., Vlasova N. S., Pozharskii A. A. *imitatsionnaya model otsenki effektivnosti ogneвого protivodeistviya bespilotnim letatel'nykh apparatam* [Simulation Model for Assessing the Effectiveness of Fire Counteraction to Unmanned Aerial Vehicles]. *Desyataya vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya po imitatsionnomu modelirovaniyu i yego primeneniyu v nauke i promishlennosti "Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika"* [The Tenth All-Russian Scientific and Practical Conference on Simulation Modeling and its Application in Science and Industry "Simulation Modeling. Theory and Practice"]. Saint-Petersburg, 2021, pp. 135–141 (in Russian).

24. Fedulov V. A., Bikov N. V. *Imitatsionnaya model sistemi obnaruzheniya, lokalizatsii i protivodeistviya malorazmernim bespilotnim letatel'nykh apparatam* [Simulation Model of a System for Detecting, Localizing and Countering Small Unmanned Aerial Vehicles]. *Budushchee mashinostroeniya Rossii* (Moscow, 21-24 September 2022). Moscow. Bauman State Technical University, Russian Mechanical Engineers Union, 2022, pp. 404–412 (in Russian).

25. Fedulov V. A., Bikov N. V., Baskakov V. D. *Otsenka effektivnosti sistemi porazheniya malorazmernikh bespilotnikh letatel'nykh apparatov metodom*

imitatsionnogo modelirovaniya [Evaluation of the Effectiveness of the System for Defeating Small-sized Unmanned Aerial Vehicles Using the Simulation Modeling method]. *Systems of Control, Communication and Security*, 2023, no. 4, pp. 63–104 (in Russian).

26. Ivanov M. S., Afonin I. E., Makarenko S. I. Increasing Stability of the Control System of Unmanned Aerial Vehicles in the Conditions of Fire Damage and Electronic Warfare. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 2, pp. 92–134 (in Russian). doi: 10.24412/2410-9916-2022-2-92-134 (in Russian).

27. Lantsov K. V., Lantsov V. V., Martynova L. A. Simulation Modeling of the Occurrence of Intense Interference to Determinate the Parameters of the Detector of a Small-sized Robotic Complex. *SCM MEMTS-2023*. pp. 117–126 (in Russian).

28. Sahnov S. A. Justification of Requirements for the Subsystem for Countering Robotic Complexes. *Proceedings of Saint-Petersburg Military Institute of the National Guard of the Russian Federation*, 2024, no. 3(11), pp. 50–61 (in Russian).

Статья поступила 11 октября 2024 г.

Информация об авторах

Бойко Алексей Александрович – доктор технических наук, доцент. Преподаватель. Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Область научных интересов: методы и системы защиты информации, методы оценки эффективности сложных систем. E-mail: albo@list.ru

Майхуб Халил Исса – адъюнкт. Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Область научных интересов: методы оценки эффективности сложных систем. E-mail: khalilm22393@gmail.com

Мосолов Иван Андреевич – соискатель. Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Область научных интересов: методы оценки эффективности сложных систем. E-mail: i.mosolov2013@yandex.ru

Адрес: 394064, Россия, г. Воронеж, ул. Ст. Большевиков, д. 54А.

Countering UAVs Mathematical Models Overview

A. A. Boyko, H. I. Maihoub, I. A. Mosolov

Problem Statement: Currently, the task of countering small-sized (i.e. nano-, micro-, mini- and short-range) unmanned aerial vehicles at critical military and civilian facilities is of particular relevance. The systems that ensure the implementation of this task are technically complex. The construction of such

systems requires a high degree of accuracy, which, in turn, leads to great difficulties, since systems of this type must combine communication, reconnaissance, control, electronic warfare and fire destruction systems. Today, such systems are built empirically, without taking this feature into account, often even without individual subsystems, and therefore cannot guarantee the implementation of the task assigned to them in extreme conditions, when a significant number of small-sized unmanned aerial vehicles are used to inflict maximum damage on a critical facility. To improve the efficiency of such systems, a developed scientific and methodological apparatus for its assessment is required. This apparatus should be based on a model of the process of countering unmanned aerial vehicles at a critical facility, reproducing the specified feature. **Aim of the paper:** identifying the ability of known mathematical models of the process of counteracting unmanned aerial vehicles to take into account the mutual influence of the processes of reconnaissance, communication, control, fire damage and electronic warfare. **Used Methods:** systems analysis. **Novelty:** consideration of the process of countering small-sized unmanned aerial vehicles at critical facilities in the context of an antagonistic conflict between two high-tech organizational and technical systems, each of which implements a cycle of applying the processes of reconnaissance, communication, control, fire damage and electronic warfare to achieve its goals. **Result:** generalization of the known models of the process of countering unmanned aerial vehicles made it possible to identify the need to integrate existing detailed simulation models of this process, taking into account only the processes of reconnaissance and fire damage, with an analytical combat model that takes into account the set of necessary processes, but is not able to reproduce them in detail. **Practical relevance:** The result of the work is necessary for the development of a scientific and methodological apparatus for assessing the effectiveness of counteraction to small-sized unmanned aerial vehicles at a critical facility.

Keywords: unmanned aerial vehicle, critical asset, effectiveness, countermeasures, combat simulation and analytical modeling.

Information about Authors

Aleksey Aleksandrovich Boyko – Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor. Lecturer. Zhukovsky and Gagarin Military Aviation Academy. Field of research: methods and systems of information protection, methods of assessing the effectiveness of complex systems. E-mail: albo@list.ru

Khalil Issa Maihoub – Postgraduate. Zhukovsky and Gagarin Military Aviation Academy. Field of research: methods of assessing the effectiveness of complex systems. E-mail: khalilm22393@gmail.com

Ivan Andreevich Mosolov – Applicant. Zhukovsky and Gagarin Military Aviation Academy. Field of research: methods of assessing the effectiveness of complex systems. E-mail: i.mosolov2013@yandex.ru

Address: Russia, 394064, Voronezh, Old Bolsheviks Street, 54A.