

УДК 623.76

**Анализ средств и способов
противодействия беспилотным летательным аппаратам.
Часть 2. Огневое поражение и физический перехват**

Макаренко С. И., Тимошенко А. В.

Актуальность. Начиная с середины 2000-х годов в средствах массовой информации стали регулярно появляться сообщения об несанкционированном использовании беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в особо контролируемых зонах: в аэропортах, на военных объектах, против критической промышленной инфраструктуры и т.д. В настоящее время малые БПЛА широко используются для несанкционированного наблюдения важных объектов, проведения терактов и диверсий, переноски запрещенных грузов (оружия, наркотиков), а также в военном деле. В связи с этим, актуализировалась задача противодействия БПЛА, и особенно – малым БПЛА. Анализ публикаций в этой области, показывает, что аналитических статей по данной тематике довольно мало. В подавляющем числе работ в этой области преобладают излишне оптимистические выводы относительно эффективности поражения всех видов БПЛА существующими средствами противовоздушной обороны (ПВО). Вместе с тем, проблема противодействия БПЛА, и, в особенности, малым БПЛА, является чрезвычайно сложной, многогранной и до сих пор эффективно не решенной. **Целью работы** является систематизация и анализ различных способов и средств противодействия БПЛА, а также формирование общих направлений эффективного решения данной проблемы. **Материал**, представленный в данной статье, в частности, посвящен анализу возможностей средств огневого поражения и физического перехвата БПЛА. **Результаты.** В статье представлены результаты систематизации и анализа различных способов и средств противодействия БПЛА, основанных на огневом поражении и физическом перехвате. В основу систематизации положено более 60 открытых источников, анализ которых позволил вскрыть основные особенности БПЛА, как объекта поражения, а также провести многоаспектный подробный анализ современных комплексов ПВО и их эффективности при работе по воздушным целям такого типа. В работе обобщены предложения по повышению эффективности средств ПВО при их применении против БПЛА. **Элементами новизны работы** являются выявленные особенности процессов обнаружения и поражения БПЛА, а также системные недостатки используемых технологических решений в комплексах ПВО, приводящие к снижению их боевой эффективности при применении против БПЛА. **Практическая значимость.** Материал статьи может использоваться для формирования исходных данных для моделирования и исследования боевой эффективности комплексов ПВО при их противодействии БПЛА. Также, данная статья может быть полезна конструкторам, проектирующим системы противодействия БПЛА, а также военным специалистам при оценке параметров группы БПЛА, гарантированно вскрывающих и преодолевающих зону ПВО противника при решении своих целевых задач.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, БПЛА, БЛА, противовоздушная оборона, ПВО, противодействие беспилотным летательным аппаратам, перехват беспилотного летательного аппарата, поражение беспилотного летательного аппарата, группа беспилотных летательных аппаратов, зенитно-ракетный комплекс, зенитный ракетно-пушечный комплекс, зенитно-артиллерийский комплекс, боевая эффективность, эффективность применения, обнаружение.

Библиографическая ссылка на статью:

Макаренко С. И., Тимошенко А. В. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 2. Огневое поражение и физический перехват // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 147-197. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10106.

Reference for citation:

Makarenko S. I., Timoshenko A. V. Counter Unmanned Aerial Vehicles. Part 2. Rocket and Artillery Fire, Physical Interception. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 1, pp. 147-197. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10106 (in Russian).

Введение

В настоящее время с появлением средних и малых беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) задачи противодействия их применению в особо контролируемых зонах существенно актуализировались. Начиная с середины 2000-х годов в средствах массовой информации стали регулярно появляться сообщения об опасном использовании малых БПЛА в районах аэропортов, а с середины 2010-х – об применении малых БПЛА для ведения несанкционированного наблюдения важных объектов, проведения терактов и диверсий, транспортировки запрещенных грузов (оружия, наркотиков), и широком использовании БПЛА в военном деле. В связи с этим на Западе началась активная научная разработка данного направления исследований, о чем можно судить по работам [1-8]. При этом данная проблематика является относительно новой, что подтверждается тем, что самая ранняя из работ по тематике противодействия БПЛА относится к 2008 г., а начало активных научных публикаций по этой тематике относится к 2016-2017 гг. В результате к 2020 г. в Западной научной печати были введены относительно устоявшиеся термины, а также определены основные направления исследований в этой предметной области: «противодействие БПЛА» – используются такие термины как «C-UAV», «CUAV», «C-UAVs», «CUAVs» (Counter Unmanned Aerial Vehicles); «системы противодействия БПЛА» – используются такие термины как «C-UAS», «CUAS» (Counter Unmanned Aircraft Systems), «C-UAV system», «CUAV-system», «AUDS» (Anti-UAV Defense System), Counter-Drone Systems; «технологии противодействия БПЛА» – используются такие термины как «Anti-Drone Technologies» и «Counter-UAVs Technologies».

При этом, если на начальном этапе появления задачи противодействия БПЛА (в начале 2000-х гг.), эта задача решалась исключительно средствами поражения (ракетами и снарядами) зенитно-ракетных комплексов (ЗРК) противовоздушной обороны (ПВО), то в настоящее время специалисты осознали, что прямое отражение массированного налета БПЛА средствами ЗРК ПВО, во-первых, неоправданно экономически из-за использования дорогостоящих ракет по большому числу относительно дешевых БПЛА, а во-вторых, это ведет к быстрому исчерпанию боевого ресурса ЗРК и последующей их неспособности отразить удар уже пилотируемой авиации, а также крылатых ракет высокоточного оружия (ВТО). В связи с этим, в настоящее время широко исследуются дополнительные способы противодействия БПЛА, в том числе такие как применение средств радиоэлектронного подавления (РЭП), а также средств направленного излучения энергии – лазерного оружия. При этом, если применение лазерного оружия является еще относительно экспериментальной технологией, то способы противодействия БПЛА на основе совместного использования комплексов РЭП и ЗРК уже активно используются в практике локальных боевых действий (например, для обороны базы Войск Воздушно-космической обороны (ВКО) России в Сирии), а также для формирования периметра защиты особо охраняемых объектов (например, специальных объектов РФ – объектов МО, МВД, ФСО, ФСИН и т.д.).

Анализ публикаций в области противодействия БПЛА, показывает, что статей по данной тематике довольно мало, а в подавляющем числе работ в этой области преобладают излишне оптимистические выводы относительно успешности поражения всех видов БПЛА существующими отечественными средствами ПВО или же глубокое убеждение авторов в поистине «фантастических» возможностях средств РЭП. При этом многие авторы, не вполне понимают сложность задачи противодействия БПЛА, рассматривают исключительно отдельные, частные аспекты этой проблематики, а также не обладают сведениями о реальных возможностях существующих комплексов ПВО и РЭП. Вместе с тем, проблема (как видится авторам – именно проблема) противодействия БПЛА, и, в особенности, малым БПЛА, является чрезвычайно сложной, многогранной, и до сих пор эффективно не решенной. Авторы, имея определенный опыт разработки подобных систем, хотели бы отразить в данной работе всю сложность и многоаспектность проблематики разработки эффективных систем противодействия БПЛА, а также неприемлемость «поверхностных» и «однобоких» подходов к построению таких систем.

Обобщая вышесказанное, целью работы является систематизация и анализ различных способов и средств противодействия БПЛА, а также формирование общих направлений эффективного решения данной проблемы.

Авторский материал по противодействию БПЛА, ввиду его большого объема, был разделен на три относительно независимые части. Первая часть, представленная в уже опубликованной работе [9], посвящена анализу БПЛА, как объекта обнаружения и поражения. Вторая часть, которая представлена в данной статье, посвящена исследованию возможностей средств огневого поражения и физического перехвата БПЛА. Третья часть, которая планируется к опубликованию в дальнейшем, будет посвящена исследованию возможностей средств РЭП, средств функционального поражения электромагнитным излучением – генераторов мощного СВЧ- и лазерного излучения, а также другим средствам и способам «бесконтактного» поражения БПЛА.

Материал данной статьи был декомпозирован на следующие подразделы.

1. Противодействие БПЛА средствами огневого поражения ЗРК ПВО.
 - 1.1. Тактико-технические характеристики ЗРК ПВО, ориентированных на противодействие БПЛА.
 - 1.1.1. Отечественные ЗРК ПВО.
 - 1.1.2. Зарубежные ЗРК ПВО.
 - 1.2. Результаты испытаний ЗРК ПВО при решении задач противодействия БПЛА.
 - 1.2.1. Результаты испытаний отечественных ЗРК ПВО.
 - 1.2.2. Результаты испытаний зарубежных ЗРК ПВО.
 - 1.3. Анализ основных причин низкой эффективности ЗРК ПВО против БПЛА.
 - 1.3.1. Анализ стандартной номенклатуры целей ЗРК ПВО.
 - 1.3.2. Анализ экономической целесообразности применения средств поражения ЗРК ПВО против БПЛА.

- 1.3.3. Анализ средств поражения ЗРК ПВО.
 - 1.3.3.1. Артиллерийские средства поражения БПЛА.
 - 1.3.3.2. Ракетные средства поражения БПЛА.
- 1.3.4. Анализ эффективности ЗРК ПВО в условиях групповой атаки БПЛА.
2. Предложения по повышению эффективности средств ПВО при их применении против БПЛА.
 - 2.1. Создание многофункциональной системы противодействия БПЛА.
 - 2.2. Модернизация существующих средств ПВО.
 - 2.3. Оснащение существующих комплексов ПВО средствами РЭП.
 - 2.4. Разработка нового комплекса ПВО, ориентированного на противодействие именно БПЛА.
3. Другие средства и способы противодействия БПЛА.
 - 3.1. Противодействие БПЛА с использованием специальных БПЛА-перехватчиков.
 - 3.2. Противодействие БПЛА с использованием горючих аэрозолей.
 - 3.3. Противодействие БПЛА с использованием специальных клейких и вязких аэрозолей.
 - 3.4. Противодействие БПЛА с использованием сетей.
 - 3.5. Противодействие БПЛА с использованием специально тренированных птиц.
 - 3.6. Вывод БПЛА из положения устойчивого полёта в закритические условия путём накрытия спутным следом от пролетающего летящего аппарата.

Данная работа продолжает и развивает предыдущие работы авторов, опубликованные по тематике оценки эффективности применения БПЛА и способов противодействия им, а именно – работы [17, 18].

1. Противодействие БПЛА средствами огневого поражения ЗРК ПВО

В настоящее время спектр задач, стоящих перед ЗРК ПВО, значительно расширился из-за появления таких новых средства воздушного нападения (СВН) как крылатые ракеты комплексов высокоточного оружия (ВТО), гиперзвуковые средства поражения, воздушно-космические самолеты и т.д. [10]. Вместе с тем все вышеперечисленные СВН, уже много лет являются классическими целями ЗРК ПВО, поэтому задачи противодействия им являются относительно проработанными и хорошо исследованными. Вместе с тем, задача противодействия БПЛА для ЗРК является относительно новой. Рассмотрим основные особенности применения комплексов ПВО для решения задачи огневого поражения БПЛА.

1.1. Тактико-технические характеристики ЗРК ПВО, ориентированных на противодействие БПЛА

1.1.1. Отечественные ЗРК ПВО

Рассматривая отечественное вооружение необходимо остановиться на комплексах войсковой ПВО, которые, по заявлению их производителей, могут эффективно противодействовать БПЛА: ЗРК «Тор-М1» и «Тор-2Э», «Бук-М2Э» и «Бук-М3», «Морфей», «Витязь», зенитные ракетно-пушечные комплексы (ЗРПК) «Панцирь-С1» и «Сосна» и т.д. [19].

Так ЗРК «Тор» позиционируется как одно из наиболее эффективных отечественных средств борьбы с малозаметными целями (первоначально – с крылатыми ракетами ВТО). ЗРК «Тор-М1» может обнаруживать и обрабатывать до 48 воздушных целей с эффективной площадью рассеяния (ЭПР) порядка 0,1 м² на дальностях до 27 км, и поражать их с вероятностью 0,56-0,98 на высотах 0,01-9 км и на дальности 1-12 км. Количество одновременно обстреливаемых воздушных целей – 2. Время реакции комплекса – 7,4 с. Модификация ЗРК «Тор-М2Э» может работать уже по 4-ем воздушным целям одновременно. В варианте ЗРК «Тор-М2У» комплекс может также работать по 4-ем воздушным целям, но при этом боекомплект ЗРК увеличен с 8 до 16 зенитных управляемых ракет (ЗУР) [19, 20].

ЗРК «Бук» также предназначен для борьбы с воздушными целями с малой ЭПР – крылатыми ракетами ВТО, противорадиолокационными ракетами, а также с БПЛА. По заявлению производителя данный ЗРК может работать по 6 БПЛА одновременно, поражая их с вероятностью 0,7-0,9, на дальности 3-42 км и на высотах 0,015-25 км. Время реакции комплекса 15-18 с [20].

Перспективным комплексом ПВО, который специально ориентирован на борьбу с БПЛА, является ЗРПК «Панцирь-С1» (ранее известный как «Тунгуска-3»). Данный комплекс способен обнаруживать воздушные цели с малым ЭПР на дальностях до 20 км, и поражать их с использованием как ракетного, так и скорострельного пушечного вооружения. Дальность поражения ракетного вооружения 2,5-20 км на высотах 0,015-10 км. Дальность поражения пушечного вооружения 0-3 км на высотах 0,2-4 км. Количество одновременно обстреливаемых воздушных целей – 2. Время реакции 4-8 с [19-21].

В 2019 г. был представлен прототип новой версии этого ЗРПК – «Панцирь-СМ», при этом окончательная разработка комплекса должна быть завершена в 2021 г. ЗРПК «Панцирь-СМ» будет оснащен новой радиолокационной станцией (РЛС) на основе фазированной антенной решетки (ФАР) с повышенными показателями по дальности обнаружения целей (до 75 км), их селекции и помехозащищенности. Комплекс получит новую ЗУР со скоростью полета примерно 3000 м/с против 1300 м/с, у существующего «Панцирь-С1». Предполагается повышение возможностей по поражению целей: по дальности – до 40 км, по высоте – до 15 км (для целей со скоростью не более 2 км/с). Возможно, комплекс будет представлен в двух вариантах исполнения – в оснащении только ЗУР и в варианте с ракетно-пушечным вооружением. В первом варианте боекомплект «Панцирь-СМ» составит 24 ЗУР, во втором – 12 ЗУР. Помимо это-

го, разработчиками рассматривается возможность создания небольших ЗУР, предназначенных для поражения микро БПЛА типа «квадрокоптер», а также минометных мин и снарядов реактивных систем залпового огня (РСЗО) [22].

Другим комплексом ПВО, специально ориентированным на борьбу с БПЛА, является ЗРПК «Сосна», который, по сути, представляет собой глубокую модернизацию одного из массовых армейских ЗРК «Стрела-10М3» [19]. Так ЗРК «Стрела-10М3» может поражать воздушные цели на высотах 0,01-3,5 км и на дальности 0,8-5 км (с вероятностью поражения одной ЗУР 0,3-0,6). Время реакции комплекса 7-10 с [20]. ЗРПК «Сосна» в качестве ракетного вооружения оснащена 12 высокоскоростными двухступенчатыми ЗУР малой массы, способных развивать скорость до 900 м/с и совершать маневры с перегрузкой до 40g. Наведение ЗУР осуществляется комбинированно – радиокомандным способом на стартовом участке, в дальнейшем – телеориентирование второй ступени в лазерном луче. Дальность поражения этого ЗРПК ракетным вооружением – 1,3-10 км на высотах до 5 км. Дальность поражения артиллерийским вооружением – до 4 км, на высотах до 3 км, с вероятностью до 0,6 [19, 20, 23].

1.1.2. Зарубежные ЗРК ПВО

Вышеуказанные отечественные ЗРК, специализирующиеся на противодействии БПЛА, фактически являются уникальными разработками, полнофункциональные аналоги которых в других странах отсутствуют. При этом в настоящее время ведущие зарубежные страны, в полной мере осознав необходимость противодействия БПЛА, только планируют создание подобных ЗРК.

Так ситуация в ПВО США такова, что после снятия с вооружения ЗРК малой дальности Chaparral (с ЗУР MIM-72) в 1997 г. и средней дальности Hawk (с ЗУР MIM-23) в 2002 г. единственными массовыми сухопутными средствами ПВО в вооруженных силах (ВС) США остались ЗРК большой дальности Patriot PAC-3 и ПЗРК Stinger. При этом, единственным средством ближнего действия были ракеты FIM-92 от ПЗРК Stinger, причём использовали их с различных платформ [24]:

- ПЗРК Stinger (MANPADS, Man-portable air-defense system).
- ЗРК малой дальности M1097 Avenger – гиростабилизированная платформа с 2 контейнерами по 4 ракеты в каждом и другим оборудованием на базе джипа M998 HMMWV;
- боевая машина пехоты (БМП) ПВО M2 Bradley – принята на вооружение ВС США в 1997 г., всего в этот вариант были переоборудованы 99 БМП. Но уже в 2005-2006 гг. они были сняты с вооружения, точнее возвращены назад в конфигурацию обычных БМП;
- универсальные пусковые установки MML (Multi-Mission Launcher) – проходят испытания с 2016 г [25].

Таким образом, на 2013 г. на вооружении ПВО ВС США из средств, которые можно рассматривать как массовые средства огневого поражения БПЛА, находилось только ЗРК большой дальности Patriot (около 480 пусковых установок) и ЗРК малой дальности M1097 Avenger (примерно 700 пусковых устано-

вок), использующий ракеты Stinger [24]. В результате командованием США в 2016 г. было заявлено необходимости создания аналогов российских ЗРК «Тор» и «Панцирь-С1» в рамках программы «Возможность защиты от огня с закрытых позиций» (Indirect Fire Protection Capability Increment 2 – Intercept, IFPC Inc 2-I). Одним из элементов этой программы является создание боевой машины Centurion C-RAM (Counter Rocket, Artillery and Mortar – противодействие ракетам, артиллерии и минометам) [26].

Рассмотрим ЗРК Patriot PAC-3, ЗРК M1097 Avenger и зенитно-артиллерийский комплекс (ЗАК) Centurion C-RAM более подробно.

Комплекс Patriot – американский ЗРК, используемый ВС США в качестве основного средства ПВО от широкой номенклатуры воздушных целей на средних и больших высотах. В дополнение к этому, ЗРК Patriot играет роль средства перехвата баллистических ракет. В состав ЗРК Patriot входят ракеты воздушно-го перехвата и многофункциональная РЛС-подсистема. В настоящий момент эксплуатируется усовершенствованная версия этого ЗРК – Patriot PAC-3, принятая на вооружение в 2001 г. Многофункциональная РЛС AN/MPQ-53 используется в ЗРК Patriot PAC-3 для обнаружения, сопровождения и подсветки целей, слежения за ЗУР и передачи на них команд. Основные тактико-технические характеристики (ТТХ) РЛС AN/MPQ-53: рабочая длина волны 5,5-6,7 см (4-6 ГГц); сектор обзора в режиме поиска – по азимуту от +45° до -45°; по углу места 1°-73°; сектор сопровождения в режиме наведения через ЗУР: по азимуту от +55° до -55°; по углу места 1°-83°; дальность обнаружения: при ЭПР цели: 0,1 м² (малоразмерные БПЛА или головная часть ракеты) – 70 км; 0,5 м² (средние БПЛА – ракета) – 100 км; 1,5 м² (большие БПЛА или истребитель) – 130 км; 10 м² (бомбардировщик) – 180 км; количество одновременно сопровождаемых целей – до 125; максимальная скорость сопровождаемых целей – 2200 м/с; время обнаружения цели – 8-10 с [27].

В 2017 г. ЗРК Patriot начал проходить масштабную программу модернизации по проекту PBD8 (Post-Deployment Build 8) и к 2019 г. модернизацию уже прошли 2/3 комплексов, стоящих на вооружении ВС США. Основные работы по модернизации предусматривают замену РЛС на новую многофункциональную станцию AN/MPQ-65A и переход на цифровую обработку сигналов. Это обеспечит повышение дальности обнаружения ЗРК до 230-240 км, а также повысит помехоустойчивость РЛС [27].

Основным средством поражения ЗРК Patriot PAC-3 является ЗУР MIM-104. ТТХ данной ЗУР: дальность стрельбы: минимальная – 3 км; максимальная по баллистической цели – 20 км; максимальная по аэродинамической цели – 80 км; высота поражения цели: минимальная – 0,6 км; максимальная – 24-25 км; время полета – 8,3-17 с. Максимальная скорость поражаемых воздушных целей – 1600 м/с, на высоте до 15 км. Вероятность поражения одной ракетой в отсутствие помех: самолёта – 0,8-0,9; БПЛА или тактической ракеты – 0,6-0,8.

ЗРК малой дальности M1097 Avenger предназначен для поражения воздушных целей на встречных курсах и вдогон на высотах 0,5-3,8 км и дальностях 0,5-5,5 км. Комплекс создан в 1990 г. компанией Boeing Aerospace

Company с использованием ЗУР FIM-92 Stinger. В своем составе ЗРК имеет пусковую установку (2 пакета по 4-е ракеты FIM-92 Stinger в транспортно-пусковых контейнерах (ТПУ)), 12,7-мм пулемет, систему обнаружения и сопровождения целей, ЭВМ, аппаратуру опознавания «свой-чужой» AN/PPX-3B, органы управления и индикации, связные радиостанции AN/PRC-77 и AN/VRC-47. Система целеуказания ЗРК способна автоматически сопровождать цель, определяя расстояние до цели, и производить обстрел целей в движении со скоростью до 35 км/ч. В комплексе M1097 Avenger используется ЗУР FIM-92B Stinger, с головками самонаведения (ГСН) инфракрасного (ИК) и ультрафиолетового (УФ) диапазона POST (Passive Optical Seeker Technology). Максимальная скорость полета ЗУР – $M=2,2$. Для перекрытия «мертвой зоны» ЗУР FIM-92 Stinger служит крупнокалиберный 12,7-мм пулемет МЗР, являющийся улучшенной версией AN-M3 MG со скорострельностью 1100 выстр./мин и боезапасом 300 патронов.

ЗАК Centurion C-RAM является перспективным наземным вариантом известного американского корабельного ЗАК Mark 15 Phalanx CIWS. Этот ЗАК оборудован шестиствольной 20-мм пушкой M61A1 со скорострельностью до 2000-2200 выстрелов/мин и эффективной дальностью стрельбы 1,47 км, стреляющей осколочно-фугасными снарядами для большей эффективности поражения, установленной на едином лафете с двумя РЛС обнаружения и сопровождения цели. В боекомплекте артиллерийской установки Centurion C-RAM используются осколочно-трассирующие снаряды M246 и осколочно-фугасные M940. Для безопасности людей, находящихся на земле, все снаряды снабжены самоликвидаторами, подрывающими их через заданный временной интервал. Общий боезапас составляет 1500 выстрелов. При создании Centurion C-RAM специалисты компании Raytheon использовали наработки и боевой опыт, полученные при создании и эксплуатации ЗСУ M163 Vulcan на базе БТР M113 и последних модификаций морского ЗАК Phalanx CIWS. Так как сухопутная ЗАК Centurion C-RAM функционально сильно отличается от своего морского прототипа – Mark 15 Phalanx CIWS, в её составе использовалось несколько иное радиолокационное и оптоэлектронное оборудование, а также другой алгоритм функционирования. ЗАК Centurion C-RAM так же, как и корабельный ЗАК Mark 15 Phalanx CIWS, осуществляет поиск и поражение целей в автоматическом режиме. Функции оператора при несении боевого дежурства сводятся к контролю работоспособности ЗАК, подтверждение запроса на поражение цели, вошедшей в охраняемый периметр и пресечению нештатных ситуаций. В отличие от морского ЗАК, для расчёта баллистической траектории цели и определения степени угрозы прикрываемому объекту и принятия решения о его поражении, в состав Centurion C-RAM включена выносная РЛС AN/TPQ-36 Firefinder. Эта компактная мобильная РЛС на основе ФАР AN/TPQ-36 Firefinder способна обнаруживать снаряды и ракеты РСЗО на дальности 18-24 км, одновременно сопровождать до 20 целей и на основе расчёта их траекторий с высокой точностью определять координаты артиллерийских позиций. С 2009 г. в составе ЗАК для раннего обнаружения мин, ракет, снарядов и малогабаритных БПЛА на траектории используется выносная РЛС AN/TPQ-53 Target Acquisition Radar, с

максимальной дальностью работы по 122-мм реактивным снарядам – 60 км. РЛС AN/TPQ-53 размещается на шасси 5-тонного бронированного грузовика FMTV, который способен двигаться по шоссе со скоростью более 80 км/ч. Информация о целях, обнаруженных выносными РЛС в реальном режиме времени передаётся на ПУ ЗАК по радиорелейным или волоконно-оптическим линиям. Помимо выносной РЛС на самом ЗАК Centurion C-RAM также используется РЛС обнаружения и наведения, штатно размещенная на платформе с артиллерийской установкой. В первом варианте ЗАК Centurion C-RAM для обнаружения миномётных мин и снарядов в непосредственной близости от защищаемой зоны использовалась РЛС AN/TPQ-48. Комплект аппаратуры РЛС весил 220 кг, дальность обнаружения 120-мм мины – 5 км. Однако после ряда инцидентов, когда РЛС AN/TPQ-48 пропустила несколько вражеских снарядов, она была заменена РЛС AN/TPQ-49. Фактически РЛС AN/TPQ-49 – это улучшенный вариант РЛС AN/TPQ-48, в котором помимо повышения надёжности, и снижения массы до 70 кг, дальность обнаружения 120-мм мин доведена до 10 км. Для применения в составе ЗАК Centurion C-RAM компания Raytheon разработала РЛС Ku-диапазона (10,7-12,75 ГГц) MFRFS (Multi-Function RF System) с сектором сканирования 360°. В настоящее время характеристики РЛС MFRFS в открытой печати не разглашаются, но, как отмечается в пресс-релизах по итогам испытаний, после введения РЛС MFRFS в состав аппаратной части ЗАК Centurion эффективность ЗАК существенно возросла. Помимо РЛС, для поиска и целеуказания воздушных и наземных целей предназначена оптоэлектронная аппаратура с тепловизионным каналом (FLIR), с автоматическим захватом и сопровождением движущихся объектов. Это даёт возможность помимо уничтожения артиллерийских снарядов в любое время суток и в сложных погодных условиях противодействовать крылатым ракетам, БПЛА, низколетящим самолётам и вертолётам, а также использовать ЗАК Centurion C-RAM для самообороны [26, 28].

ЗАК Centurion C-RAM предназначен для прикрытия важных наземных объектов (расквартированных армейских частей, военных баз, а также мест развёртывания систем ПВО и ПРО большого радиуса действия) от средств воздушного нападения на предельно малых и малых высотах, ракет РСЗО, БПЛА, артиллерийских снарядов и миномётных мин, а также для поражения живой силы и легкобронированных целей противника в сложных условиях обстановки и в любое время суток [26, 28].

Перспективным направлением развития ЗРК, ориентированных против БПЛА, является проект Low-Cost Extended Range Air Defense (LOWER AD). Этот проект был анонсирован в 2018 г. командованием по развитию боевых возможностей ВС США – CCDC (Combat Capabilities Development Command), целью проекта является создание нового более простого и дешевого ЗРК, чем широко распространённый ЗРК Patriot. Новый комплекс будет нести большее число ракет с меньшей дальностью полета. Его задачей станет поражение дозвуковых крылатых ракет и ударных БПЛА. Более сложные цели других типов предлагается оставить для ЗРК Patriot. Совместное применение Patriot и LOWER AD, как ожидается, позволит получить выгодное соотношение боевой

эффективности и стоимости эксплуатации. На данный момент проект LOWER AD находится на ранних стадиях проектирования – определен облик будущего ЗРК, сформированы некоторые принципиальные тактико-технические решения. Более серьезные результаты появятся лишь в 2021 г. или позднее [29].

Отметим, что ведущие западные компании в инициативном порядке продолжают заниматься проблемой противодействия БПЛА. Так в 2012 г. компания Raytheon сообщила о получении контракта от армии США стоимостью 79,2 млн долларов на разработку ракеты-перехватчика AI3 (Accelerated Improved Intercept Initiative) для защиты личного состава от БПЛА, тактических ракет и минометных снарядов. Над подобным проектом EAPS с ракетой МНТК работала и компания Lockheed Martin совместно с научно-исследовательским центром авиации и ракетных систем США. Известно, что Raytheon и Lockheed Martin проводили контрольные тестовые пуски своих ракет еще в 2013 г. и планировали продолжить свои разработки в рамках вышеуказанной программы Intercept, IFPC Inc 2-I, однако до сих пор это не привело к созданию каких-либо демонстрационных образцов ЗРК, подобных отечественным «Панцирь-С1» и «Тор» [26].

1.2. Результаты испытаний ЗРК ПВО при решении задач противодействия БПЛА

1.2.1. Результаты испытаний отечественных ЗРК ПВО

Вместе с тем, несмотря на несомненные успехи отечественного военно-промышленного комплекса в области создания ЗРК противодействия БПЛА, указываемые разработчиками высокие тактико-технические характеристики (ТТХ) ЗРК не в полной мере подтверждаются на практике. При этом, если против средних и больших БПЛА вышеуказанные отечественные ЗРК демонстрируют заявленные показатели поражения, то с малыми БПЛА все обстоит не так однозначно.

Так, предполагается, что РЛС зенитных комплексов «Тор-М1», «Оса-АКМ» и т.д. способны обнаружить малоразмерные БПЛА на дальностях 3,3-7,4 км. Учитывая, что скорости таких БПЛА составляют порядка 50-250 км/ч, боевые расчеты этих ЗРК должны иметь достаточно времени на проведение предпусковых операций и обстрел цели [30].

Однако, результаты полигонных испытаний показали, что РЛС обнаружения целей ЗРК «Тор» обеспечивает обнаружение малоразмерных БПЛА на дальностях всего 3-4 км. Практический опыт экспериментальных стрельб по малоразмерным мишеням – аналогам БПЛА («Пчела», РУМ-2МБ и «Рейс»), свидетельствует о низкой эффективности их поражения. Основными причинами этого являются несовершенство системы управления подрывом боевой части ЗУР, а также большие ошибки сопровождения цели и наведения ЗУР на малоразмерные БПЛА [30, 31].

Результаты полигонных испытаний ЗРК «Панцирь-С1» показывают, что стрельба ракетным вооружением по малоразмерным БПЛА практически невозможна. Причиной этому является малая дальность обнаружения малоразмер-

ных БПЛА со стороны РЛС обнаружения и целеуказания, которая также, как и для ЗРК «Тор», составляет 3-5 км, что практически совпадает с ближней границей зоны поражения ЗУР. Применение пушечного вооружения этих ЗРК против малоразмерных БПЛА принципиально возможно, но по причине малых размеров БПЛА, вероятность их поражения невелика [30, 31].

Испытания ЗРК «Стрела-10МЗ» показывают, что к этот комплекс способен поражать мини-БПЛА типа «Акила» только в дневных условиях. Возможность стрельбы ЗРК «Стрела-10МЗ» по этому типу цели определяется главным образом дальностью обнаружения цели оператором и дальностью захвата ГСН ЗУР. Средние дальности обнаружения мини-БЛА типа «Акила» оператором ЗРК «Стрела-10МЗ» составляют 1,3-4,5 км, что крайне мало для ведения эффективной стрельбы. Использование оператором встроенного оптического визира в ограниченном секторе поиска (при наличии точного целеуказания) позволяет увеличить дальность обнаружения малоразмерной цели в 1,5-2,1 раза. Расчетные дальности захвата ГСН ЗУР мини-БПЛА типа «Акила» фотоконтрастным каналом (ФК) по аналогичным причинам будут невысокими и составлять 2,8-3,5 км, а захват цели по ИК-каналу вообще невозможен из-за ее крайне слабого теплового излучения. При этом, что БПЛА «Акила» является устаревшим мини-БЛА, снятым с вооружения, а современные мини-БЛА имеют меньшие в 1,5-2 раза размеры и тепловую контрастность. В связи с этим, эффективность стрельбы по таким целям (и без того невысокая) будет еще ниже. Результаты боевых пусков по мишеням – аналогам малоразмерных воздушных целей показали, что стрельба ЗРК «Стрела-10СВ» и «Стрела-10М» обеспечивается в ФК-диапазоне в основном вдогон, а на встречном курсе – в ограниченной части зоны пуска. Дальности пуска ракеты составили для этих комплексов в среднем 1,5-2 км [30, 31].

Результаты оценки возможности стрельбы ЗПРК «Тунгуска» по мини-БПЛА показывают, что стрельба ракетным вооружением по этому типу цели практически невозможна. Это обусловлено тем, что дальность обнаружения мини-БПЛА в оптический визир составляет всего лишь 2-3 км, что практически равно значению дальности до ближней границы зоны поражения комплекса. Стрельба ЗПРК «Тунгуска» по БПЛА пушечным вооружением принципиально возможна, однако ввиду малых геометрических размеров БПЛА эффективность стрельбы по нему невелика. Практика показывает, что при обстреле мини-БПЛА типа «Акила» пушечным вооружением на дальности 3 км для достижения значения условной вероятности поражения цели равной 0,5, необходимо израсходовать от 4 до 13 тыс. снарядов (т.е. 2-6 б/комплекта), на дальности 1 км – от 0,5 до 1,5 тыс. снарядов (0,3-0,8 б/комплекта) [30].

При стрельбе по мини-БЛА из ПЗРК «Игла» сказываются сложности обнаружения малоразмерной малошумящей воздушной цели. Своевременное обнаружение и пуск ЗУР по такой цели для стрелка-зенитчика будут крайне затруднительными, что обусловлено следующими факторами:

- уменьшением контраста изображения цели при движении (перемещении) оптического прибора;
- быстроразвивающимся зрительным утомлением стрелка-зенитчика;

- низким уровнем акустического шума двигателя мини-БПЛА (около 50 дБ на дальности 1000 м, что ниже порога чувствительности органов слуха);
- сокращением времени на анализ обозреваемого пространства.

Более того, если даже малоразмерную цель удалось обнаружить, головка ГСН ЗУР ПЗРК может не захватить цель. Это обусловлено тем, что тепловая контрастность мини-БПЛА, имеющих в основном поршневые двигатели, на два порядка ниже пороговой чувствительности приемника ГСН ЗУР. Кроме того, малая эффективность стрельбы ПЗРК «Игла» по мини-БЛА объясняется также отсутствием системы дистанционного подрыва боевой части ЗУР. Однако в новых модификациях этого ПЗРК был введен неконтактный взрыватель, обеспечивающий подрыв боевой части ракеты при ее пролете относительно цели с некоторым промахом. Кроме того, повышение эффективности стрельбы комплекса по малоразмерным целям было достигнуто за счет увеличения мощности боевой части ЗУР, оптимизации ее точностных характеристик и др.

Таким образом, результаты практических испытаний показывают низкую эффективность вышеуказанных ЗРК ПВО (объективно являющихся лучшими в мире, по решению задачи противодействия БПЛА) против малоразмерных БПЛА [30-32].

1.2.2. Результаты испытаний зарубежных ЗРК ПВО

Негативный опыт боевого применения ЗРК Patriot PAC-3 против БПЛА при их атаке 14 сентября 2019 г. нефтеперерабатывающих заводов в г. Абкейк и г. Хурайс в Саудовской Аравии показал, что эти ЗРК имеют чрезвычайно низкую эффективность против малоразмерных низколетящих БПЛА [33]. Причиной этого является то, что в военной стратегии США основная задача в обеспечении ПВО возложена на истребители, а ЗРК большой дальности Patriot PAC-3 должны обеспечивать защиту от вражеских бомбардировщиков и от оперативно-тактических ракет. В то же время характеристики РЛС данного ЗРК не позволяют с высокой достоверностью обнаруживать и брать на сопровождение малоразмерные БПЛА на высокой дальности. Кроме того, применение по рассредоточенной «стаи» БПЛА довольно дорогостоящих ракет MIM-104 является нецелесообразным и неэффективным.

Что касается, перспективного американского ЗАК Centurion C-RAM, то в настоящее время достоверная информация об эффективности перехвата ЗАК Centurion C-RAM воздушных целей, подобных БПЛА, отсутствует, а имеющаяся информация о боевом применении этих ЗАК является противоречивой.

В ноябре 2004 г., комплексы Centurion C-RAM прошли цикл испытаний на полигоне Юма (шт. Аризона, США). В ходе тестовых стрельб, проводимых днём и ночью, было установлено, что данный ЗАК способен перехватывать одиночные 81-120 мм миномётные мины. Наибольшая эффективность достигалась, когда по одной цели вели огонь несколько артиллерийских установок. При этом, один ЗАК способен прикрыть территорию площадью 1,3 км². На боевое дежурство первые ЗАК Centurion C-RAM поступили в Ираке летом 2005 г. для защиты «зелёной зоны» в г. Багдад общей площадью около 10 км², террито-

рии в районе международного аэропорта, известной как «Camp Victory», авиабазы Балад и британских стационарных объектов в южном Ираке. Представитель корпорации Raytheon заявил, что в период боевой эксплуатации ЗАК их огнём было уничтожено 105 баллистических целей и примерно 2/3 из них – это миномётные мины. Однако в СМИ имелась информация, что Centurion C-RAM смогли сбить немногим более 30% целей, при том, что огонь зачастую велся по одиночным минам и 107-122-мм реактивными снарядами одновременно 2-3 артиллерийскими установками. Отразить одновременный удар 120-мм миномётной батареи или боевой машины БМ-21 с 40 направляющими ЗАК Centurion C-RAM не имел никакой возможности. Так в Афганистане был случай, когда ввиду несогласованных действий оператора РЛС дальнего обнаружения и офицера управления, а также неверной оценки ситуации, до дежурного расчёта ЗАК Centurion C-RAM не была доведена информация об обстреле 122-мм реактивными снарядами установки «Град», запущенными талибами с кустарных пусковых установок. В результате падения двух снарядов на территории, контролируемой ВС США, имелись убитые и раненые [28].

1.3. Анализ основных причин низкой эффективности ЗРК ПВО против БПЛА

1.3.1. Анализ стандартной номенклатуры целей ЗРК ПВО

Причины низкой эффективности ЗРК ПВО против отдельных типов БПЛА, с развернутым теоретическим обоснованием, подробно разобраны в работе [10].

Как показано в работе [10] к настоящему времени сформировались следующие группы СВН, являющиеся воздушными целями для ЗРК ПВО:

- 1) ударные, ударно-транспортные вертолёты, конвертопланы и БПЛА с вертолётным принципом полёта со скоростями 0-200 км/ч на высотах 0-4 км;
- 2) разведывательные, разведывательно-ударные БПЛА, БПЛА – постановщики помех, БПЛА – ретрансляторы связи, а также БПЛА другого функционального назначения со скоростями полёта 120-800 км/ч в диапазоне высот от 50 м до 3,5-7 км;
- 3) ударная авиация: штурмовики, фронтовые бомбардировщики, самолёты-разведчики и ударные БПЛА со скоростями полёта 400-800 км/ч на высотах от 50 м до 8-10 км;
- 4) перспективные многофункциональные боевые самолёты (5-го и последующих поколений) со сверхзвуковыми крейсерскими скоростями полёта. Эта номенклатура воздушных целей летает на скоростях 600-1800 км/ч и использует высоты от 50 м до 11-12 км;
- 5) самолёты – перехватчики ПВО, летающие на скоростях 1600-2600 км/ч в диапазоне высот 8-25 км;
- 6) сверхзвуковые крылатые ракеты, планирующие и кассетные авиабомбы, сбрасываемые в диапазоне скоростей 600-800 км/ч с высот 6-12 км и приходящие в зону наземной цели со скоростями 0,8-1 км/с;

- 7) дозвуковые крылатые ракеты большой дальности, со скоростью полета 600-850 км/ч в диапазоне высот от 50 м до 1 км;
- 8) пилотируемые ЛА и БПЛА оперативной и стратегической разведки типа МиГ-25Р, SR-71, GTD-21, перспективные СВН (гиперзвуковые БПЛА) и боевые блоки баллистических и оперативно-тактических ракет. Эта группа воздушных целей в силу значительных технических и материальных трудностей массового применения (за исключением боевых блоков баллистических и оперативно-тактических ракет) отличается низким номенклатурным насыщением, но при этом занимает достаточно обширный диапазон высот и скоростей – скорости от 2500-7000 км/ч (у земной поверхности) и высоты от 10 км до 30-40 км.

Данные группы воздушных целей приведены на рис. 1.

Как видно на рис. 1 функциональные зоны СВН, различающихся по принципу применения, перекрываются как по высоте, так и по скорости до скоростей полета ≈ 1800 км/ч. Соответственно, наибольшая плотность образцов СВН приходится именно на эту зону и именно эта группа СВН представляет наибольшую трудность для противодействия ЗРК ПВО. БПЛА постепенно развиваясь занимают все зоны, ранее принадлежавшие пилотируемой авиации, до скоростей 1000 км/ч и в ближайшей перспективе уже претендуют на зону, относящуюся к авиации 5-го поколения.

Учитывая широкую номенклатуру БПЛА по скорости полета, размерности и по массе, можно утверждать, что они являются достаточно сложной целью для существующих и перспективных ЗРК ПВО. Это определяется тем, что [10]:

- до недавнего времени БПЛА различного назначения с размерностью по стартовой массе до 300-400 кг вообще не входили в номенклатуру целей ЗРК ПВО;
- малые скорости полета БПЛА (до 10-30 м/с) не обеспечивают их надежный захват, селекцию и сопровождение современными РЛС, входящими в состав ЗРК;
- малоразмерные БПЛА имеют низкие значения тепловых и радиолокационных сигнатур ($\text{ЭПР } 0,001-0,1 \text{ м}^2$) и в этом же направлении идет развитие и усовершенствование БПЛА близких по своим характеристикам к пилотируемым ЛА;
- средства поражения современных и перспективных сухопутных (морских) и авиационных комплексов ПВО не позволяют обеспечивать гарантированное поражение БПЛА, особенно малоскоростных и малоразмерных;
- применение групп («стай», «роев») БПЛА одновременно и с различных направлений существенно снижает эффективность современных ЗРК;
- разработка теоретических основ и научных методов эффективного противодействия применению именно БПЛА в мирное время и в условиях городской инфраструктуры, а также борьбы с ними в военное время до сих пор не получила масштабного развития.

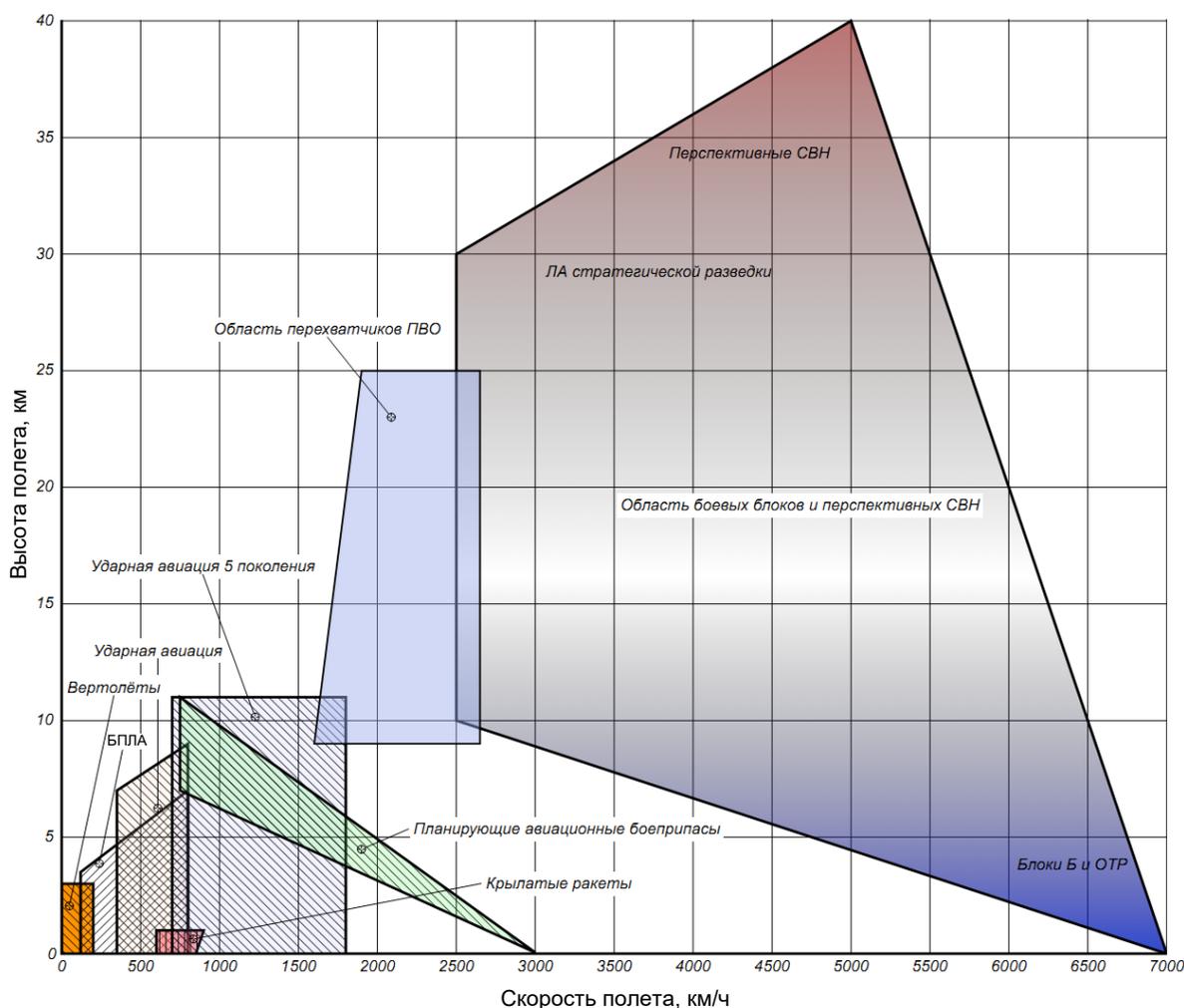


Рис. 1. Группы воздушных целей для ЗРК ПВО [10]

1.3.2. Анализ экономической целесообразности применения средств поражения ЗРК ПВО против БПЛА

Критерием экономической целесообразности применения средства поражения ЗРК по воздушной цели типа БПЛА является соотношение стоимостей:

$$C_{\text{БПЛА}} + C_{\text{ущ}} \geq C_{\text{пор}};$$

где: $C_{\text{БПЛА}}$ – стоимость БПЛА и расходов на его эксплуатацию в процессе выполнения боевой задачи; $C_{\text{ущ}}$ – суммарная стоимость наносимого БПЛА ущерба; $C_{\text{пор}}$ – суммарная стоимость средств поражения, расходуемых комплексом ПВО, необходимое для поражения БПЛА с требуемой вероятностью $P_{\text{пор}}^{\text{треб}}$.

Если средством ПВО используются однотипные средства поражения (зенитно-управляемые ракеты, артиллерийские снаряды и т.д.), каждое из которых имеет стоимость C_1 и поражает БПЛА с вероятностью $P_{\text{пор}1}$, то для гарантированного поражения БПЛА с вероятностью $P_{\text{пор}}^{\text{треб}}$ требуется выполнить условие:

$$P_{\text{обн}} P_{\text{зап}} \left(1 - (1 - P_{\text{пор}1})^{N_{\text{пор}}} \right) \geq P_{\text{пор}}^{\text{треб}},$$

где: $P_{\text{обн}}$ – вероятность обнаружения БПЛА средствами обнаружения комплекса ПВО; $P_{\text{зап}}$ – вероятность своевременного запуска средств поражения по БПЛА; $P_{\text{пор}1}$ – вероятность попадания средства поражения в сферу с радиусом r в которой укладывается не менее 50% поражающих элементов, имеющих кинетиче-

скую энергию достаточную для нанесения критических повреждений БПЛА;
 $N_{\text{пор}}$ – количество средств поражения, необходимое для поражения БПЛА.

Откуда:

$$N_{\text{пор}} = \left\lceil \log_{(1-P_{\text{пор1}})} \left(1 - \frac{P_{\text{пор}}^{\text{треб}}}{P_{\text{обн}} P_{\text{зап}}} \right) \right\rceil,$$

где: $\lceil \bullet \rceil$ – функция округления до наибольшего целого.

Учитывая вышеуказанное, суммарная стоимость средств поражения $C_{\text{пор}}$, расходуемых в интересах поражения одного БПЛА, будет равна:

$$C_{\text{пор}} = N_{\text{пор}} C_1.$$

Как видно из вышеуказанных функциональных зависимостей, процесс поражения БПЛА существенно зависит не только от стоимостных и вероятностно-боевых показателей средств поражения ЗРК, но и от характеристик комплекса ПВО в части своевременного обнаружения БПЛА, а соответственно – от своевременности применения средств поражения.

1.3.3. Анализ средств поражения ЗРК ПВО

Основными средствами ПВО, используемыми для противодействия БПЛА, являются [10]:

- ЗРК средней дальности с дальностью перехвата до 100 км;
- ЗРК малой дальности с дальностью перехвата до 30 км;
- ЗРК ближнего действия с дальностью перехвата до 10 км;
- ЗРПК с РЛС с дальностью перехвата до 10 км;
- ЗРПК с оптической станцией наведения с дальностью перехвата до 5 км;
- ПЗРК с дальностью перехвата до 7 км;
- ЗСАУ с дальностью перехвата до 2 км;
- ЗАУ с дальностью перехвата до 1,5 км;
- ЗПУ с дальностью перехвата до 1,5 км.

При этом, очевидно, что для каждого средства ПВО имеется своя цель.

Далее будут подробно рассмотрены особенности применения против БПЛА основных средств огневого поражения ПВО – зенитной артиллерии и управляемых ракет.

1.3.3.1. Артиллерийские средства поражения БПЛА

Рассмотрим вариант применения против БПЛА средств артиллерийского вооружения – ЗАУ и ЗПУ. Данные средства, в настоящее время рассматриваются как наиболее перспективные для борьбы с малогабаритными БПЛА, а также как средства перекрытия «мертвой зоны» ракетного вооружения ЗРК ПВО.

Правило знаков и определение промаха снаряда D_p при прохождении окрестности БПЛА показано на рис. 2. Исходя из конструктивных особенностей БПЛА можно выделить две зоны поражения, попадание снаряда в которые приводит к различным последствиям [10].

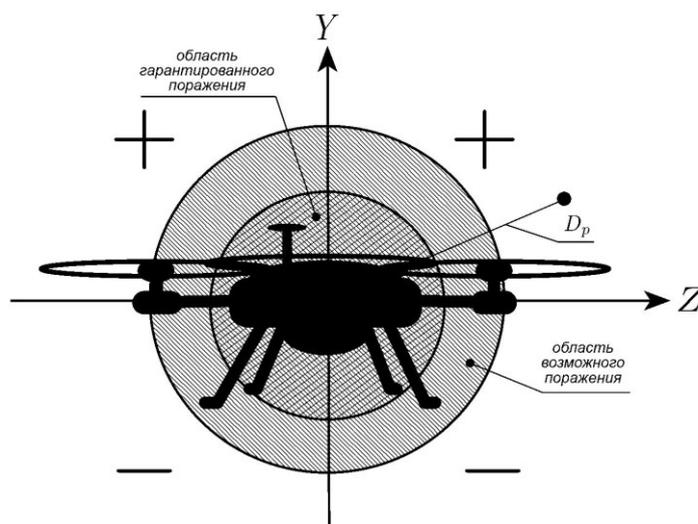


Рис. 2. К определению величины промаха снаряда и зон поражения [10]

Первая зона – область гарантированного поражения. Это область, попадание снаряда в которую приводит к неизбежному разрушению конструкции БПЛА. Например, для многодвигательного БПЛА со взлётной массой 100-150 кг диаметр этой зоны составляет 0,95 м [10].

Вторая зона – область возможного поражения, которая обусловлена низкой конструктивной плотностью БПЛА, что существенно снижает вероятность попадания снаряда в какой-либо значимый элемент конструкции с последующим его разрушением.

При этом, надо иметь ввиду, что разрушение периферийного элемента конструкции может привести к нарушению его целостности и потере функциональной работоспособности, но не всегда может привести к такому же эффекту для всего БПЛА. Например, поражение лопасти и её разрушение одного из воздушных винтов малого БПЛА (количество воздушных винтов не менее 4) приведёт к полной утрате функциональной работоспособности одного винта, а для всего БПЛА это приведёт лишь к снижению его эксплуатационных возможностей [10].

Вероятность поражения БПЛА $P_{\text{пор}}$ артиллерийскими снарядами можно оценить в соответствии с выражением [34]:

$$P_{\text{пор}} = 1 - (1 - P_{\text{поп}} P_{\text{пор } 1})^N,$$

где: $P_{\text{поп}}$ – вероятность попадания снаряда в область гарантированного поражения БПЛА; $P_{\text{пор } 1}$ – вероятность поражения БПЛА одним снарядом; N – количество снарядов, выпущенных по БПЛА.

При этом, как показано в работе [34], вероятность поражения БПЛА для отечественных ЗАК и ЗРПК составляет $P_{\text{пор}} = 0,6 \dots 0,9$, для случаев, когда БПЛА с ЭПР не менее $0,5 \text{ м}^2$ оказывается в зоне поражения соответствующих комплексов.

На рис. 3 показаны результаты численного эксперимента из работы [10], по оценке величин промахов снарядов для различных дальностей стрельбы и скорости $V_{\text{ц}}$ полёта малого БПЛА. По оси абсцисс отложено время прохожде-

ния минимального значения D_p с начала стрельбы. По оси ординат отложены значения промахов D_p с учётом выбранного правила знаков.

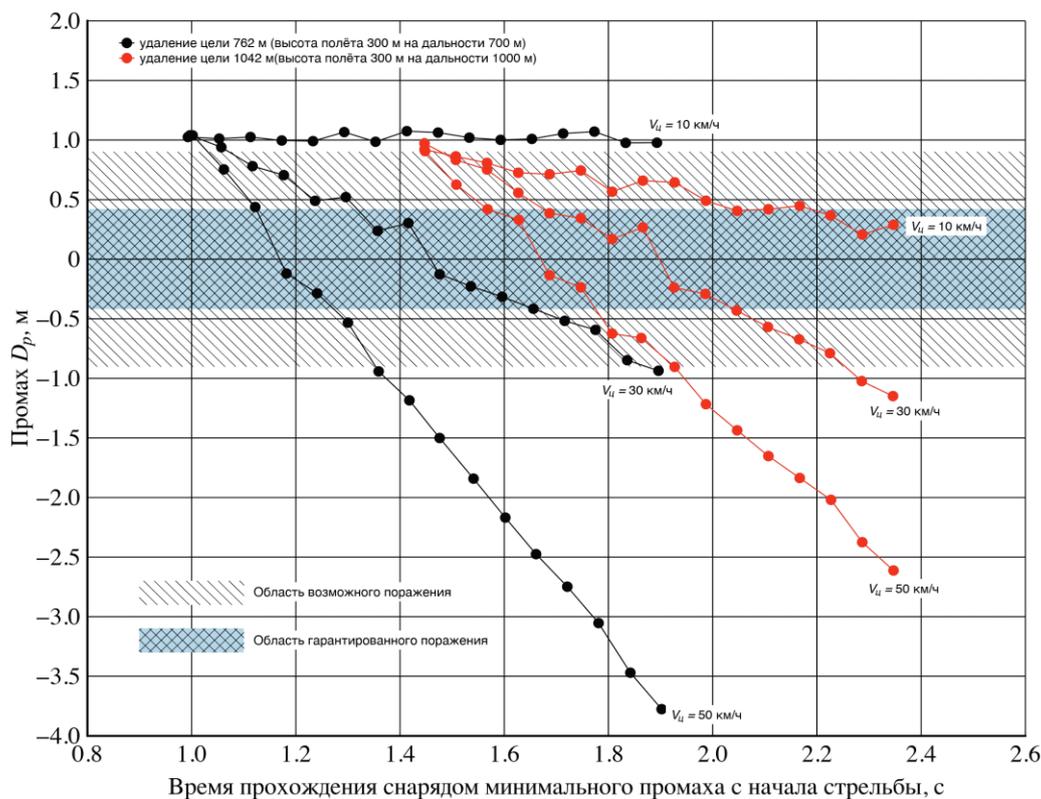


Рис. 3. Промахи снарядов в очереди из 16 снарядов для условий точного прицеливания с упреждением [10]

Из результатов модельных исследований, представленных на рис. 3, следуют следующие выводы [10]:

- стрельба по многодвижетельным малым БПЛА с малых дистанций более эффективна при малых и околонулевых их скоростях полёта;
- применение ЗАУ (ЗПУ) не может быть эффективным при стрельбе по малогабаритным БПЛА в любых условиях;
- точность прицеливания оказывает определяющее значение для эффективности стрельбы.

Таким образом, для повышения эффективности поражения БПЛА артиллерийским вооружением требуется использование инструментальных средств наведения и автоматического вычисления углов упреждения.

1.3.3.2. Ракетные средства поражения БПЛА

Оценка поражаемости БПЛА управляемым ракетным вооружением осуществлялась путём моделирования системы «ракета ПЗРК – воздушная цель». Ракеты ПЗРК были выбраны т.к. именно они являются основным средством поражения против наиболее сложных целей – малогабаритных и маневренных БПЛА, как в составе ЗРК «Стрела» и «М1097 Avenger», так и самостоятельно. При этом моделировалось движение ракеты как твёрдого тела с учётом измене-

ния во времени массы, экваториального момента инерции и тяги порохового двигателя.

Рассматриваемые типы ракеты ПЗРК представлены в таблице 1 [10, 35]. В качестве модельного образца использовалась гипотетическая ракета ПЗРК с усреднёнными характеристиками – таблица 2 [10].

Таблица 1 – Основные ТТХ ракет ПЗРК [10, 35]

Наименование	Наведение	Высота, км	Скорость, м/с	Дальность D , км
Javelin	ПА РК	0,01-3	578,5	0,3-5,5
Starburst	ПА РК	0,01-4	850	0,4-6
Starstreak	ПА ЛК	0,01-5	857	0,3-6
Стрела-2М	ИК, ФК	0,01-2,3	630	0,8-4,2
Стрела-2М	ИК, ФК	0,01-2,3	630	0,8-4,2
Стрела-3	ИК, ФК	0,015-3	470	0,5-4,5
Стрела-3	ИК, ФК	0,01-3,5	570	0,5-5
RBS-70	ПА ЛК	0,01-3	525	0,2-5

Таблица 2 – Основные ТТХ модельной ракеты ПЗРК [10]

Характеристика	Значение
Стартовая масса	12 кг
Начальная скорость полёта	28 м/с
Максимальная скорость полёта	600 м/с
Продолжительность полёта до самоликвидации	14 с
Дальность стрельбы	0,2-4 км
Высота полёта цели	0,2-3 км
Способ наведения	пропорц.
Тип ГСН	А, ИК, ФК
Максимальная поперечная перегрузка	24
Угол поля зрения ГСН	20°

Моделирование осуществлялось при следующих допущениях [10]:

- ветер отсутствует;
- характеристики ГСН идеальны и постоянны;
- атмосфера прозрачна, метеорологическая дальность видимости более 20 км;
- тяга двигателя постоянна от старта до самоликвидации;
- БПЛА движется с постоянной скоростью по заданной траектории.

Рассматривается задача построения траектории движения ракеты ПЗРК и принятых допущений для достижения критерия поражения БПЛА – промах ракеты $D_p > 0,5$ м (см. рис. 2).

Оценка вероятности перехвата ракетой БПЛА по его тепловому следу не рассматривалась т.к. общий тепловой поток выхлопной системы через входной патрубок выхлопной системы диаметром 0,05 м составляет до 2 кВт/с, а через выхлопной коллектор специальной конструкции производится понижение до уровня 0,0029 кВт/ср. Потребное угловое разрешение оптико-электронных средств наведения ПЗРК для обнаружения малого БПЛА и последующего его сопровождения на дальности 3000 м должно быть не хуже 0,009° [10].

На рис. 4 показаны, в качестве примера, результаты моделирования движения ракеты ПЗРК при перехвате малогабаритного многодвигательного БПЛА [10]. Чёрным цветом показана траектория движения ракеты при точном определении координат БПЛА в момент пуска. Синим цветом – траектория ракеты при старте с начальной ошибкой наведения.

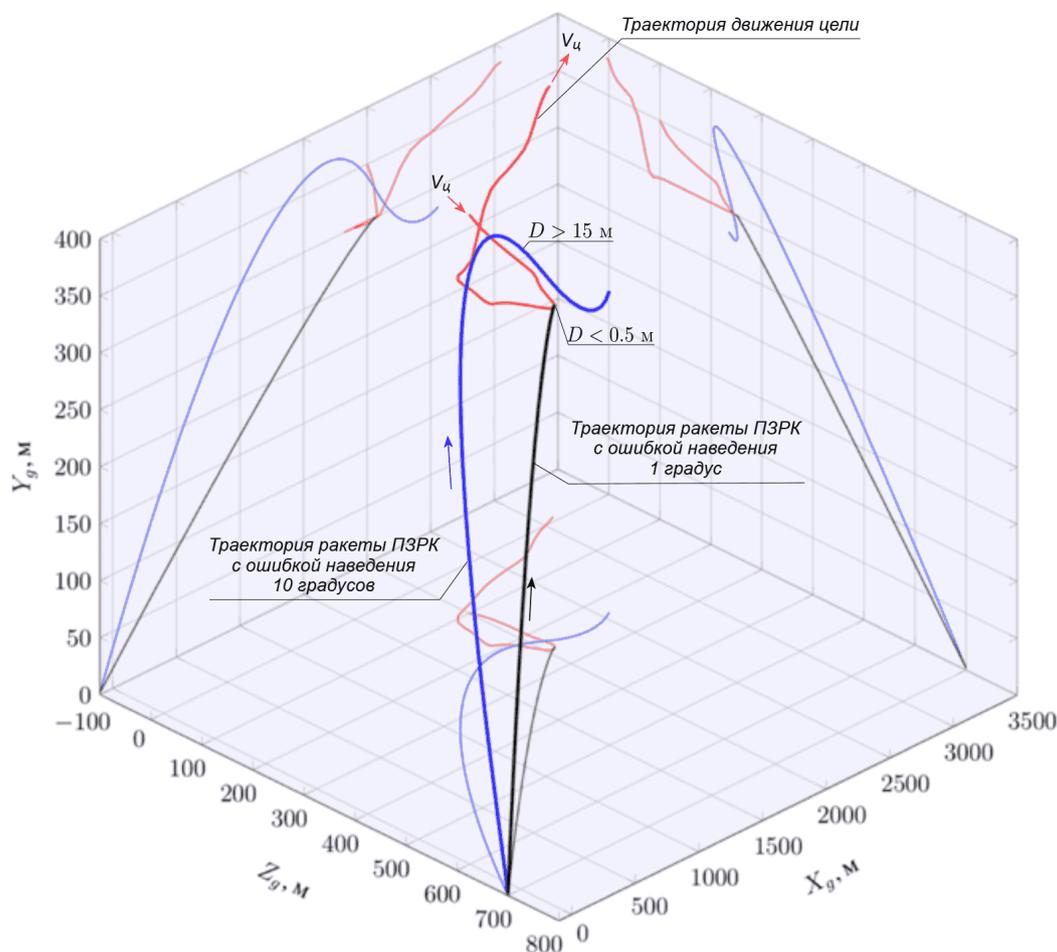


Рис. 4. Траектории ракеты ПЗРК и БПЛА при различных условиях [10]

Из рис. 4 видно, что высокая скорость полёты ракеты ПЗРК, даже при высокой располагаемой поперечной перегрузке, не позволяет исправить ошибку наведения, и ракета проходит на дистанции, которая не позволяет поразить цель [36]. При этом следует учитывать, что БПЛА на малых дальностях от ракеты может «выпасть» из поля захвата ГСН ракеты [37].

На рис. 5 показаны расчётные данные из результатов исследований по оценке эффективности использования штатных средств ПВО для поражения одиночной воздушной цели типа «БПЛА-квадрокоптер» одной очередью из ствольного оружия или одной ракетой для ПЗРК и ЗРК с учетом влияния маневрирования БПЛА. Под поражением здесь понимается событие, при котором БПЛА в результате внешнего воздействия лишается возможности продолжать полёт. Исследования проводились для условий отсутствия помех и вероятности обнаружения цели $P_{обн} = 1$. При этом тепловыделение цели отсутствует.

Несмотря на то, что приведенные на рис. 5 данные относятся к одному типу цели и предполагают достаточно идеальные условия, для БПЛА самолетного и вертолетного типа уровень эффективности штатных средств ЗРК ПВО не будет сильно отличаться. Наличие теплового следа для ракет ПЗРК позволяет несколько повысить вероятность поражения воздушной цели, однако её интенсивное маневрирование может свести «на нет» возможность использования фактора заметности [10].

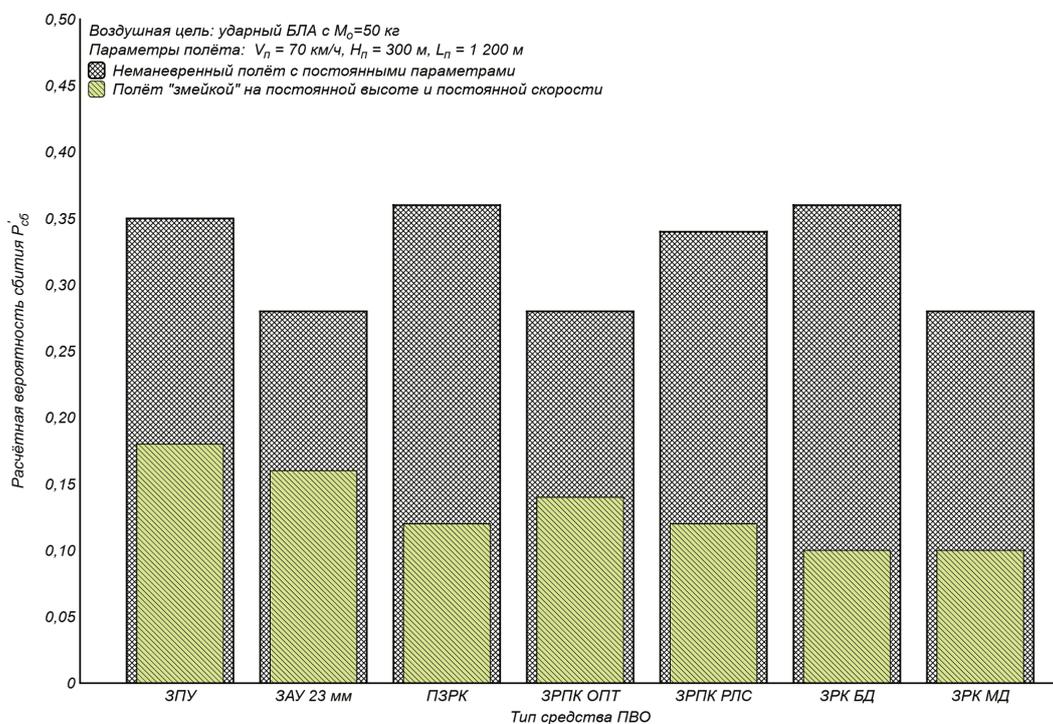


Рис. 5. Расчётные вероятности поражения цели типа «БПЛА-квадрокоптер» штатными средствами современной ПВО [10]

Обобщая вышеуказанное, можно сделать выводы, что основными причинами низкой эффективности средств ПВО при стрельбе по БПЛА являются [10]:

- для зенитных ракет: высокая скорость полёта средства поражения и невозможность управления ею при наведении на БПЛА;
- для зенитной артиллерии: низкая плотность средств поражения (снарядов, пуль) в объёме пространства, внутри которого находится БПЛА из-за рассеивания, обусловленного колебаниями ствола, платформы, на которой установлена установка и зависимостью внутренней баллистики от состояния и температуры ствола.

В последнее время появляются разработки средств поражения с дробовым зарядом, размещаемым в снаряде, в котором момент подрыва программируется во время выстрела [38-41]. Анализ и исследования эффективности использования этих средств ПВО против БПЛА [10] показали, что особого эффекта вряд ли удастся достичь ввиду невозможности устранить вышеуказанные особенности, присущие ствольной артиллерии.

1.3.4. Анализ эффективности ЗРК ПВО в условиях групповой атаки БПЛА

Для комплексов ПВО важно обеспечить надёжную защиту прикрываемого объекта путём минимизации количества СВН, в том числе и БПЛА, достигающих рубежа гарантированного нанесения ущерба прикрываемому объекту. С этой точки зрения групповое применение БПЛА представляет собой высокоэффективный способ преодоления зоны ПВО, и в настоящее время групповое применение БПЛА в виде «стай» или «роёв» является активно развивающимся направлением исследований [42-46]. При этом групповое применение БПЛА может применяться не только в интересах поражения прикрываемого объекта или самого комплекса ПВО (разведывательно-ударные «БПЛА-камикадзе»), но также и в интересах исчерпания ресурса системы ПВО, перед основным ударом.

Так один из первых эпизодов боевого применения БПЛА относится к 1982 г., когда Израиль использовал налет БПЛА для вскрытия системы ПВО Сирии, по которой второй волной был нанесен удар с использованием противорадиолокационных ракет и крылатых ракет ВТО, запускаемых с пилотируемых самолетов израильских ВВС. В частности, в составе боевых средств ПВО Сирии находились самоходные ЗРК «Куб» и «Оса-АК». Как сообщается, против сирийских комплексов «Оса-АК», дислоцированных в Южном Ливане, Израиль применял, наряду со средствами РЭП, разнообразные тактические приемы, направленные на снижение боеспособности этого ЗРК, в частности, массовый пуск БПЛА, с прикрепленными уголковыми отражателями, за счет чего достигался эффект имитации ими боевых самолетов, с последующей атакой фронтовой авиации на позиции ЗРК уже израсходовавших свой боекомплект [19].

Из недавних случаев группового применения БПЛА отметим атаку террористами пункта материально-технического обеспечения российского ВМФ в г. Тартусе и авиабазы «Хмеймим» в Сирии в январе 2018 г. [47], а также атаку в сентябре 2019 г. нефтеперерабатывающих заводов в г. Абкейк и в г. Хурайс в Саудовской Аравии [33].

Рассмотрим условную задачу отражения налёта группы БПЛА на прикрываемый ЗРПК объект. При этом, прикрываемый объект представляет собой участок местности, в центре которой находится ЗРПК. Задачей ЗРПК является поражение всех БПЛА, стремящихся войти в зону ответственности с радиусом 2 км (см. рис. 6), для применения своих средств поражения.

Моделирование данной тактической задачи представлено в работе [10], а результаты моделирования – на рис. 6.

На удалении 25 км от ЗРПК располагается 10 км зона (светло-зелёное кольцо) из которой одновременно стартует неупорядоченная однородная группа БПЛА. Каждый БПЛА имеет свой номер. Полёт каждого БПЛА осуществляется автономно в секторе 90° и не синхронизируется с другими членами группы. Рассматриваются БПЛА самолётного типа со стартовой массой 10 кг. Дальность обнаружения БПЛА с помощью средств оптико-электронной разведки (ОЭР) и РЛС, входящих в состав ЗРПК, в зависимости от высоты полёта со-

ставляет 1,5-2,5 км. Таким образом, наряд воздушных целей составлял 15 единиц, летящих со скоростями от 100 до 300 км/ч на высотах 200-800 м [10].

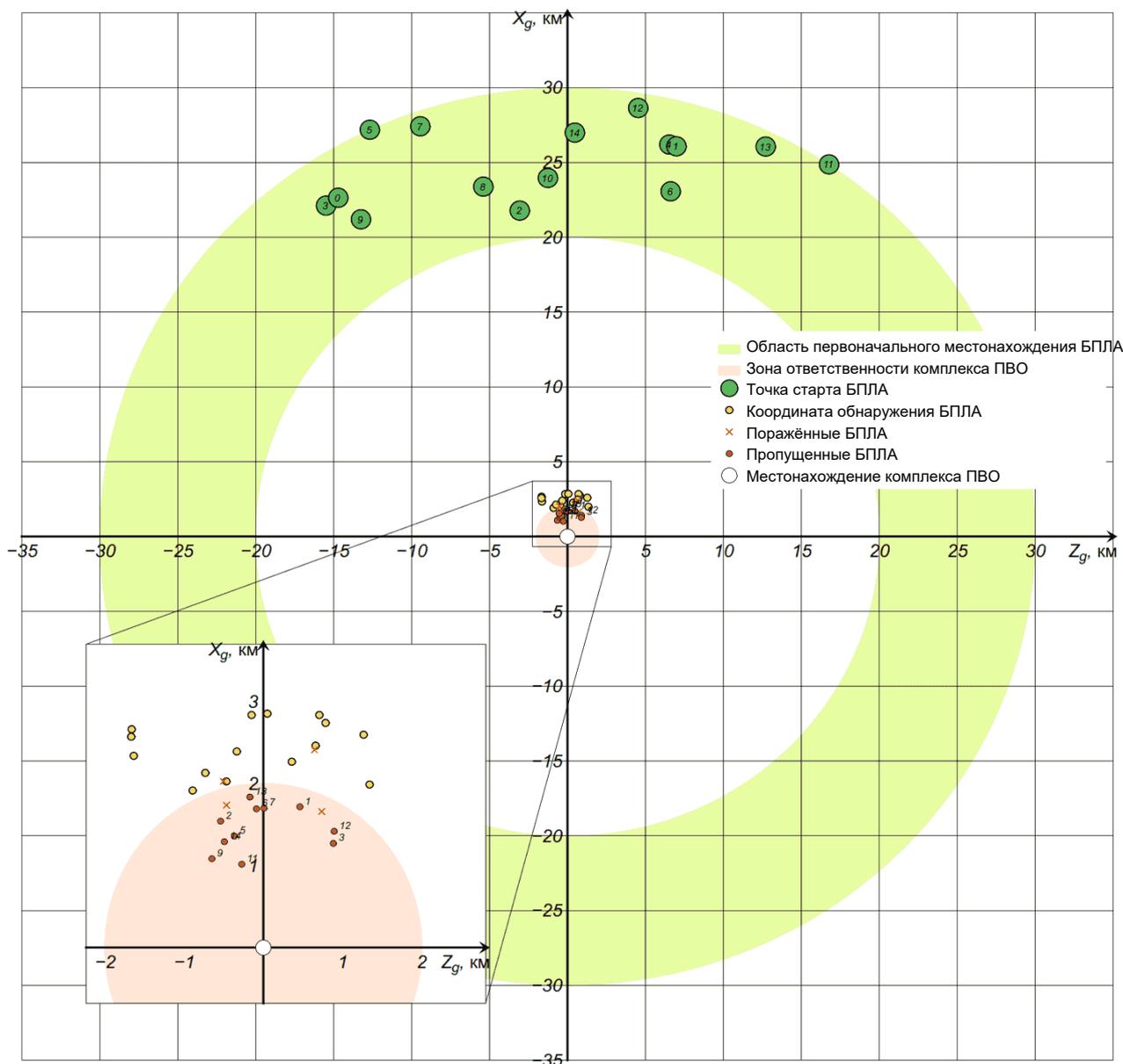


Рис. 6. Результаты моделирования налета группы БПЛА на ЗРПК [10]

Среднее значение вероятности поражения одиночной воздушной цели огневыми средствами ЗРПК $P_{\text{пор}} \approx 0,26$. Запас средств поражения ЗРПК составляет 16 единиц: 16 очередей по 100 снарядов или 16 зенитных ракет или их сочетания в разном соотношении. Приоритетность цели p определялось по критерию минимально располагаемого времени t для применения средств поражения ЗРПК [10]:

$$p = \min \left\{ t_i \left| t_i = \frac{D_i \cos \varphi_i}{V_i \cos \Theta_i \cos \psi_i} + \frac{\delta_i}{\omega_{\text{пов}}} \right. \right\},$$

где: D_i – наклонная дальность до i -го БПЛА; φ_i – угол места i -го БПЛА; V_i – скорость полёта i -го БПЛА; Θ_i – угол наклона траектории движения i -го

БПЛА; ψ_i – относительный курс полёта i -го БПЛА; δ_i – угол рассогласования оси направленности средства поражения ЗРПК и азимута i -го БПЛА; $\omega_{пов}$ – угловая скорость поворота оси направленности средства поражения ЗРПК; i – номер БПЛА; p – приоритет воздействия по БПЛА.

Результаты ранжирования БПЛА по критерию приоритетности показаны на рис. 7, а на рис. 8 – потребные углы доворота осей направленности средств поражения ЗРПК (стволов зенитных пушек или направляющих зенитных ракет) для стрельбы по БПЛА.

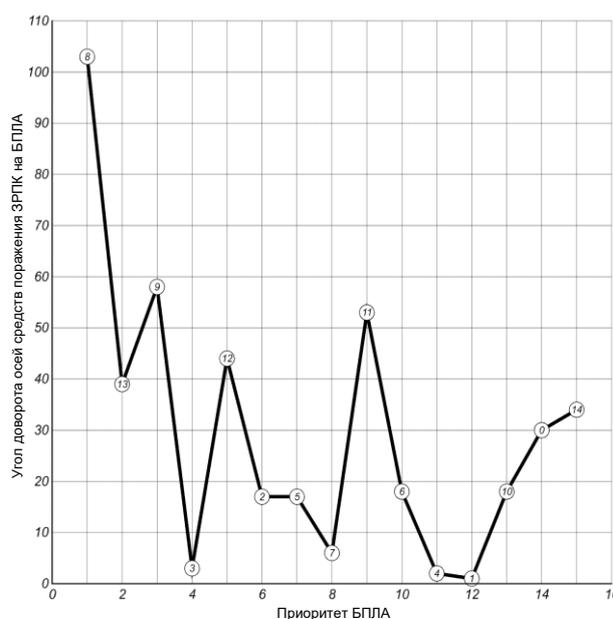
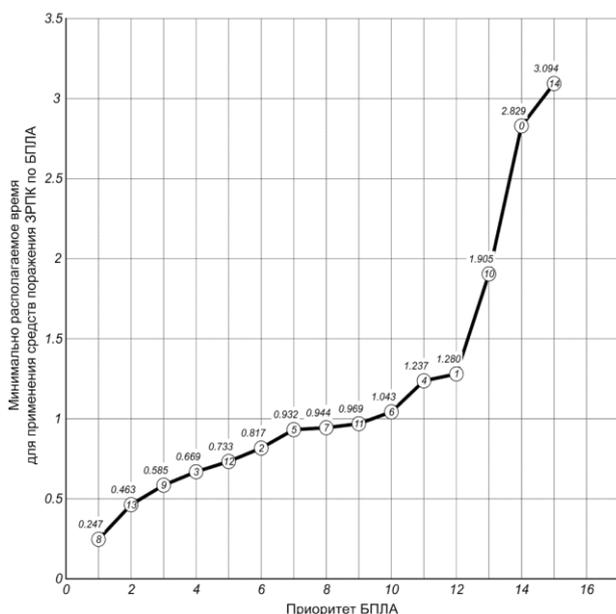


Рис. 7. Результаты распределения приоритетности целей в группе БПЛА [10]

Рис. 8. Результаты определения углов доворота осей средств поражения ЗРПК на БПЛА по их приоритетам [10]

Физическое время моделируемого налёта группы БПЛА на прикрываемый объект составило 10 мин.

В результате моделирования можно сделать следующие выводы [10]:

- ЗРПК не обеспечил прикрытие объекта: 10 из 15 БПЛА вошли в зону ответственности ЗРПК и смогли применить свои средства поражения;
- большие углы доворота осей средств поражения ЗРПК на первые 10 БПЛА (рис. 8) привели к физической невозможности поражения этих целей;
- ЗРПК израсходовал весь свой боезапас, не выполнив поставленную задачу по прикрытию объекта.

Основной вывод – применение нескольких волн налётов групп малых и относительно дешёвых БПЛА может парализовать любую ПВО [10].

Приведенные результаты, даже с учётом многих допущений, являются достаточно убедительной демонстрацией того, что групповое применение БПЛА уже сегодня является серьёзным фактором для достижения военного превосходства малыми затратами. Дальнейшее развитие технологии группового применения БПЛА существенно усложняет условия функционирования ком-

плексов ПВО и потребует кардинального пересмотра идеологии создания систем ПВО [10].

В работе [48] приводятся оценки возможностей современных ЗРК и ЗРПК, с выводами, которые подтверждают неспособность существующих комплексов, даже специально ориентированных на противодействие БПЛА, противостоять их групповой атаке. В частности, показано, что боекомплект ЗРК Тор-М1/М2 составляют соответственно 8/16 ракет, а боекомплект ЗРПК Панцирь-С1/С2 составляет 12 ЗУР и 1400 снарядов калибра 30 мм для двух спаренных зенитных автоматов 2А38М. При этом недостатком системы управления огнем этих ЗРК Тор-М1/М2 и ЗРПК Панцирь-С1/С2 является то, что их ракеты требуют управления на всём протяжении полёта, а количество одновременно обстреливаемых целей ограничено 3-мя для ЗРПК Панцирь-С2 и 4-мя для ЗРК Тор-М2. При этом одновременно обстреливаемые цели должны находиться в зоне обзора РЛС наведения. В результате невозможна одновременная работа по целям, атакующим с разных направлений, а если учесть, что для поражения опасных или сложных целей могут потребоваться одновременно две ЗУР, то ситуация ещё более ухудшается. Данная проблема носит системный характер и увеличение боекомплекта ЗУР не будет являться выходом из ситуации, т.к. интенсивность работы ЗРК по целям все равно будет ограничена небольшим количеством каналов одновременного наведения ЗУР на цель. При этом, как отмечается в работе [49], это еще не учитываются возможности БПЛА нести аппаратуру РЭП и формировать ложные цели. В этом случае, вероятность поражения БПЛА в группе еще более снизится, а расход боеприпасов ЗРК – существенно возрастет.

Обобщая материалы данного подраздела, можно сделать вывод о том, что современные средства ПВО очень слабо приспособлены к борьбе против БПЛА, особенно малоскоростных и малоразмерных, способных осуществлять активное маневрирование и применяемых группами. Для гарантированного противодействия БПЛА требуются другие, интегральные, подходы к решению данной проблемы.

2. Предложения по повышению эффективности средств ПВО при их применении против БПЛА

Низкие значения показателей эффективности поражения малоразмерных БПЛА средствами ЗРК ПВО обуславливают необходимость разработки и проведения комплекса специальных мероприятий по организации противодействия БПЛА активными средствами, а именно [31, 50]:

- создание многофункциональной системы противодействия БПЛА, включающих в себя как разнотипные ЗРК, ЗАК, ЗРПК, ПЗРК, обладающие сравнительно высокими разведывательными и огневыми возможностями при обнаружении и стрельбе по малоразмерным целям, так и другие перспективные средства и способы борьбы с БПЛА;
- модернизацию существующих средств ПВО – ЗРК, ЗРПК и ЗАК, в интересах повышения эффективности борьбы с малоразмерными и малоскоростными воздушными целями;

- применение в составе перспективных образцов вооружения, предназначенных для противодействия БПЛА средств РЭП, ориентированных на подавление командных радиопередающих устройств (КРУ) и сигналов, наиболее распространенных спутниковых радионавигационных систем (GPS, ГЛОНАСС, BeiDou, Galileo и т.д.);
- разработку перспективных образцов вооружения, предназначенных для обнаружения и поражения именно БПЛА;
- выполнение комплекса инженерно-технических мероприятий, направленных на повышение скрытности собственных сил и средств, а также снижение эффективности применения БПЛА.

Рассмотрим эти варианты противодействия БПЛА более подробно, основываясь на материалах работ [23, 50].

2.1. Создание многофункциональной системы противодействия БПЛА

Основы создания такой системы, интегрированной в комплекс боевых задач, решаемых подразделениями сухопутных войск, представлен в работе [50].

Для ведения эффективного противодействия малоразмерным БПЛА необходимо создавать целенаправленную систему противодействия, включающую как «активную» составляющую (поражение БПЛА огнем на земле и в воздухе), так и «пассивную» (неогневую) составляющую [50].

Поражение наземной инфраструктуры, предназначенной для подготовки и проведения пусков БПЛА, а также самих образцов БПЛА на площадках их запуска, может осуществляться огнем частей и подразделений ракетных войск и артиллерии, а также ударами тактической и армейской авиации. Так как площадки подготовки и запуска малоразмерных мини-, микро- и нано БПЛА вынуждены развертываться непосредственно в прифронтовой зоне и даже на поле боя, поэтому они могут и должны разведываться и уничтожаться огнем ракетных войск и артиллерии мотострелковых (танковых) бригад из состава группировок войск первого эшелона. Потенциальные дальности досягаемости средств армейской и тактической авиации (ударных вертолетов, штурмовиков, тактических истребителей и фронтовых бомбардировщиков) вполне обеспечивают возможность надежного уничтожения подразделений подготовки и запуска БПЛА на земле со всем имеющимся арсеналом БПЛА еще до начала их боевого применения. Уничтожение БПЛА на площадках базирования также может проводиться разведывательно-диверсионными группами. Крайне важной должна быть агентурная работа по выявлению мест базирования подразделений БПЛА, их боевом и численном составе, планов боевого применения, частотных диапазонов и других технических характеристиках систем наведения и управления БПЛА. Особенную актуальность задачи поражения БПЛА на земле, обусловлена тем, что меры по уничтожению БПЛА с чрезвычайно малыми ЭПР в воздухе будут гораздо менее эффективными [50].

Реализация этих задач должна предусматриваться соответствующими планами и являться важной составной частью решения командира на боевых действиях. Для эффективного уничтожения и надежного подавления элементов

системы боевого применения БПЛА должны выделяться соответствующий ресурс огня ракетных войск и артиллерии, необходимый наряд армейской и тактической авиации, а также требуемое количество диверсионных групп.

Следующим действенным противодействием БПЛА на траекториях их полета должна стать система зенитного ракетного огня, которая может быть эффективной только при проведении ряда специальных мероприятий в интересах повышения эффективности уничтожения малоразмерных малоскоростных воздушных целей. Для успешного уничтожения этих целей в рамках единой системы ПВО должна создаваться едва ли не специальная подсистема борьбы с малоразмерными БПЛА по аналогии с подсистемами борьбы с низколетящими СВН, крылатыми ракетами ВТО и т.п. Естественно, эти подсистемы должны быть структурно и функционально взаимосвязаны в составе единой системы ПВО войсковых формирований [50].

Такая целенаправленная подсистема борьбы с БПЛА должна включать элементы систем разведки и оповещения, управления системами зенитно-ракетного и зенитно-артиллерийского огня, совокупность специализированных зенитных средств со своим ракетно-техническим обеспечением и др.

Эта подсистема должна обеспечивать [50]:

- своевременное оповещение зенитных формирований, других «заинтересованных» сил и средств о начале действий БПЛА, выдачу значений точных координат их полета, обмен разведывательной информацией между силами и средствами противодействия БПЛА;
- эффективное управление огнем зенитных формирований, выделенных для противодействия БПЛА, а также управление действиями других сил и средств, включенных в подсистему борьбы с БПЛА;
- поражение БПЛА зенитным огнем ЗРК, ЗАК, ПЗРК, ЗПРК в пределах имеющихся разведывательных и огневых возможностей;
- надежное радиоэлектронное подавление помехами каналов управления полетом БПЛА, передачи и обмена разведывательной информации и др.

Для обнаружения БПЛА необходимо назначать специализированные средства разведки, обладающие лучшими разведывательными возможностями при работе по целям со сверхмалыми ЭПР, создавать специальные каналы первоочередной передачи и обмена разведывательной информацией о полетах БПЛА. Систему разведки БПЛА должны дополнять силы и средства артиллерийской разведки, а также сеть постов визуального наблюдения, которая достаточно эффективна при обнаружении низколетящих малоразмерных целей. В состав средств визуального наблюдения таких постов необходимо включить широко-панорамные средства ОЭР круглосуточного наблюдения, способные обнаруживать малоразмерные, малоконтрастные цели [50].

Аналогичным требованиям должна соответствовать и система зенитно-ракетного и артиллерийского огня. Она должна быть тщательно спланирована с учетом особенностей рельефа местности и необходимости построения беспровальной сплошной зоны зенитного огня во всем диапазоне высот и с любых направлений полетов БПЛА [50].

Для этого необходимо [50]:

- спрогнозировать перечень наиболее вероятных маршрутов пролета и районов патрулирования БПЛА, исходя из особенностей построения боевых порядков своих группировок войск и связанных с этим боевых задач БПЛА;
- построить группировку сил и средств ПВО на местности, при этом выбрать наиболее подходящие стартовые и огневые позиции с учетом максимально возможной реализации разведывательных и огневых возможностей зенитных комплексов;
- создать систему эффективного зенитного огня применительно к задаче борьбы с малоразмерными БПЛА;
- обеспечить функционирование системы зенитного огня оперативным управлением, ракетно-техническим обеспечением и т. п.

Для ведения зенитного огня по малоразмерным БПЛА необходимо заблаговременно назначать огневые средства ПВО из числа ЗРК, ПЗРК, ЗАК, ЗПК, способных эффективно обнаруживать и обстреливать воздушные цели с малыми и сверхмалыми ЭПР. Эти зенитные средства могут объединяться во временные специализированные зенитные ракетно-артиллерийские группы, по-прежнему находясь в составе штатных подразделений и частей ПВО. Отдельные средства в составе групп таких могут действовать на отдельных наиболее вероятных (опасных) направлениях полетов БПЛА из засад и в качестве передвижных огневых установок, групп боевых машин или в составе зенитных подразделений. Это позволит достигнуть внезапности применения средств ПВО в целях эффективности поражения малоразмерных БПЛА [50].

В системе огня группировки выделенных средств ПВО должны действовать заранее разработанные указания по ведению огня и взаимодействию при организации борьбы с БПЛА. Эти указания должны определять порядок ведения разведки и обстрела БПЛА, обмена информацией между зенитными средствами о координатах полета БПЛА, результатах боевой работы, способы сосредоточения и рассредоточения огня, назначение расхода ракет (боеприпасов), а также другие вопросы применительно к специфике боевой работы по малоразмерным целям [50].

Следует отметить, что активное поражение БПЛА существующими зенитными средствами возможно лишь с большими ограничениями по обнаружению и обстрелу целей с ЭПР не менее $0,01 \text{ м}^2$. Эффективная боевая работа по целям с меньшими ЭПР современными зенитными комплексами практически невозможна ввиду упомянутых выше ограничений. Для повышения эффективности поражения малоразмерных БПЛА зенитным огнем необходима разработка специализированных систем зенитного оружия, в том числе – основанного на новых физических принципах [50].

2.2. Модернизация существующих средств ПВО

Модернизация существующих средств ПВО (например, такие как ЗРК «Тор», «Стрела-10М3», ЗПК «Панцирь-С1»), потребует существенной дора-

ботки РЛС обнаружения, а также боевых частей ЗУР и артиллерийских снарядов в части увеличения площади и плотности осколочного поля.

В большинстве случаев, повышение вероятности обнаружения малоразмерных целей РЛС в комплексах ПВО, обеспечивается за счет модернизации программного обеспечения, в частности – путем снижения скоростного порога алгоритма СДЦ. При применении такого способа «доработки» с высокой степенью вероятности РЛС комплекса будет формировать большое количество ложных целей, вызванных переотражением импульсов РЛС от неподвижных и квазиподвижных объектов – зданий, поверхности ландшафта, больших птиц и т.д.

Для решения задачи обнаружения малоразмерной цели в РЛС необходимо выполнить целый ряд противоречивых требований, а именно обеспечить [31]:

- широкий динамический диапазон приемных трактов (для отсутствия перегрузок в принимаемых сигналах);
- высокую чувствительность приемного тракта;
- высокую пространственную разрешающую способность;
- крайне низкий уровень боковых лепестков функции селекции;
- высокий темп обзора пространства;
- значительный уровень подавления фоновых отражений от зданий и поверхности.

При этом, нужно отметить, что два последних требования противоречат друг другу (требование высокого темпа обзора ограничивает время накопления сигнала). Без эффективной селекции фоновых отражений в традиционных алгоритмах обнаружения цели необходимо повышать уровень порогов обнаружения, что снижает вероятность обнаружения малоразмерных целей [51].

Другим способом повысить вероятность обнаружения малоразмерных БПЛА на приемлемой для ЗРК дальности является размещение существующих РЛС их на летно-подъемных средствах – аэростатах, дирижаблях и даже БПЛА в составе ЗРК. Расчеты, представленные в работе [52] показывают, что минимальная высота размещения РЛС, для обнаружения низколетящих целей типа БПЛА (на высоте 50 м) на дальности, приемлемой для их своевременного обнаружения, для ЗРК малой дальности составит около 200 м, для ЗРК средней дальности – около 700 м.

Успешное повышение эффективности РЛС существующих комплексов ПВО по вышеуказанным направлениям теоретически возможно, пусть и со значительными финансовыми затратами, но увеличение плотности осколочного поля существующих ЗУР существенно снизит энергетику поражающих элементов, что, в свою очередь, снизит эффективность поражения крупноразмерных целей (самолеты, вертолеты, крылатые ракеты) [31].

Применение смешанного боекомплекта, состоящего из разных типов ЗУР (штатных и измененных под задачи борьбы с малоразмерными БПЛА) снизит эффективность отражения комплексом ПВО массированных налетов средств воздушного нападения одного типа (крупная цель или малоразмерная цель). Также следует добавить, что себестоимость изготовления ЗУР с боевой частью,

адаптированной под задачи борьбы с малоразмерными БПЛА может быть существенно дороже, чем сам БПЛА [31].

В работах [49, 50] предлагается адаптировать устаревшие образцы ЗАК и зенитных установок (ЗУ), например, таких как С-60, ЗУ-23-2 и КС-19, к борьбе с БПЛА за счет оснащения их современными средствами разведки, точного целеуказания, автоматизированного управления процессами подготовки и ведения стрельбы, более мощными боеприпасами с программируемым в процессе выстрела временем подрыва, адаптивной к параметрам движения цели областью разлета поражающих элементов и т.д. Современные достижения в микроэлектронике позволяют реализовать управление темпом стрельбы вышеуказанных ЗАК и ЗУ по мере приближения воздушной цели к зенитному комплексу. На обновленные средствами разведки целей и автоматизации процессов подготовки и ведения стрельбы ЗАК и ЗУ могут устанавливаться ЗУР. Для этого на комплексах могут монтироваться ПЗРК «Игла-С», которые будут подключены к общей системе разведки и управления огнем [50].

Весьма перспективной является идея включения в состав ЗРК, оснащенных ЗУР с тепловыми ГСН, маломощных лазеров (до 1 кВт) для повышения ИК-сигнатуры малоразмерных БПЛА, то есть для их «подогрева» с целью повышения эффективности наведения ЗУР на них. Лазерные дальномеры-целеуказатели могут найти применение в автоматизированных системах обнаружения малоразмерных целей и наведения на них ЗУР. Для работы по малоразмерным целям требуется постановка на ЗУР инфракрасных взрывателей или дополнение штатных (радиолокационных) взрывателей инфракрасными (оптическими), что приведет к устранению существенного недостатка существующих ЗУР – несрабатыванию радиолокационного взрывателя из-за малых размеров цели и высокой скорости ЗУР относительно малоскоростного БПЛА [53].

2.3. Оснащение существующих комплексов ПВО средствами РЭП

Нужно отметить, что в некоторых случаях физическое уничтожение БПЛА – не самый лучший вариант. В отдельных случаях более целесообразным вариантом противодействия БПЛА является подавление его каналов управления и навигации средствами РЭП, а если подавление не привело к желаемому результату – уничтожение БПЛА.

В этом случае меры РЭП для противодействия БПЛА могут быть следующими:

- формирование заградительных помех на частотах используемых гражданскими средствами связи для управления БПЛА (типовые частоты сотовой и транкинговой связи, 3G, 4G, 5G, сети Wi-Fi, Wi-Max и т.д.) [63, 64];
- вскрытие параметров специализированных КРУ БПЛА и формирование радиоэлектронных помех прицельных по частоте и структуре сигнала КРУ (в том числе и для КРУ в режиме ППРЧ) [65];
- формирование шумовых помех прицельных по частотам наиболее распространенных спутниковых радионавигационных систем (GPS, ГЛОНАСС, BeiDou, Galileo и т.д.);

- формирование имитационных помех прицельных по частоте и структуре «открытых» каналов, наиболее распространенных спутниковых радионавигационных систем (GPS, ГЛОНАСС, BeiDou, Galileo и т.д.);

В настоящее время в качестве одного из самых перспективных направлений создания системы противодействия БПЛА рассматривается комплексирование ЗРК, ЗАК с комплексами РЭП и их последующее использование в качестве единой функциональной системы.

При противодействии БПЛА на основе совместного использования РЭП и ЗРК на комплексы РЭП возлагаются задачи:

- вскрытие средствами радио-и радиотехнической разведки (РПТР) мест дислокации ПУ БПЛА и траекторий полета БПЛА, а также параметров его КРУ;
- формирование средствами РЭП заградительной шумовой помехи для подавления КРУ БПЛА, а также навигационных каналов БПЛА;
- формирование имитирующей структурно-прицельной помехи для КРУ и для навигационного канала БПЛА в интересах перехвата управления им или навязывание БПЛА ложной траектории движения, в район их принудительной «посадки».

На ЗРК (ЗАК) возлагаются задачи:

- вскрытие РЛС комплекса факта налета БПЛА и формирование их траекторий;
- контроль результативности работы средств РЭП по изменению траекторий полета БПЛА;
- огневое поражение тех БПЛА, которые успешно преодолели воздействие средств РЭП.

При этом, при создании таких интегрированных систем необходимо решать задачи электромагнитной совместимости (ЭМС) средств РЭП, а также РЛС и радиоэлектронной аппаратуры ЗРК и ЗАК, ввиду того что средства РЭП могут негативно влиять на работу последних [31].

2.4. Разработка нового комплекса ПВО, ориентированного на противодействие именно БПЛА

Как показано в работе [31], наиболее эффективным по соотношению «стоимость – эффективность» является разработка комплекса ПВО специально ориентированного на решение задач обнаружения и поражения таких малоразмерных и малоскоростных воздушных целей, как малые БПЛА. Предложения по техническому облику такого комплекса ПВО также сформированы в работах [31, 50].

Радикальное решение проблемы борьбы с малоразмерными БПЛА возможно при создании принципиально новых средств обнаружения и комплексов поражения БПЛА. Для эффективного обнаружения БПЛА существующие РЛС должны реализовать новые режимы работы, а именно [31, 50]:

- многочастотную импульсную локацию, основанную на комбинациях зондирующих сигналов в дециметровых и сантиметровых диапазонах частот;

- маломощную сверхкороткоимпульсную локацию в X диапазоне;
- специальные методы обработки сигналов ФАР;
- пассивный и полупассивный методы пеленгации;
- новые методы широкополосной радиолокации, основанные на обработке резонансных отражений, и т. п.

Так результаты экспериментов, представленные в работе [50], показывают, что применение новых методов широкополосной радиолокации позволяет получить приращения значений ЭПР малоразмерных БПЛА, как минимум, на порядок, что объясняется тем, что различные элементы БРЭО малоразмерных БПЛА отражают сигналы широкополосной РЛС, способной обнаруживать резонансные отражения с повышенными характеристиками. В работе [54], показано, что сверхкороткоимпульсная РЛС X-диапазона, обеспечивает обнаружение малоразмерных БПЛА с ЭПР от 0,001 до 0,1 м² на дальностях 3-5 км.

В работе [55] предложено для обнаружения и сопровождения малых и легких БПЛА использование пассивного когерентного накопления сигналов, отраженных от искусственных территориально-распределенных ИРИ, например, от таких как ретрансляционные вышки, вещающие в стандарте цифрового телевидения DVB-T2. Показано, что такая пассивная система обнаружения позволяет обнаруживать малые и легкие БПЛА на дальностях от 9,5-24 км, в зависимости от типа БПЛА, выполняемых им маневров и ракурса наблюдения.

Для повышения дальностей обнаружения малоразмерных низколетящих БПЛА следует использовать различного рода вышки, аэростаты, вертолеты для размещения на них перспективных средств АР, применение которых позволит получить трехмерную «акустическую карту местности», в том числе информацию о движущихся воздушных целях. Такие средства АР способны обнаружить и определить местоположение ЛА и БПЛА с работающими двигателями с любых направлений. Соответствующие методов обработки полученных акустических сигналов, а также методы комплексирования этих данных с данными от других средств разведки позволят определить местоположение большого количества малоразмерных БПЛА, с точностью достаточной для наведение на них средств поражения [50].

Для обеспечения визуального контроля малоразмерных БПЛА и более точного наведения ЗУР в составе комплекса ПВО может быть применена оптико-электронная система слежения, имеющая в своем составе тепловизионный прибор, лазерный дальномер и сверхконтрастную камеру видимого диапазона, позволяющие получить максимальный объем информации о воздушной цели в оптическом диапазоне [31].

Для создания высокой плотности зенитного огня при стрельбе необходимо иметь скорострельные зенитные артиллерийские автоматы. Эту роль должны выполнять 4-8 зенитных стволов, размещенных на одной платформе (лафете, установке). Скорострельность зенитных автоматов должна достигать значений не менее 4000-4500 выстр./мин. Разведка малоразмерных БПЛА, обнаружение и выдача по ним точных целеуказаний должны вестись автономными РЛС и элементами системы управления зенитным огнем, желательно расположенными на отдельной платформе. Это необходимо для повышения точност-

ных характеристик целеуказания и наведения орудий на цель за счет исключения отката, дрожи, вибрации орудийного основания при выстрелах [50].

Для отражения массированных налетов БПЛА, снаряды перспективного комплекса ПВО должны обладать повышенной пробивной и разрушающей способностью за счет резкого возрастания числа поражающих элементов (около 100-150 в каждом снаряде), адаптации области их разлета в районе цели с учетом ее размеров и параметров полета. Перспективными могут оказаться снаряды с поражающими элементами в виде вольфрамовых нитей (игл, осколков, сетки-паутины и др.) [50].

Серьезной модернизации должна быть подвергнута система подрыва боевой части зенитного снаряда. При стрельбе по малоразмерным БПЛА случай прямого попадания снаряда в такую цель будет маловероятным, поэтому обычная система подрыва снаряда ударным действием должна быть заменена на бесконтактную. Снаряд должен иметь систему дистанционного подрыва, которая обеспечит срабатывание заряда в районе цели. При этом облако осколков должно формироваться с учетом размеров и параметров движения малоразмерной цели, обеспечивая ее гарантированное поражение [50].

Значительное повышение вероятности поражения цели может быть достигнуто путем автоматизации процесса введения поправок в ходе зенитной стрельбы, особенно – поправок на отклонение начальной скорости зенитного снаряда путем корректировки временных установок взрывателя. При этом на дульную часть ствола может устанавливаться устройство для измерения начальной скорости снаряда, а на самой пушке – множество температурных датчиков, которые измеряют температуру нагрева ее различных частей. Эта информация передается в ЭВМ комплекса, который рассчитывает точное время встречи снаряда с целью и определяет момент подрыва [50].

Эффективность применения разведывательной аппаратуры БПЛА можно снизить за счет применения новых зенитных артиллерийских снарядов, оснащенных неконтактными взрывателями с инфракрасными датчиками и снаряженными аэрозолем и углеводородными нитями. Такая начинка снарядов при подрыве образует облако вокруг БПЛА, затемняя оптические окна его разведывательной аппаратуры, тем самым создавая помехи каналам приема-передачи команд управления и развединформации [50].

В ближайшем будущем в арсенале комплексов ПВО должны найти свое место лазерные средства поражения воздушных целей, в том числе и малоразмерных БПЛА. Весьма перспективными представляются работы по созданию лазерных средств физического уничтожения БПЛА. Для этого необходимо решить первоочередные, неожиданно оказавшиеся сложными, задачи значительного повышения мощности лазерного генератора, а также удержания лазерного луча на корпусе малоразмерного БПЛА в полете в течение 2-5 с, позволяющих обеспечить требуемую для «прожигания» корпуса БПЛА плотность потока энергии на единицу площади [50].

Также перспективным представляется создание оружия, основанного на применении сверхвысокочастотного (СВЧ) электромагнитного излучения (ЭМИ), способного выводить из строя радиоэлектронную аппаратуру БПЛА.

Такими средствами могут быть электромагнитные пушки (установки), боевые части ЗУР и зенитные артиллерийские снаряды с излучателями мощных электромагнитных СВЧ-импульсов и т.д. [50].

3. Другие средства и способы противодействия БПЛА

3.1. Противодействие БПЛА с использованием специальных БПЛА-перехватчиков

Данный способ противодействия БПЛА является одним из наименее проработанных, однако, в перспективе – одним из наиболее перспективным.

В работе [10] в качестве платформы БПЛА-перехватчика рассматривался многофункциональный БПЛА [16], внешний вид и компоновка которого приведена на рис. 9. Целями для БПЛА-перехватчика рассматривались [10]:

- воздухоплавательная техника;
- БПЛА со скоростями полёта до 300 км/ч.

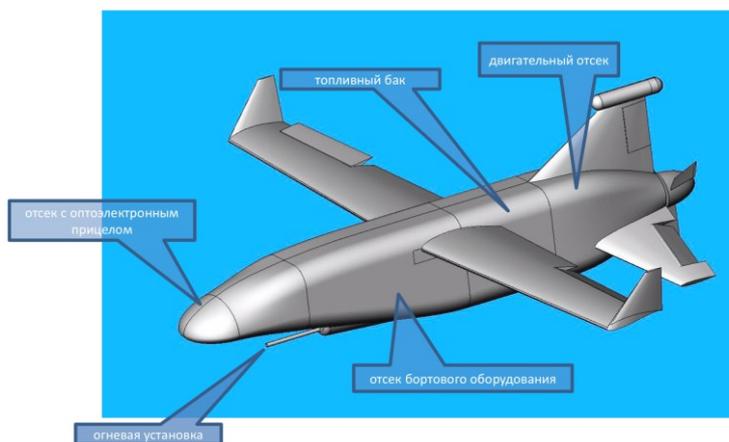


Рис. 9. Компоновка БПЛА-перехватчика (вариант) [10]

Предполагалось двухэтапное применение такого БПЛА в автоматическом и полуавтоматическом режимах. Предварительное целеуказание для БПЛА-перехватчика осуществлялось с наземного ПУ. В качестве средства поражения на БПЛА-перехватчика может быть установлена малокалиберная лёгкая гладкоствольная пушка. В качестве поражающих элементов – композитная дробь.

Результаты предварительных исследований, представленных в [10], показали приемлемый уровень боевой эффективности такого БПЛА-перехватчика при перехвате одиночных целей:

- для свободно дрейфующего воздушного шара диаметром 4 м, объемом 33,5 м³ вероятность поражения составила $P_{\text{пор}} \geq 0,7$;
- для одиночного БПЛА, маневрирующего с перегрузкой 1,5g и изменением курса («змейка») на скорости 150 км/ч вероятность поражения составила $P_{\text{пор}} \approx 0,67$.

Однако, оказалось, что применение БПЛА-перехватчика для противодействия группе из 4-х БПЛА не привело к успешному перехвату всех целей: половина перехватываемой группы БПЛА успешно выполнила свою задачу. При

этом, замена средства поражения с гладкоствольной пушки на комплект управляемых малогабаритных ракет с ГСН не привела к улучшению результата [10].

Другой вариант БПЛА-истребителя рассмотрен в работах [55, 56]. В данных работах в отсеке бортового оборудования БПЛА-перехватчика (рис. 9) предлагается разместить большое количество «пакетов» с поражающими элементами. При этом в качестве поражающих элементов могут рассматриваться:

- объемные сети или нити из высокопрочных материалов;
- иглы;
- клейкие аэрозоли;
- горючие аэрозоли.

В процессе боевого применения БПЛА-перехватчик достигает группы перехватываемых БПЛА и на маршруте их полета выбрасывает пакеты, которые самовскрываясь на определенной высоте формируют «бесполетную зону» противодействия. Количество применяемых пакетов, зависит от плотности и количества БПЛА в группе и позволяет многократно использовать БПЛА-перехватчик.

Критическим для принятия решения по продолжению дальнейших исследований явились следующие факторы [10]:

- в среднем, стоимость поражения БПЛА существенно превышает стоимость самих поражаемых БПЛА;
- низкая эффективность применения БПЛА-перехватчика против групп малогабаритных маневренных БПЛА;
- существенное усложнение структуры воинского формирования которому должен быть придан комплекс с БПЛА-перехватчиком и, как результат, утрата оперативности и мобильности этого воинского формирования;
- быстрое и резкое снижение эффективности комплексов с БПЛА-перехватчиками по мере расходования таких БПЛА из комплекта в потери.

Одним из вариантов преодоления вышеуказанных негативных факторов, по отношению к одиночным БПЛА, является создание системы из высокоинтеллектуальных БПЛА-перехватчиков патрулирующих заданный район. Как указывается в [21], компания Airspace Systems (г. Сан-Леандро, США) разработала подобную систему к которой мощные БПЛА-перехватчики, оборудованные сетью, обнаруживают, наводятся и осуществляют перехват малых «БПЛА-квадрокоптеров». Как указывает разработчик БПЛА-перехватчики могут автономно обнаруживать другой БПЛА-нарушитель на трассе своего патрулирования, самостоятельно рассчитывать и прогнозировать траекторию его полета, догонять с опережением и сбрасывать на БПЛА-нарушитель кевларовую сеть.

Примерные характеристики БПЛА-перехватчиков выстреливающих сеть в перехватываемый БПЛА приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Примерные характеристики БПЛА-перехватчиков выстреливающих сеть [57]

Параметр	БПЛА-перехватчик типа «квадрокоптер»	БПЛА-перехватчик типа «планер»	Ракета
Максимальная скорость	60 км/ч	150 км/ч	800 км/ч
Максимальная дальность	10 км	50 км	12 км
Максимальная высота цели	2 км	2 км	5 км
Точность поражения	1,8 м	1,8 м	0,2 м
Диаметр выстреливаемой сетки	10 м	10 м	2,5 м



Рис. 10. Использование БПЛА-перехватчиков оборудованных сетью [58]

В некоторых других решениях сеть не выстреливается в БПЛА-нарушитель, а постоянно закреплена снизу БПЛА-перехватчика, что позволяет ему «собирать» сеть за один вылет несколько малых «БПЛА-квадрокоптеров» (рис. 10). Именно такой способ применения БПЛА-перехватчиков использует Японская полиция для пресечения несанкционированных полетов БПЛА-квадрокоптеров при проведении массовых мероприятий [58].

3.2. Противодействие БПЛА с использованием горючих аэрозолей

При использовании против БПЛА аэрозольного облака горючего вещества оно заблаговременно распыляется на трассе полета БПЛА и впоследствии поджигается, например, путем использования трассирующих боеприпасов.

При использовании аэрозольного облака горючего вещества, роль топлива могут выполнять: окись этилена и окись пропилена, бутилнитрит и пропилнитрит, МАРР: техническая смесь метилацетилена, аллена (пропадиена) и пропана. Возможно использование смесей горючих (включая лёгкие бензины) и мелкодисперсного порошка алюминий – магниевого сплава в пропорции 10:1 [10].

Данный способ борьбы с БПЛА относительно прост, однако имеет свои недостатки, которые делают его малопригодным для практического применения [10]:

- сильная зависимость от погодных и ветровых условий;
- невозможность применения в городских условиях при проведении мероприятий антитеррористической направленности;
- невозможность селекции поражаемых воздушных целей;
- сложность управления моментом подрыва аэрозольного облака;
- сложность процесса формирования аэрозольного облака в нужном месте, в нужное время с требуемым уровнем концентрации горючего вещества;
- малый «срок жизни» аэрозольного облака;
- потенциально низкая неэффективность применения против активно маневрирующих БПЛА и т.д.

3.3. Противодействие БПЛА с использованием специальных клейких и вязких аэрозолей

Данный способ, в принципе аналогичен вышеуказанному, с той лишь разницей, что в качестве основы аэрозольного облака используются не горючие, а другие вещества:

- клейкие аэрозоли – при взаимодействии с несущими аэродинамическими поверхностями и элементами управления БПЛА прилипают к ним, изменяя их геометрическую конфигурацию и свойства обтекания воздухом, что делает БПЛА аэродинамически неустойчивым, и в конечном итоге – проводят к падению аппарата;
- вязкие аэрозоли – изменяют свойства (плотность и вязкость) воздуха в котором движется аппарат, и так же делают БПЛА аэродинамически неустойчивым, и в конечном итоге – проводят к его «сваливанию» либо «опрокидыванию».

Данному способу противодействия свойственны почти все те же недостатки, что и способу с аэрозольным облаком горючего вещества.

3.4. Противодействие БПЛА с использованием сетей

Использование сетей, улавливателей БПЛА, применяемых с Земли или с других БПЛА, в настоящее время является активно развиваемым направлением [10].

Сеть, опутав БПЛА, блокирует двигатели и элементы системы управления аппарата, лишая его возможности продолжать полет. Анализ [59] показал, что существующие наземные пусковые установки, выстреливающие сеть обес-

печивают дальность перехвата БПЛА 100-300 м, точность – порядка 0,5 м, при диаметре выстреливаемой сети от 2,5 до 10 м.

В целом, способ противодействия БПЛА за счет использования сетей является весьма эффективным, особенно в условиях городской застройки. Однако этому способу присущи некоторые недостатки, которые ограничивают его применение при ведении боевых действий или проведении специальных операций [10]:

- малая дальность применения – не более 200-300 м;
- пригодность только для малоскоростных и зависающих БПЛА;
- возможность применения только в пределах визуального наблюдения;
- сильная зависимость от погодных, и особенно ветровых, условий.

Дальнейшим развитием данного способа противодействия БПЛА может служить создание специальных боеприпасов с разделяющейся боевой частью, между элементами которой натягивается сеть диаметром 1,5 м. Основным недостатком такого способа борьбы – недостаточная дальность, ограниченная у существующих прототипов 90 м [60].

3.5. Противодействие БПЛА с использованием специально тренированных птиц

В работе [1] указывается очень «нетрадиционный» способ противодействия БПЛА. В Голландии фирма Guard обучает крупных хищных птиц перехватывать малые БПЛА нападая на них сверху в процессе их полета. Согласно информации этой компании, орлы, которые обуты в специальные щитки для защиты своих лап от вращающихся винтов БПЛА, демонстрируют 95% эффективность перехвата, что гораздо, выше, чем эффективность большого количества технических систем.

3.6. Вывод БПЛА из положения устойчивого полёта в критические условия путём накрытия спутным следом от пролетающего летающего аппарата

Способ вывода БПЛА из положения устойчивого полёта в критические условия путём накрытия его спутным следом от пролетающего ЛА (пилотируемого или беспилотного), впервые был описан в работе [10], и может быть достаточно эффективным несмотря на всю свою экзотичность.

Высокая эффективность этого способа связана с тем, что бортовые системы управления современных БПЛА не могут обеспечивать устойчивость и управляемость на критических режимах полёта. Вывод БПЛА на критические условия полёта за счёт воздействия спутным следом [61] приводит к тому, БЛА оказывается на очень больших по модулю углах атаки во вращающемся потоке воздуха.

В авиации хорошо известны случаи аварий и катастроф из-за попадания ЛА в спутный след от пролетевшего самолёта [62]. При этом, вывод ЛА из сложных условий, вызванных попаданием в спутный след представляет очень тяжёлую задачу для экипажа и автоматике она пока неподвластна.

Заключение

В статье представлены результаты систематизации и анализа различных способов и средств противодействия БПЛА основанных на огневом поражении и физическом перехвате. В основу систематизации положено более 60 открытых источников, анализ которых позволил вскрыть основные особенности БПЛА, как объекта поражения, а также провести многоаспектный подробный анализ современных комплексов ПВО и их эффективности при работе по воздушным целям такого типа. В работе обобщены предложения по повышению эффективности средств ПВО при их применении против БПЛА.

Элементом новизны работы являются выявленные общие особенности процессов обнаружения и поражения БПЛА, а также системные недостатки используемых технологических решений в комплексах ПВО, приводящие к снижению их боевой эффективности при применении против БПЛА.

Материал статьи может использоваться для формирования исходных данных для моделирования и исследования боевой эффективности комплексов ПВО при их противодействии БПЛА. Также, данная статья может быть полезна конструкторам, проектирующим системы противодействия БПЛА, а также военным специалистам при оценке параметров группы БПЛА гарантированно вскрывающих и преодолевающих зону ПВО противника при решении своих целевых задач.

Авторы выражают благодарность кандидату технических наук В.В. Росточину за предоставление им своих оригинальных авторских материалов [10-16], которые были использованы в статье и позволили глубже раскрыть отдельные аспекты проблемы противодействия БПЛА, а также за ценные советы и критические замечания, которые в значительной степени способствовали повышению качества статьи на этапе ее подготовки к публикации.

Литература

1. Michel A. H. Counter-drone systems. – Center for the Study of the Drone at Bard College, 2018. – 23 с.
2. Countering rogue drones. – FICCI Committee on Drones, EY, 2018. – 31 с.
3. de Visser E., Cohen M. S., LeGoullon M., Sert O., Freedy A., Freedy E., Weltman G., Parasuraman R. A Design Methodology for Controlling, Monitoring, and Allocating Unmanned Vehicles // Third International Conference on Human Centered Processes (HCP-2008). – 2008. – С. 1-5.
4. Sheu B. H., Chiu C. C., Lu W. T., Huang C. I., Chen W. P. Sheu B. H. et al. Development of UAV Tracing and Coordinate Detection Method Using a Dual-Axis Rotary Platform for an Anti-UAV System // Applied Sciences. 2019. Т. 9. № 13. С. 2583.
5. Kratky M., Minarik V. The non-destructive methods of fight against UAVs // 2017 International Conference on Military Technologies (ICMT). – IEEE, 2017. – С. 690-694.

6. Kim B. H., Khan D., Choi W., Kim M. Y. Real-time counter-UAV system for long distance small drones using double pan-tilt scan laser radar // Preceding SPIE 11005, Laser Radar Technology and Applications XXIV, 110050C (2 May 2019). – 2019. DOI: 10.1117/12.2520110.

7. Gaspar J., Ferreira R., Sebastião P., Souto N. Capture of UAVs Through GPS Spoofing // 2018 Global Wireless Summit (GWS). – IEEE, 2018. – С. 21-26.

8. Müller W., Reinert F., Pallmer D. Open architecture of a counter UAV system // Preceding SPIE 10651, Open Architecture/Open Business Model Net-Centric Systems and Defense Transformation 2018, 1065106 (9 May 2018). – 2018. DOI: 10.1117/12.2305606.

9. Макаренко С. И., Тимошенко А. В., Васильченко А. С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения // Системы управления, связи и безопасности. 2020. № 1. С. 109-146. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10105.

10. 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 20.05.2019).

11. Ростопчин В. В. «Напасть XXI века»: стороны одной «медали» // Авианорама. 2018. № 4. С. 12-17.

12. Ростопчин В. В. «Напасть XXI века»: стороны одной «медали» (продолжение) // Авианорама. 2018. № 5. С. 8-21.

13. Ростопчин В. В. «Напасть XXI века»: стороны одной «медали» (продолжение) // Авианорама. 2018. № 6. С. 16-23.

14. Ростопчин В. В. «Напасть XXI века»: стороны одной «медали» (продолжение) // Авианорама. 2019. № 1. С. 12-17.

15. Ростопчин В. В. «Напасть XXI века»: стороны одной «медали» (продолжение) // Авианорама. 2019. № 1. С. 28-51.

16. Дмитриев М. Л., Покровский М. В., Ростопчин В. В., Федин С. И. Возвращаемый беспилотный летательный аппарат с трехпорным шасси // Патент РФ № 2408500. 2008. – URL: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1548576482683 (дата доступа 20.05.2019).

17. Макаренко С. И. Робототехнические комплексы военного назначения - современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 2. С. 73-132. – URL: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-02/04-Makarenko.pdf> (дата доступа 16.10.2019).

18. Макаренко С. И., Иванов М. С. Сетевая война - принципы, технологии, примеры и перспективы. Монография. – СПб.: Научно-технологические технологии, 2018. – 898 с.

19. Аминов С. ПВО в борьбе в БПЛА // UAV.RU. Беспилотная авиация [Электронный ресурс]. 03.04.2012. – URL: http://www.uav.ru/articles/pvo_vs_uav.pdf (дата обращения 20.05.2019).

20. Оружие и технологии России: Энциклопедия XXI век. Том. 9. Противовоздушная и противоракетная оборона / Под общ. ред. С. Иванова. – М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2004. – 752 с.

21. В США разработали дрон-перехватчик потребительских БЛА // Роботрендс [Электронный ресурс], 27.11.2016. – URL: <http://robotrends.ru/pub/1647/v-ssha-razrabotali-dron-perehvatchik-potrebitelskih-bla> (дата доступа 20.12.2019).

22. Юферев С. «Панцирь-СМ» и его возможности // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 28.06.2019. – URL: <https://topwar.ru/159474-pancir-sm-i-ego-vozmozhnosti.html> (дата обращения 20.12.2019).

23. Рябов К. ЗРК «Сосна»: очевидные преимущества и заметные недостатки // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 20.06.2019. – URL: <https://topwar.ru/159232-zrk-sosna-ochevidnye-preimuschestva-i-zametnye-nedostatki.html> (дата обращения 20.12.2019).

24. Армия США закупает 144 боевые машины ПВО MSHORAD с РЛС израильской компании Rada // Супер-оружие [Электронный ресурс], 28.02.2019. – URL: https://super-orujie.ru/blog/43653425435/Armiya-SSHA-zakupayet-144-boevyie-mashinyi-PVO-MSHORAD-s-RLS-izrutm_referrer=mirtesen.ru?nr=1 (дата доступа 07.10.2019).

25. Multi-Mission Launcher (MML) // MDAА [Электронный ресурс], 28.02.2019. – URL: <https://missiledefenseadvocacy.org/missile-defense-systems-2/future-bmd-systems-2/multi-mission-launcher-mml/> (дата доступа 07.10.2019).

26. Американцы решили создать аналоги наших «Панцирь-С» и «Бук» // Армейский вестник [Электронный ресурс]. 14.03.2016. – URL: <https://army-news.ru/2016/03/amerikancy-reshili-sozdat-analogi-nashix-pancir-s-i-buk/> (дата обращения 20.12.2019).

27. Рябов К. Модернизация ЗРК Patriot по проекту PDB8 // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 27.08.2019. – URL: <https://topwar.ru/161729-modernizacija-zrk-patriot-po-proektu-pdb8.html> (дата обращения 20.12.2019).

28. Зенитная артиллерийская установка Centurion C-RAM: сомнительная эффективность на фоне заявлений об успехах // Военное обозрение [Электронный ресурс], 09.03.2019. – URL: <https://topwar.ru/154864-zenitnaja-artillerijskaja-ustanovka-centurion-c-ram-somnitelnaja-jeffektivnost-na-fone-zjavlenij-ob-uspehah.html> (дата доступа 20.12.2019).

29. Рябов К. Перспективный ЗРК LOWER AD. Дешёвое дополнение для «Пэтриота» // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 21.09.2019. – URL: <https://topwar.ru/162582-perspektivnyj-zrk-lower-ad-deshevoe-dopolnenie-dlja-pjetriota.html> (дата обращения 20.12.2019).

30. Еремин Г. В., Гаврилов А. Д., Назарчук И. И. Малоразмерные беспилотники – новая проблема для ПВО // Отвага [Электронный ресурс].

29.01.2015. № 6 (14). – URL: <http://otvaga2004.ru/armiya-i-vpk/armiya-i-vpk-vzglyad/malorazmernye-bespilotniki/> (дата доступа 16.10.2019).

31. Самойлов П. В., Иванов К. А. Угрозы применения малоразмерных БПЛА и определение наиболее эффективного способа борьбы с ними // Молодой ученый. 2017. № 45. С. 59-65. – URL <https://moluch.ru/archive/179/46398/> (дата обращения: 16.10.2019).

32. Аниськов Р. В., Архипова Е. В., Гордеев А. А., Пугачев А. Н. К вопросу борьбы с незаконным использованием беспилотных летательных аппаратов коммерческого типа // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2017. № 9-10 (111-112). С. 71-75.

33. Атака дронов. Хуситский удар // Военное обозрение [Электронный ресурс], 20.09.2019. – URL: <https://topwar.ru/162608-ataka-dronov-chast-1.html> (дата доступа 20.12.2019).

34. Лопаткин Д. В., Савченко А. Ю., Солоха Н. Г. К вопросу о борьбе с тактическими беспилотными летательными аппаратами // Военная мысль. 2014. № 2. С. 41-47.

35. Василин Н. Я., Гуринович А. Л. Зенитные ракетные комплексы. – Минск: ООО «Попурри», 2001. – 464 с.

36. Балаганский И. А., Мержиевский Л. А. Действие средств поражения и боеприпасов: Учебник. – Новосибирск: НГТУ, 2004. – 408 с.

37. Алешков М. Я., Жуков И. Я., Савин Н. В., Кукушкин Д. Д., Марков О. Я., Фомин Ю. Г. Физические основы ракетного оружия. – М.: Воениздат, 1972. – 312 с.

38. MANTIS Air Defence Protection System // Army Technology [Электронный ресурс]. 2013. – URL: <http://www.army-technology.com/projects/mantis/> (дата обращения 03.12.2019).

39. «Деривация-ПВО» и другие новинки калибра 57 мм // Военное обозрение [Электронный ресурс], 30.01.2018. – URL: <https://topwar.ru/134853-derivaciya-pvo-i-drugie-novinki-kalibra-57-mm.html> (дата обращения 03.12.2019).

40. Корчагин С., Терентьев С. Зенитный артиллерийский комплекс MANTIS ВВС ФРГ // Зарубежное военное обозрение. 2013. № 9. С. 59-65.

41. Романов Л. Авиабазу Хмеймим в Сирии защитила бы ЗСУ 2С38 «Деривация ПВО» // Вестник Мордовии [Электронный ресурс]. 2018. – URL: <http://vestnik-rm.ru/news-4-22623.htm> (дата обращения 09.12.2019).

42. Абросимов В. К. Групповое движение интеллектуальных летательных аппаратов в антагонистической среде. Монография. – М.: Наука, 2013. – 168 с.

43. Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустин С. Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит. 2009. – 280 с.

44. Гайдук А. Р., Капустин С. Г. Концепция построения систем коллективного управления беспилотными летательными аппаратами // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10. № 7. С. 8-16.

45. Меркулов В. И., Харьков В. П. Оптимизация иерархического управления группой БЛА // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. Т. 10. № 8. С. 61-67.

46. Верба В. С., Меркулов В. И., Харьков В. П. Оптимальное групповое управление беспилотными летательными аппаратами в сетцентрической системе // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2013. № 11. С. 48-53.

47. Жуковский И. Боевики получили дроны для терактов в любой стране // Газета.ру [Электронный ресурс]. 08.01.2018. – <https://www.gazeta.ru/army/2018/01/08/11596730.shtml> (дата доступа 20.12.2019).

48. Митрофанов А. Прорыв ПВО превышением её возможностей по перехвату целей: пути решения // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 19.04.2019. – URL: <https://topwar.ru/156999-proryv-pvo-prevysheniem-ee-vozmozhnostej-po-perehvatu-celej-puti-reshenija.html> (дата доступа 20.12.2019).

49. Тимохин А. Решение проблемы «насыщающих» атак ПВО // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 22.04.2019. – URL: <https://topwar.ru/157073-reshenie-problemy-nasyschajuschih-atak-pvo-ono-est-i-nad-nim-rabotajut.html> (дата доступа 20.12.2019).

50. Еремин Г. В., Гаврилов А. Д., Назарчук И. И. Организация системы борьбы с малоразмерными БПЛА // Арсенал Отечества. 2014. № 6 (14). – URL: <http://arsenal-otechestva.ru/new/389-antidrone> (дата доступа 11.12.2019).

51. Ананенков А. Е., Марин Д. В., Нуждин В. М., Расторгуев В. В., Соколов П. В. К вопросу о наблюдении малоразмерных беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2016. № 91. С. 19.

52. Митрофанов А. Обеспечение работы ЗРК по низколетящим целям без привлечения авиации ВВС // Военное обозрение [Электронный ресурс]. 26.04.2019. – URL: <https://topwar.ru/157292-obespechenie-raboty-zrk-po-nizkoletjaschim-celjam-bez-privlechenija-aviacii-vvs.html> (дата доступа 11.12.2019).

53. 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 / Под ред. О.В. Болховитинова. – М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. – 224 с.

54. Бугаков И. А., Сорокин А. Д., Хомяков А. В. Показатели эффективности применения группы беспилотных летательных аппаратов при решении задачи воздушной разведки в условиях противодействия противника // Известия Института инженерной физики. 2019. № 1 (51). С. 65-68.

55. Шишков С. В. Устройство - истребитель малогабаритных беспилотных летательных аппаратов // Патент на полезную модель RUS 145279 от 25.02.2014.

56. Пархоменко В. А., Устинов Е. М., Пушкин В. А., Беляков В. А., Шишков С. В. Устройство борьбы с дистанционно пилотируемыми (беспилотными) летательными аппаратами // Патент на полезную модель № 72754. 27.04.2008.

57. Изделия и комплексы противодействия беспилотным летательным аппаратам [Доклад]. – СПб.: АО «НИИ «Вектор», 2018. – 51 с.

58. В Японии полицейские дроны будут ловить хобби-дроны сетями // RoboTrends [Электронный ресурс], 12.12.2015. – URL: <http://robotrends.ru/pub/1550/v-yaponii-policyaayskie-drony-budut-lovit-hobbi-drony-setyami> (дата доступа 20.12.2019).

59. Егурнов В. О., Ильин В. В., Некрасов М. И., Сосунов В. Г. Анализ способов противодействия беспилотным летательным аппаратам для обеспечения безопасности защищаемых объектов // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 1-2 (115-116). С. 51-58.

60. Охота на беспилотник: как военные борются с гражданской угрозой с воздуха // Военное.рф [Электронный ресурс], 11.11.2018. – URL: <https://военное.рф/2018/%D0%91%D0%BF%D0%BB%D0%B029/> (дата доступа 20.12.2019).

61. Гиневский А. С., Желанников А. И. Вихревые следы самолётов. – М.: Физматлит, 2008. – 172 с.

62. Бирюков В. В. Предотвращение попадания самолётов транспортной категории в сложные пространственные положения, сваливания и вывод из них - новый подход к обучению пилотов. – Жуковский: ЛИИ имени М.М. Громова, 2016. – 34 с.

63. Макаренко С. И. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации: учебное пособие. – Ставрополь: СФ МГГУ им. М. А. Шолохова, 2008. – 352 с.

64. Макаренко С. И., Федосеев В. Е. Системы многоканальной связи. Вторичные сети и сети абонентского доступа: учебное пособие. – СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2014. – 179 с.

65. Макаренко С. И., Сапожников В. И., Захаренко Г. И., Федосеев В. Е. Системы связи: учебное пособие для студентов (курсантов) вузов. – Воронеж: ВАИУ, 2011. – 285 с.

References

1. Michel A. H. *Counter-drone systems*. Center for the Study of the Drone at Bard College, 2018. 23 p.

2. *Countering rogue drones*. FICCI Committee on Drones, EY, 2018. 31 p.

3. de Visser E., Cohen M. S., LeGoullon M., Sert O., Freedy A., Freedy E., Weltman G., Parasuraman R. A Design Methodology for Controlling, Monitoring, and Allocating Unmanned Vehicles. *Third International Conference on Human Centered Processes (HCP-2008)*, 2008, pp. 1-5.

4. Sheu B. H., Chiu C. C., Lu W. T., Huang C. I., Chen W. P. Sheu B. H. et al. Development of UAV Tracing and Coordinate Detection Method Using a Dual-Axis Rotary Platform for an Anti-UAV System. *Applied Sciences*, 2019, vol. 9, no. 13, pp. 2583.

5. Kratky M., Minarik V. The non-destructive methods of fight against UAVs. *2017 International Conference on Military Technologies (ICMT)*. IEEE, 2017, pp. 690-694.

6. Kim B. H., Khan D., Choi W., Kim M. Y. Real-time counter-UAV system for long distance small drones using double pan-tilt scan laser radar. *Preceding SPIE 11005, Laser Radar Technology and Applications XXIV, 110050C (2 May 2019)*, 2019. DOI: 10.1117/12.2520110.

7. Gaspar J., Ferreira R., Sebastião P., Souto N. Capture of UAVs Through GPS Spoofing. *2018 Global Wireless Summit (GWS)*, IEEE, 2018, pp. 21-26.

8. Müller W., Reinert F., Pallmer D. Open architecture of a counter UAV system. *Preceding SPIE 10651, Open Architecture/Open Business Model Net-Centric Systems and Defense Transformation 2018, 1065106 (9 May 2018)*. 2018. DOI: 10.1117/12.2305606.

9. Makarenko S. I., Timoshenko A. V., Vasilchenko A. S. Counter Unmanned Aerial Vehicles. Part 1. Unmanned aerial vehicle as an object of detection and destruction. *Systems of Control, Communication and Security*, 2020, no. 1, pp. 109-146. DOI: 10.24411/2410-9916-2020-10105 (in Russian).

10. Rostopchin V. V. Udarnye bespilotnye letatel'nye apparaty i protivovozdushnaja oborona – problemy i perspektivy protivostojaniya. [Strike unmanned aerial vehicles and air defense-problems and prospects of confrontation]. *Bespilotnaya aviaciya* [Unmanned aircraft], 2019. Available at: https://www.researchgate.net/publication/331772628_Udarnye_bespilotnye_letatelnye_apparaty_i_protivovozdusnaa_oborona_-_problemy_i_perspektivy_protivostojaniya (accessed 20 may 2019).

11. Rostopchin V. V. «Napast' XXI veka»: storony odnoj «medali» ["Attack of the XXI century": sides of the same medal]. *Aviapanorama*, 2018, no. 4, pp. 12-17 (in Russian).

12. Rostopchin V. V. «Napast' XXI veka»: storony odnoj «medali» ["Attack of the XXI century": sides of the same medal]. *Aviapanorama*, 2018, no. 5, pp. 8-21 (in Russian).

13. Rostopchin V. V. «Napast' XXI veka»: storony odnoj «medali» ["Attack of the XXI century": sides of the same medal]. *Aviapanorama*, 2018, no. 6, pp. 16-23 (in Russian).

14. Rostopchin V. V. «Napast' XXI veka»: storony odnoj «medali» ["Attack of the XXI century": sides of the same medal]. *Aviapanorama*, 2019, no. 1, pp. 12-17 (in Russian).

15. Rostopchin V. V. «Napast' XXI veka»: storony odnoj «medali» ["Attack of the XXI century": sides of the same medal]. *Aviapanorama*, 2019, no. 1, pp. 28-51 (in Russian).

16. Dmitriev M. L., Pokrovskij M. V., Rostopchin V. V., Fedin S. I. Vozvrashchaemyj bespilotnyj letatel'nyj apparat s trekhopornym shassi [Returnable unmanned aerial vehicle with a tricycle landing gear]. Patent Russia no. 2408500.

2008. Available at: http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1548576482683 (accessed 20 May 2019).

17. Makarenko S. I. Military Robots - the Current State and Prospects of Improvement. *Systems of Control, Communication and Security*, 2016, no. 2, pp. 73-132. Available at: <http://sccs.intelgr.com/archive/2016-02/04-Makarenko.pdf> (accessed 16 October 2019) (in Russian).

18. Makarenko S. I., Ivanov M. S. *Setecentricheskaya vojna - principy, tekhnologii, primery i perspektivy. Monografiya [Network-centric warfare - principles, technologies, examples and perspectives. Monograph]*. Saint Petersburg, Naukoemkie Tekhnologii Publ., 2018. 898 p. (in Russian).

19. Aminov S. PVO v bor'be v BPLA [Air defense in the fight in UAVs]. *Bespilotnaya aviaciya [Unmanned aircraft]*, 03.04.2012. Available at: http://www.uav.ru/articles/pvo_vs_uav.pdf (accessed 20 May 2019) (in Russian).

20. *Oruzhie i tekhnologii Rossii: Enciklopedija XXI vek. Tom. 9. Protivovozdushnaja i protivoraketnaja oborona [Weapons and technologies of Russia: encyclopedia of the XXI century. Tom. 9. Air and missile defense]*. Moscow, "Weapons and Technologies" Publishing House, 2004. 752 p. (in Russian).

21. V SSHA razrabotali dron-perehvatchik potrebitel'skih BLA [In the United States has developed a drone interceptor consumer UAVs]. *Robotrends*, 27.11.2016. Available at: <http://robotrends.ru/pub/1647/v-ssha-razrabotali-dron-perehvatchik-potrebitel'skih-bla> (accessed 20 May 2019) (in Russian).

22. Juferev S. «Pancir'-SM» i ego vozmozhnosti ["Pantsir-SM" and its capabilities]. *Voennoe obozrenie*, 28.06.2019. Available at: <https://topwar.ru/159474-pancir-sm-i-ego-vozmozhnosti.html> (accessed 20 May 2019) (in Russian).

23. Rjabov K. ZRK «Sosna»: ochevidnye preimushhestva i zametnye nedostatki ["Sosna": obvious advantages and noticeable shortcomings]. *Voennoe obozrenie*, 20.06.2019. Available at: <https://topwar.ru/159232-zrk-sosna-ochevidnye-preimushchestva-i-zametnye-nedostatki.html> (accessed 20 May 2019) (in Russian).

24. The US army buys 144 MSHORAD air defense combat vehicles from the radar of the Israeli company Rada. *Super-oruzhie [Super-weapons]*, 28.02.2019. Available at: https://super-oruzhie.ru/blog/43653425435/Armiya-SSHA-zakupayet-144-boevyie-mashinyi-PVO-MSHORAD-s-RLS-izrutm_referrer=mirtesen.ru?nr=1 (accessed 07 October 2019) (in Russian).

25. Multi-Mission Launcher (MML). MDAA, 28.02.2019. Available at: <https://missiledefenseadvocacy.org/missile-defense-systems-2/future-bmd-systems-2/multi-mission-launcher-mml/> (accessed 07 October 2019).

26. Amerikancy reshili sozdat' analogi nashih «Pancir'-S» i «Buk» [The Americans decided to create analogues of our "Pantsir-S" and "Buk"] *Armejskij vestnik [Army Bulletin]*. 14.03.2016. Available at: <https://army-news.ru/2016/03/amerikancy-reshili-sozdat-analogi-nashix-pancir-s-i-buk/> (accessed 20 December 2019).

27. Rjabov K. Modernizacija ZRK Patriot po proektu PDB8 [Modernization of the Patriot under the PDB8 project]. *Voennoe obozrenie*, 27.08.2019. Available at:

<https://topwar.ru/161729-modernizacija-zrk-patriot-po-proektu-pdb8.html> (accessed 20 December 2019).

28. Zenitnaja artillerijskaja ustanovka Centurion C-RAM: somnitel'naja jeffektivnost' na fone zajavlenij ob uspehah [Anti-aircraft artillery installation Centurion C-RAM: questionable effectiveness against the background of statements of success]. *Voennoe obozrenie*, 09.03.2019. Available at: <https://topwar.ru/154864-zenitnaja-artillerijskaja-ustanovka-centurion-c-ram-somnitelnaja-jeffektivnost-na-fone-zajavlenij-ob-uspehah.html> (accessed 20 December 2019).

29. Rjabov K. Perspektivnyj ZRK LOWER AD. Deshjovoe dopolnenie dlja «Pjetriota» [Perspective SAM LOWER AD. Cheap addition for "Patriot"]. *Voennoe obozrenie*, 21.09.2019. Available at: <https://topwar.ru/154864-zenitnaja-artillerijskaja-ustanovka-centurion-c-ram-somnitelnaja-jeffektivnost-na-fone-zajavlenij-ob-uspehah.html> (accessed 20 December 2019).

30. Eremin G. V., Gavrilov A. D., Nazarchuk I. I. Malorazmernye bespilotniki – novaya problema dlya PVO [Small-sized drones – a new problem for air defense]. *Otvaga [Courage]*, 2015, no. 6 (14). Available at: <http://otvaga2004.ru/armiya-i-vpk/armiya-i-vpk-vzglyad/malorazmernye-bespilotniki/> (accessed 16 October 2019) (in Russian).

31. Samojlov P. V., Ivanov K. A. Ugrozy primeneniya malorazmernih BPLA i opredelenie naibolee effektivnogo sposoba bor'by s nimi [Threats of using small-sized UAVs and determining the most effective way to deal with them]. *Young scientist*, 2017, no. 45, pp. 59-65. Available at: <https://moluch.ru/archive/179/46398/> (accessed 16 October 2019) (in Russian).

32. Aniskov R. V., Arkhipova E. V., Gordeev A. A., Pugachev A. N. To the issue of combating illegal use of drones commercial type. *Enginery Problems. Series 16. Anti-Terrorist Engineering Means*, 2017, vol. 111-112, no. 9-10, pp. 71-75 (in Russian).

33. Ataka dronov. Husitskij udar [Attack of the drones. Houthi strike]. *Voennoe obozrenie*, 20.09.2019. Available at: <https://topwar.ru/162608-ataka-dronov-chast-1.html> (accessed 20 December 2019) (in Russian).

34. Lopatkin D. V., Savchenko A. Ju., Soloha N. G. K voprosu o bor'be s takticheskimi bespilotnymi letatel'nymi apparatami [On the issue of fighting tactical unmanned aerial vehicles]. *Military thought*, 2014, no. 2, pp. 41-47 (in Russian).

35. Vasilin N. Ja., Gurinovich A. L. *Zenitnye raketnye kompleksy [Anti-Aircraft missile systems]*. Minsk, Popurri Publ., 2001. 464 p. (in Russian).

36. Balaganskii I. A., Merzhievskii L. A. *Deistvie sredstv porazhenija i boepripasov [Action of means of destruction and ammunition]*. Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University, 2004. 408 p. (in Russian).

37. Aleshkov M. Ja., Zhukov I. Ja., Savin N. V., Kukushkin D. D., Markov O. Ja., Fomin Ju. G. *Fizicheskie osnovy raketnogo oruzhija [Physical bases of rocket weapons]*. Moscow, Voenizdat Publ., 1972. 312 p. (in Russian).

38. NBS MANTIS Air Defence Protection System. *Army Technology*, 2013. Available at: <http://www.army-technology.com/projects/mantis/> (accessed 03 December 2019).

39. «Derivacija-PVO» i drugie novinki kalibra 57 mm ["Derivation-air defense" and other novelties of 57 mm caliber]. *Voennoe obozrenie*, 30.01.2018. Available at: <https://topwar.ru/134853-derivaciya-pvo-i-drugie-novinki-kalibra-57-mm.html> (accessed 03 December 2019) (in Russian).

40. Korchagin S., Terentev S. Zenitnyj artillerijskij kompleks MANTIS VVS FRG [Anti-Aircraft artillery complex MANTIS of the German air force]. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie*, 2013, no. 9, pp. 59-65 (in Russian).

41. Romanov L. Aviabazu Hmeimim v Sirii zashhitila by ZSU 2S38 «Derivacija PVO» [Khmeimim air Base in Syria would be protected by ZSU 2S38 "air defense Derivation"]. *Vestnik Mordovii* [*Vestnik Mordovia*], 2018. Available at: <http://vestnik-rm.ru/news-4-22623.htm> (accessed 12 December 2019).

42. Abrosimov V. K. *Grupповое dvizhenie intellektual'nykh letatel'nykh apparatov v antagonisticheskoj srede. Monografiia* [Intelligent group movement of aircraft in an antagonistic environment. Monograph]. Moscow, Nauka Publ., 2013. 168 p. (in Russian).

43. Kalyayev I. A., Gaiduk A. R., Kapustin S. G. *Modeli i algoritmy kollektivnogo upravleniia v gruppakh robotov* [Models and algorithms of collective control in groups of robots]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 280 p. (in Russian).

44. Gaiduk A. R., Kapustyan S. G. Conceptual aspects of group application of unmanned aerial vehicles. *Journal Information-measuring and Control Systems*, 2012, vol. 10, no. 7, pp. 8-16 (in Russian).

45. Kharkov V. P., Merkulov V. I. Synthesis of an algorithm of hierarchical control of UAVs group. *Journal Information-measuring and Control Systems*, 2012, vol. 10, no. 8, pp. 61-67 (in Russian).

46. Verba V. S., Merkulov V. I., Kharkov V. P. Optimal group control of unmanned aerial vehicles in a network centric system. *Informatsionno-izmeritelnye i upravlyayushchie sistemy*, 2013, no. 11, pp. 48-53. (in Russian).

47. Zhukovskij I. Boeviki poluchili drony dlja teraktov v ljuboj strane [Militants received drones for terrorist attacks in any country]. *Gazeta.ru*, 08.01.2018. Available at: <https://www.gazeta.ru/army/2018/01/08/11596730.shtml> (accessed 20 December 2019) (in Russian).

48. Mitrofanov A. Proryv PVO prevysheniem ejo vozmozhnostej po perehvatu celej: puti reshenija [Air defense Breakthrough by exceeding its capabilities to intercept targets: solutions]. *Voennoe obozrenie*, 19.04.2019. Available at: <https://topwar.ru/156999-proryv-pvo-prevysheniem-ee-vozmozhnostej-po-perehvatu-celej-puti-reshenija.html> (accessed 20 December 2019) (in Russian).

49. Timohin A. Reshenie problemy nasyschajushhих atak PVO [Solving the problem of saturating air defense attacks]. *Voennoe obozrenie*, 22.04.2019. Available at: <https://topwar.ru/157073-reshenie-problemy-nasyschajushhих-atak-pvo-ono-est-i-nad-nim-rabotajut.html> (accessed 20 December 2019) (in Russian).

50. Eremin G. V., Gavrilov A. D., Nazarchuk I. I. Organizaciya sistemy bor'by s malorazmernymi BPLA [Organization of a system for dealing with small-sized UAVs]. *Arsenal Otechestva [Arsenal of the Fatherland]*, 2014, no. 6 (14). Available at: <http://arsenal-otechestva.ru/new/389-antidrone> (accessed 11 December 2019) (in Russian).

51. Ananenko A. E., Marin D. V., Nuzhdin V. M., Rastorguev V. V., Sokolov P. V. To the question of small-sized UAVs surveillance. *Trudy MAI*, 2016, no. 91, pp. 19 (in Russian).

52. Mitrofanov A. Obespechenie raboty ZRK po nizkoletjashhim celjam bez privilechenija aviacii VVS [Ensuring the operation of SAMS for low-flying targets without involving air force aircraft]. *Voennoe obozrenie*, 26.04.2019. Available at: <https://topwar.ru/157292-obespechenie-raboty-zrk-po-nizkoletjaschim-celjam-bez-privlechenija-aviacii-vvs.html> (accessed 11 December 2019) (in Russian).

53. Arbuzov I. V., Bolhovitinov O. V., Volochaev O. V., Volnov I. I., Gostev A. V., Myshkin L. V., Habirov R. N., Shekhovcov V. L. *Boevye aviacionnye komplekсы i ih effektivnost [Combat aircraft systems and their effectiveness]*. Moscow, Air force engineering Academy named after Professor N.E. Zhukovskogo, 2008. 224 p. (in Russian).

54. Bugakov I. A., Sorokin A. D., Khomyakov A. V. Indicators of the efficiency of the application of a group of unconcessed aircraft devices at the solution of the problem of air scientification in conditions of opposition of the enemy. *Izvestiya Instituta inzhenernoy fiziki*, 2019, no. 1 (51), pp. 65-68 (in Russian).

55. Shishkov S. V. *Ustrojstvo - istrebitel' malogabaritnyh bespilotnyh letatel'nyh apparatov [Device-fighter of small-sized unmanned aerial vehicles]*. Patent of Russia no. RUS 145279, 25.02.2014 (in Russian).

56. Parhomenko V. A., Ustinov E. M., Pushkin V. A., Belyakov V. A., Shishkov S. V. *Ustrojstvo bor'by s distancionno pilotiruemyimi (bespilotnymi) letatel'nymi apparatami [Device for fighting remotely piloted (unmanned) aircraft]*. Patent of Russia no. 72754, 27.04.2008 (in Russian).

57. *Izdeliya i komplekсы protivodejstviya bespilotnym letatel'nym apparatam [Products and systems for countering unmanned aerial vehicles]*. Saint Petersburg, "Vector" research Institute, 2018. 51 p. (in Russian).

58. V Japonii policejskie drony budut lovit' hobbi-drony setjami [In Japan, police drones will catch hobby drones with nets], 12.12.2015. Available at: <http://robotrends.ru/pub/1550/v-yaponii-policyayskie-drony-budut-lovit-hobbi-drony-setyami> (accessed 11 December 2019) (in Russian).

59. Egurnov V. O., Ilyin V. V., Nekrasov M. I., Sosunov V. G. Unmanned aerial vehicles countermeasures to ensure the protected sites safety analysis. *Enginery Problems. Series 16. Anti-Terrorist Engineering Means*, 2018, no. 1-2 (115-116), pp. 51-58 (in Russian).

60. Ohota na bespilotnik: kak voennye borjutsja s grazhdanskoj ugrozoi s vozduha [Hunting for a drone: how the military is fighting the civil threat from the air]. *Voennoe.rf*, 11.11.2018. Available at:

<https://voennoe.rf/2018/%D0%91%D0%BF%D0%BB%D0%B029/> (accessed 20 December 2019) (in Russian).

61. Ginevskii A. S., Zhelannikov A. I. *Vihrevye sledy samolëtov* [*Wake Vortex of the aircraft*]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 172 p. (in Russian).

62. Birjukov V. V. *Predotvrashhenie popadanija samolëtov transportnoj kategorii v slozhnye prostranstvennye polozhenija, svalivaniya i vyvod iz nih - novyi podhod k obucheniju pilotov* [*Preventing transport category aircraft from falling into difficult spatial positions, stalling, and getting out of them is a new approach to pilot training*]. Zhukovsky, Flight research Institute named after M. M. Gromov, 2016. 34 p. (in Russian).

63. Makarenko S. I. *Computer systems, networks and telecommunication*. Stavropol, Sholokhov Moscow State University for the Humanities (Stavropol Branch) Publ., 2008, 352 p. (in Russian).

64. Makarenko S. I., Fedoseev V. E. *Multichannel communication systems. Secondary networks and subscriber access networks. Tutorial*. Saint Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy Publ., 2014, 179 p. (in Russian).

65. Makarenko S. I., Sapozhnikov V. I., Zakharenko G. I., Fedoseev V. E. *Sistemy svyazi* [*Radio Communications System*]. Voronezh, Military Aviation Engineering University, 2011. 285 p. (in Russian).

Статья поступила 30 января 2020 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). Ведущий научный сотрудник. Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН. Область научных интересов: сети и системы связи; радиоэлектронная борьба; информационное противоборство. E-mail: makserg@yandex.ru

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

Тимошенко Александр Васильевич – доктор технических наук, профессор. Заместитель генерального конструктора. АО «Радиотехнический институт им. академика А.Л. Минца». Область научных интересов: обнаружение и сопровождение воздушных целей, комплексы СПРН, вооружение и военная техника ПВО. E-mail: info@rti-mints.ru

Адрес: Россия, 127083, г. Москва, ул. 8 Марта д. 10, стр. 1.

Counter Unmanned Aerial Vehicles. Part 2. Rocket and Artillery Fire, Physical Interception

S. I. Makarenko, A.V. Timoshenko

Relevance of the research. There have been reports of unauthorized use of unmanned aerial vehicles (UAVs) in highly controlled areas (airports, military installations, against critical industrial infrastructure) in the media since the mid-2000s. Nowadays, small UAVs are widely used for unauthorized surveillance of important objects, conducting terrorist attacks and sabotage, carrying prohibited goods (weapons, drugs), as well as for military purposes. For this reason, the problem of countering UAVs, and especially small UAVs, has become extremely relevant. Analysis of publications in this area has shown a small number of serious studies on this topic. There are often too optimistic conclusions about the effectiveness of existing air defense systems for countering all types of UAVs in many papers. However, the problem of countering UAVs, and especially small UAVs, is highly complex, multi-faceted, and has not been solved yet. **The purpose of this paper** is to systematize and analyze various ways and means of countering UAVs, as well as to form general directions for effective solution of the problem. The material presented in the paper focuses on the analysis of the capabilities of air defense means to physical countering UAVs. **Results.** The results of systematization and analysis of various methods and means of countering UAVs, which are based on physical interception, are presented in the article. This systematization is based on more than 60 open sources. The analysis of the sources show the main features of the UAV as an object of destruction and made possible a detailed multi-aspect analysis of modern air defense systems, their effectiveness and disadvantage. Suggestions for improving the effectiveness of the air defense systems what are used against UAVs are also summarized in this paper. **Elements of the novelty of the paper** are the general features of the detection and destruction of UAVs as well as systemic disadvantage in technological solutions of the air defense systems which lead to a decrease in their combat effectiveness when they are used against UAVs. **The practical relevance of the research.** The material of the paper can be used to generate initial data for modeling and studying the combat effectiveness of the air defense systems when countering UAVs. This article can be useful for designers who design countering UAV systems as well.

Keywords: unmanned aerial vehicle, UAV, air defense, air defense system, Counter Unmanned Aerial Vehicles, C-UAV, C-UAS, Anti-UAV Defense System, Counter-Drone Systems, Anti-Drone Technologies, Counter-UAVs Technologies, Rocket fire, Artillery fire, combat effectiveness, detection.

Information about Authors

Sergey Ivanovich Makarenko – Dr. habil. of Engineering Sciences, Docent. Professor of Information Security Department. Saint Petersburg Electrotechnical University 'LETI'. Leading Researcher. St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences. Field of research: stability of network against the purposeful destabilizing factors; electronic warfare; information struggle. E-mail: mak-serg@yandex.ru

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

Aleksandr Vasilevich Timoshenko – Dr. habil. of Engineering Sciences, Professor. Deputy General Designer. JSC "Radio Engineering Institute named after academician A. L. Mintc". Field of research: detection and tracking of air targets, air defense systems, weapons and military equipment. E-mail: info@rti-mints.ru

Address: Russia, 127083, Moscow, 8 Marta 10/1.