

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

2.9.1 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;

2.9.4. – Управление процессами перевозок;

2.9.6 – Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники;

2.9.8 – Интеллектуальные транспортные системы

УДК 656.052.484

DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-3-8-17

Децентрализация управления беспилотным воздушным движением

А.Л. Горбунов¹

¹*Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

Аннотация: Скорость изменений в беспилотной авиации столь велика, что самые последние разработки в этой сфере устаревают, не успев пройти стадию технического проекта. Это, вероятнее всего, произойдет и с ведущимися сейчас в Российской Федерации работами по созданию систем управления беспилотным воздушным движением в рамках Национальной технологической инициативы и других госпрограмм, поскольку они нацелены на логистику доставок сравнительно крупных (десятки килограммов) грузов, тогда как главный сегодняшний вызов для беспилотного воздушного движения обусловлен тем, что доставка авиадронами мелких онлайн-покупок является ближайшим будущим массового ритейла. Это означает миллиарды воздушных доставок в год при помощи малых беспилотников, движущихся по произвольным, непредсказуемым траекториям без управления операторами, с конфликтами, в которых участвуют десятки и сотни дронов-доставщиков. Такая перспектива не согласуется с ведущимися разработками и требует концептуально новых решений. В статье предлагаются основные тезисы концепции управления беспилотным воздушным движением, учитывающей современные реалии цифрового общества, сформирована алгоритмическая основа автоматического разрешения конфликтов малых автономных авиадронов – основанный на линейном математическом программировании математический аппарат оптимального решения задачи безопасного пролета дронами зон массовых конфликтов.

Ключевые слова: управление воздушным движением, беспилотные летательные аппараты.

Для цитирования: Горбунов А.Л. Децентрализация управления беспилотным воздушным движением // Научный вестник МГТУ ГА. 2026. Т. 29, № 3. С. 8–17. DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-3-8-17

Decentralization of unmanned air traffic control

A.L. Gorbunov¹

¹*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

Abstract: The pace of change in unmanned aviation is so rapid that the latest developments in this field become obsolete before they have passed the stage of technical design. This fate is most likely to befall the work currently being carried out in the Russian Federation on the development of unmanned air traffic control systems within the framework of the National Technology Initiative and other government programs, as they are aimed at the logistics of deliveries of relatively large (of kilograms) cargoes. However, the main challenge for unmanned aviation today is that drone delivery of small online purchases is the near future of mass retail, more than 50 percent of which is already online. This means billions of aerial deliveries per year using small drones flying on arbitrary, unpredictable trajectories, unguided by operators, with conflicts involving tens or hundreds of delivery drones. This perspective is out of step with current developments and requires new conceptual solutions. The paper suggests the main theses of

the concept of unmanned air traffic control, taking into account the modern realities of the digital society. The algorithmic basis for automatic conflict resolution of small drones is formed – based on linear programming mathematical apparatus for optimal solution of the problem of safe passage of drones in areas of mass conflict.

Keywords: air traffic control, unmanned aerial vehicles.

For citation: Gorbunov, A.L. (2026). Decentralization of unmanned air traffic control. Civil Aviation High Technologies, vol. 29, no. 3, pp. 8–17. DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-3-8-17

Введение

Скорость изменений в беспилотной авиации столь велика, что самые последние разработки в этой сфере устаревают, не успев пройти стадию технического проекта, это касается и ведущихся сейчас в Российской Федерации работ по созданию систем управления беспилотным воздушным движением в рамках Национальной технологической инициативы и других госпрограмм.

Ассоциация «Аэронекст», субоператор конкурса «Аэрологистика» Фонда поддержки проектов Национальной технологической инициативы, заявила о возможности запуска в 2028 году первого регулярного маршрута беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) по доставке грузов между Санкт-Петербургом и Москвой.

Ключевой технологический момент для работы такого маршрута – система управления беспилотным воздушным движением (УБВД), позволяющая дронам автоматически уклоняться от столкновения с другими пилотируемыми или беспилотными воздушными судами (ВС), движущимися по непрогнозируемой траектории. Финальные испытания «Аэрологистики», проведенные в сентябре 2024 года, показали наличие технологий для решений этой задачи при участии в конфликте двух БПЛА. Следующим этапом «Аэронекст» видит разрешение конфликта для пяти ВС. Сходные в части уклонения от столкновений результаты показаны при испытаниях в 2024 году УБВД «Юпитер» разработки компании «Азимут» (дочерняя структура «Ростеха»). «Юпитер» вырос из «Галактики» – известной системы управления воздушным движением (УВД), используемой в качестве базового технологического решения в опытном районе применения беспилотных авиационных систем «Купол» – проекте Томского государственного универси-

тета систем управления и радиоэлектроники, реализуемом в рамках программы Минобрнауки «Приоритет-2030». Мало отличаются от отечественных в смысле возможностей разрешения конфликтов и общего направления развития зарубежные проекты УБВД, например CORUS-XUAM и PJ34 в Европейском союзе, UTM в США, Open-access UTM в Великобритании, UOMS в Китае, JUTM в Японии [1].

Тренд всех упомянутых разработок УБВД – постепенное наращивание числа участников конфликтов – представляется естественным, но отнюдь не оптимальным, не учитывающим скорость перемен в сфере беспилотной авиации. Скорость эта разительна, что убедительнейшим образом подтверждается происходящим сейчас в боевом сегменте данной сферы с появлением масс малых БПЛА. Для гражданских применений БПЛА главный грядущий вызов обусловлен тем, что доставка малыми дронами без управления операторами онлайн-покупок является ближайшим будущим массового ритейла [2], процесс уже активно пошел в странах с соответствующей ему инфраструктурой. Это означает миллиарды доставок с помощью БПЛА в год. Такая перспектива императивно предполагает необходимость решения как главной для УБВД проблемы конфликтных ситуаций с БПЛА со следующими ориентировочными параметрами:

- а) участники конфликтов – автономные самоуправляющиеся малые БПЛА (авиадроны, АД);
- б) число одновременных участников конфликтов – десятки, возможно, сотни;
- в) частота и плотность возникновения конфликтов – сотни на кубический километр в течение часа;
- г) локализация конфликтов – несколько сот метров над землей.

Нынешние системы управления воздушным движением как основа для УБВД малополезны – даже простое наблюдение воздушной обстановки в виде роев из тысяч АД (см. характерное название работы [3]) на современных плоских экранах невозможно, решение проблемы уже активно ищется в ведущих мировых центрах аэронавигации в поле технологий расширенной реальности. Невозможно прогнозирование и разрешение массовых конфликтов АД из единого центра УВД.

Как следствие, ключевым словом для УБВД ближайшего будущего будет «децентрализация» или «распределенность». Данный феномен характерен для любых систем массового обслуживания с интенсивным стохастическим трафиком, примерами могут служить интернет с распределенным управлением маршрутизацией информационных пакетов или блокчейн с распределенным управлением распределенной базой данных.

Применительно к УБВД децентрализация означает разрешение конфликтных ситуаций «на месте», со случайным присвоением роли диспетчера одному из участников конфликта (им, скорее всего, будет первый АД, обнаруживший конфликт) и автоматической передачи этой роли. Из чего вытекает необходимость оснащения всех БПЛА стандартизированным программным диспетчерским модулем (ДМ) со стандартными средствами коммуникации. Автоматическое распределенное УБВД потребует наличия в составе ДМ компоненты идентификации и определения своего пространственного положения. Уже сегодня БПЛА массой > 500 г, как правило, оснащаются модулем ADS-B, но с учетом проблем для сигналов спутниковой навигации в условиях городской застройки наверняка будет иметь место комплексирование с позиционированием по станциям мобильной связи (уже изучается в «Юпитере») и, что важнее, с автономным оптическим позиционированием.

Основные результаты настоящей статьи:

- общие принципы организации децентрализованной УБВД, ориентированной на управление массовым движением АД;
- алгоритмическая основа функциональности ДМ – математический аппарат опти-

мального решения задачи безопасного пролета АД зон массовых конфликтов с аналогичными АД.

Обзор работ

К настоящему времени в мире разработан ряд моделей разрешения конфликтов БПЛА, которые возможно задействовать в ДМ. Общие сведения по российской нормативной базе для малых БПЛА общего пользования можно найти в [4]. Элементом функциональности ДМ в простейших случаях может быть аналитическое решение с применением метода множителей Лагранжа задачи об определении точки, принадлежащей первому отрезку и располагающейся на заданном расстоянии от второго отрезка, предложенное в [5].

Близкой к специфике конфликтных ситуаций с множеством участников (хотя и не подразумевающей децентрализации управления) является модель разрешения конфликтов на пересечениях траекторий БПЛА, описанная в [6]. Авторы предлагают концепцию пространственной матрицы – «дрон-клетки», содержащей горизонтальные и вертикальные коридоры, с логикой управления, основанной на введенном понятии вектора приближения (рис. 1). Компьютерное моделирование 954 конфликтов при участии 386 БПЛА в дрон-клетке размерностью $8 \times 8 \times 8$ дало время определения действий по разрешению конфликтов 0,45 мс.

Стратегия, получившая название CONCORD, разрешает конфликты БПЛА, используя понятие коррелированного равновесия [7], которое включает возвращение БПЛА на их номинальную траекторию после отклонения. В [8] предложен алгоритм автоматизированного предотвращения конфликтов для небольших маловысотных БПЛА, обеспечивающий безопасность ВС в условиях неопределенности, основанный на марковском процессе принятия решений.

Разнообразные пространственные решетчатые структуры стали популярными среди исследователей подходами для разрешения конфликтов [9] и оптимизации траекторий БПЛА [10]. В [11] предложен итеративный геометри-

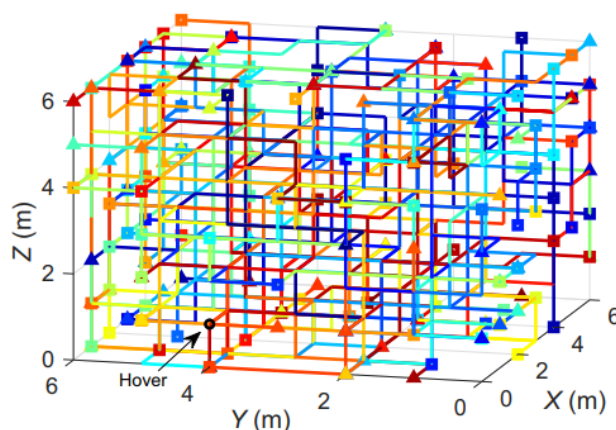


Рис. 1. Фрагмент иллюстрации из [6]: траектории 100 БПЛА с зависанием и одновременным входом в дрон-клетку размерностью $6 \times 6 \times 6$
Fig. 1. The fragment of the illustration from [6]: trajectories of 100 UAVs with hovering and simultaneous entry into a $6 \times 6 \times 6$ drone cage

ческий подход для разрешения конфликтов путем разбиения многоконфликтной задачи на более простые подзадачи. Другой геометрический подход, основанный на пространственно-временных призмах, был предложен в работе [12]. В [13] обсуждается структура представления четырехмерных траекторий на основе пространственной сетки для обнаружения конфликтов.

Выраженным недостатком существующих моделей является матричный характер пространственных структур, используемых для разрешения массовых конфликтов АД, что означает движение АД по кусочно-линейным траекториям с ортогональными смежными участками, совпадающим с заранее заданными коридорами (как показано на рис. 1). Это приводит к увеличению времени прохождения зоны разрешения конфликтов (ЗРК) по сравнению с траекторией, состоящей из произвольно ориентированных в пространстве участков. В следующем разделе предлагается аппарат нахождения траекторий такого рода, преимущество которого аналогично преимуществу зональной навигации перед традиционной навигацией УВД.

Децентрализация не новинка в исследованиях по управлению воздушным движением. Эта концепция обсуждается, к примеру, в работах [14, 15]. Но предлагаемые алгоритмы несут отпечаток наследия систем УВД для управления полетами больших авиалайнеров

с разрешением конфликтов в горизонтальной плоскости: в статье авторов из NASA [14] определяются углы поворотов при маневрах участников конфликтов, в статье [15] разрешение конфликтов предполагается осуществлять манипулированием скоростями ВС с нахождением этих скоростей при помощи нейросети. Такие подходы представляются неоптимальными для разрешения массовых конфликтов АД, поскольку они не учитывают высокую маневренность малых БПЛА.

Крайняя форма децентрализации, при которой воздушное движение роя автономных БПЛА осуществляется без какого-либо внешнего управления, представлена подходом, описанным в [16]. Авторы использовали присущую биологическим системам идею самоорганизации, оснатив каждый дрон примитивным механизмом уклонения от столкновения с движущимся в непосредственной близости другим дроном. Поставленный эксперимент с сотней таких полностью автономных БПЛА в круговом пространстве диаметром 250 м, когда каждому БПЛА случайным образом назначалась конечная точка маршрута, показал практическую работоспособность метода. Его несомненными достоинствами являются дешевизна и масштабируемость, однако вызывают серьезные сомнения возможность разрешения массовых конфликтов и эффективность в смысле времени прохода ЗРК.

Метод

Описание задачи

Формулировка: найти безопасные траектории пролета нескольких АД через ЗРК с несколькими конфликтами – точками, в которых произойдет столкновение АД при полете по траекториям, заданным до подлета к ЗРК.

Критерий оптимальности решения: минимальное время, затраченное всеми АД на пролет ЗРК с сохранением конечных точек маршрутов АД.

Условия: соблюдение безопасного интервала сближения. Траектории полета произвольные. Имеется возможность зависания АД.

Подход к решению задачи

Организацию прохождения ЗРК предлагается свести к решению задачи линейного программирования с минимизацией целевой функции – сумме времен пролета ЗРК всеми участниками конфликтов. Искомыми значениями переменных являются координаты точек перелома кусочно-линейных траекторий АД. Ограничения – безопасные интервалы сближения, которые должны соблюдаться для всех точек всех траекторий участников конфликтов. Использование линейного программирования в задачах управления БПЛА в последнее время весьма популярно среди исследователей, см., например, [17–19].

Используемые обозначения

x, y, z – линейные координаты точек на траекториях АД;

$n = 1...N, m = 1...N$ – номер АД;

R – расстояние между АД;

$i = 1...I$ – номер линейного участка кусочно-линейной траектории АД;

$k = 1...K$ – номер конфликта внутри ЗРК;

x_{nk}, y_{nk}, z_{nk} – линейные координаты АД с номерами n , участвующих в конфликтах k ;

D – полная длина траектории АД от текущего положения до конечной точки маршрута;

D_{ni} – длина i -го линейного участка кусочно-линейной траектории n -го АД;

$x_{nik}, y_{nik}, z_{nik}$ – линейные координаты точек перелома i траектории n -го АД, участвующего в конфликте k ;

S – безопасный пространственный интервал между АД;

G – целевая функция задачи линейного программирования;

V – скорость полета АД;

T – время от момента обнаружения угрозы конфликта, в течение которого конфликт состоится.

Допущения и ограничения

Скорости движения всех АД не превышают величины V и отличаются незначительно.

АД имеют возможность зависания.

Размеры АД отличаются незначительно, что обеспечивает одинаковое значение безопасного интервала S для любых пар АД.

Определение конфликта

Конфликт – нарушение АД, движущимися со скоростью V , безопасных пространственных интервалов S в течение временных интервалов T . Величина T зависит от числа конфликтов, для которых задача линейного программирования имеет решение. Произведение VT есть диаметр ЗРК в форме сферы (conflict sphere – CS).

Обнаружение и выделение ЗРК

ДМ всех АД постоянно принимают сигналы других АД, находящихся в пределах сферы CS. Сигналы АД содержат информацию об их векторах движения. ДМ определяют наличие угрозы конфликта внутри CS экстраполяцией векторов движения АД. При наличии угрозы первый АД, обнаруживший таковую, принимает на себя роль диспетчера и оповещает об этом все АД внутри и на границе CS. Это переводит все относящиеся к CS АД в режим зависания в текущем положении (с выдачей сигнала об участии в конфликте) и ожидания команд от диспетчера. Все АД обязаны выполнять команды диспетчера. ДМ диспетчера размечает вокруг каждой точки каждого конфликта внутри сферы CS вложенную сферу C_k диаметром S , очерчивающую конфликт k . При выявлении участия одного АД в нескольких конфликтах конфликты разрешаются в порядке их обнаружения, диспетчеры последующих конфликтов ожидают разрешения предыдущих, узнавая об этом по удалению сигнала об участии в предыдущем конфликте.

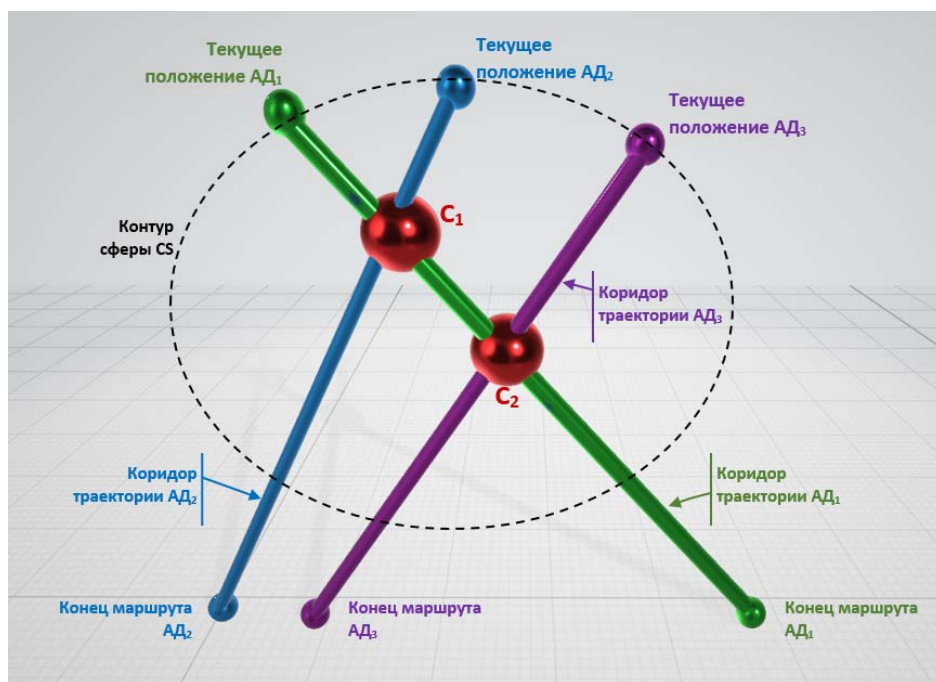


Рис. 2. Пример ЗРК в форме сферы CS с тремя авиадронами АД₁, АД₂, АД₃ и двумя конфликтами C₁ и C₂
Fig. 2. Example of a CS for sphere-shaped CRZ with three aerial drones AD₁, AD₂, AD₃ and two conflicts C₁ and C₂

Пример ЗРК в форме сферы CS с тремя авиадронами АД₁, АД₂, АД₃ и двумя конфликтами C₁ и C₂ показан на рис. 2.

Расчет траекторий пролета ЗРК

ДМ известными методами решает задачу линейного программирования для замены прямолинейных траекторий от текущего положения до конечной точки маршрута несколькими прямолинейными участками, такими, что конец каждого предыдущего участка совпадает с началом последующего, и эта точка лежит внутри сферы C_k. Искомые переменными являются x_{nik} , y_{nik} , z_{nik} – координаты точек перелома i траекторий АД с номерами n , участвующих в конфликтах k . При этом минимизируется целевая функция

$$G = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^K D_{ni}(x_{nik}, y_{nik}, z_{nik}), \quad (1)$$

где длины D_{ni} зависят от искомым координат точек начал и концов прямолинейных участков i для всех АД и всех конфликтов внутри CS; при ограничениях

$$\begin{aligned} x_{nik} &> x_{k0} - S/2 \\ x_{nik} &< x_{k0} + S/2 \\ y_{nik} &> y_{k0} - S/2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$y_{nik} < y_{k0} + S/2$$

$$z_{nik} > z_{k0} - S/2$$

$$z_{nik} < z_{k0} + S/2$$

где x_{k0} , y_{k0} , z_{k0} – координаты центра сферы C_k; и

$$R(x_{nik}, y_{nik}, z_{nik}) > S \quad (3)$$

для всех возможных пар АД, участвующих в конфликтах.

Рис. 3 демонстрирует возможный результат разрешения конфликтной ситуации, показанной на рис. 2.

Для больших N и K задача (1)–(3) может не всегда иметь решение. В таких случаях обнаруженные конфликты необходимо отранжировать по их расчетному времени и несколько раз последовательно решать задачу вида (1)–(3) для меньшего количества конфликтов, которые прогнозируются в числе первых. На время разрешения первых конфликтов участники остальных конфликтов получают команду от ДМ на зависание на границе сферы CS. Если АД-диспетчер сам является участником первых конфликтов, то по выходу из CS он передает роль диспетчера одному из оставшихся в CS АД из числа

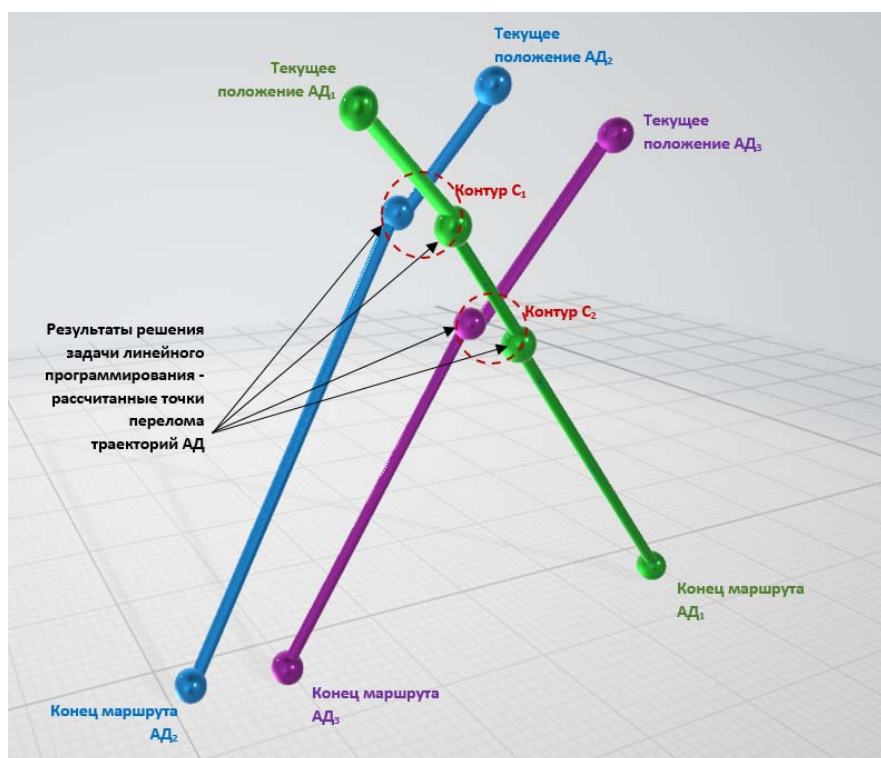


Рис. 3. Возможный вариант разрешения конфликтной ситуации, показанной на рис. 2
Fig. 3. Possible result of resolving the conflict situation shown in Figure 2

участников следующей по времени части конфликтов.

Описанный сценарий распределенного разрешения конфликтов автоматических АД в рамках будущей УБВД подразумевает, что функциональность ДМ должна включать ряд базовых функций:

1. постоянный мониторинг окружающей воздушной обстановки на предмет прогнозирования угрозы возникновения конфликтов или обнаружения дрона-диспетчера;
2. при прогнозе конфликтов – включение роли дрона-диспетчера с широкоэшелонным оповещением о данном событии и командой на зависание при подлете к границе ЗРК;
3. вычленение пространства под виртуальную структуру ЗРК для разрешения конфликтов с навигационной разметкой внутри этой структуры;
4. расчет и передача данных о безопасном прохождении ЗРК участникам конфликта;
5. передача роли дрона-диспетчера другому БПЛА после собственного выхода из ЗРК;
6. удаление виртуальной структуры ЗРК после исчезновения угроз конфликтов.

Заключение

Предложенные общие принципы организации децентрализованной системы УБВД и математический аппарат оптимального решения задачи безопасного пролета АД зон массовых конфликтов описаны эскизно, рабочая версия потребует учета большого количества деталей (вариативность БПЛА, задержки связи, ошибки позиционирования, время решения и многое другое), а также имитационного моделирования для сравнительной оценки эффективности и оптимизации предлагаемого подхода. Данный материал призван послужить толчком для плодотворной дискуссии среди заинтересованных исследователей.

Такая дискуссия представляется крайне актуальной, так как прогнозируемое огромное количество АД-доставщиков покупок сделает управление именно этим типом воздушного движения основной задачей УВД в целом. Поэтому отработка механизмов автоматического децентрализованного УБВД для малых АД очевидно приведет к замещению этими механизмами сегодняшних средств и систем управления воздушным движением сначала для ис-

пользующих дронопорты и аэродромы больших БПЛА, а затем – с необходимыми коррективами – и для всех ВС. Основания для такой перспективы – дешевизна эксплуатации автоматических решений и снижение роли человеческого фактора, являющегося основной причиной авиационных происшествий – достаточно вспомнить ошибки авиадиспетчера, приведшие к катастрофе над центром столицы США и гибели 67 человек в январе 2025 года.

Беспилотное будущее авиации вообще означает бездиспетчерность УБВД в частности. Огромная масса конфликтов БПЛА в воздухе потребует автоматического разрешения, роль авиадиспетчеров сведется к ручному управлению во внештатных ситуациях (отказы техники), что, кроме прочего, видимо, проявится в радикальном снижении потребности в авиадиспетчерах.

Список литературы

1. **Aposporis P.** A review of global and regional frameworks for the integration of an unmanned aircraft system in air traffic management [Электронный ресурс] // *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2024. Vol. 24. ID: 101064. DOI: 10.1016/j.trip.2024.101064 (дата обращения: 10.06.2025).
2. **Johnson W.** ATC in the era of advanced air mobility // *The Journal of Air Traffic Control*. 2022. Vol. 64, no. 2. Pp. 16–27.
3. **Rumba R., Nikitenko A.** The wild west of drones: a review on autonomous-UAV traffic-management // 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Greece, Athens, 2020. Pp. 1317–1322. DOI: 10.1109/ICUAS48674.2020.9214031
4. **Чмелев В.С., Калюка В.И., Дмитренко М.Е.** Обзор систем управления беспилотных летательных аппаратов общего пользования // *Технологии. Инновации. Связь: сборник материалов научно-практической конференции*. Санкт-Петербург, 19 апреля 2022 г. СПб., 2022. С. 279–286.
5. **Титков И.П., Карпунин А.А.** Выявление коллизий и определение границ безопасного сближения траекторий группы беспилотных летательных аппаратов на основе условной оптимизации // *Будущее машино-*
- строения России: сборник докладов Четырнадцатой Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. Т. 2. Москва, 21-24 сентября 2021 г. МГТУ им. Баумана, 2022. С. 196–202.
6. **Nagrare S.R., Ghose D.** Dronecage: a model for conflict resolution in aerial corridor intersections [Электронный ресурс] // *Journal of Aerospace Information Systems*. 2024. Vol. 22, no. 3. 18 p. DOI: 10.2514/1.I011473 (дата обращения: 10.06.2025).
7. **Tony L.A., Ghose D., Chakravarthy A.** Correlated-equilibrium based unmanned aerial vehicle conflict resolution [Электронный ресурс] // *Journal of Aerospace Information Systems*. 2022. Vol. 19, no. 4, pp. 283–304. DOI: 10.2514/1.I011001 (дата обращения: 10.06.2025).
8. **Ong H.Y., Kochenderfer M.J.** Markov decision process-based distributed conflict resolution for drone air traffic management [Электронный ресурс] // *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 2017. Vol. 40, no. 1. Pp. 69–80. DOI: 10.2514/1.G001822 (дата обращения: 10.06.2025).
9. **Sun Y., Li H., Tong X. и др.** A multi-unmanned aerial vehicle fast path-planning method based on non-rigid hierarchical discrete grid voxel environment modeling [Электронный ресурс] // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2023. Vol. 116. Paper 103139. DOI: 10.1016/j.jag.2022.103139 (дата обращения: 10.06.2025).
10. **Choi Y.** Multi-UAV trajectory optimization utilizing a NURBS-based terrain model for an aerial imaging mission / Y. Choi, M. Chen, S. Briceno, D. Mavris // *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2020. Vol. 97. Pp. 141–154. DOI: 10.1007/s10846-019-01027-9
11. **Acevedo J.** A geometrical approach based on 4D grids for conflict management of multiple UAVs operating in U-Space / J. Acevedo, C. Capitán, J. Capitiin, A. Castaño, A. Olle-ro // 2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Greece, Athens, 2020. Pp. 263–270. DOI: 10.1109/ICUAS48674.2020.9213929
12. **Siqi H., Cheng S., Zhang, Y.** A multi-aircraft conflict detection and resolution method for 4-dimensional trajectory-based operation // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2018. Vol. 31, no. 7. Pp. 1579–1593. DOI: 10.1016/j.cja.2018.04.017

13. Neelakandan D., Al Ali H. Enhancing trajectory-based operations for UAVs through hexagonal grid indexing: A step towards 4D integration of UTM and ATM // *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*. 2023. Vol. 10, no. 2. Pp. 5–17. DOI: 10.58940/2374-6793.1815

14. Erzberger H., Heere K. Algorithm and operational concept for resolving short-range conflicts // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*. 2010. Vol. 224, no. 2. Pp. 225–243. DOI: 10.1243/09544100JAERO546

15. Brittain M., Wei P. Autonomous air traffic controller: a deep multi-agent reinforcement learning approach [Электронный ресурс] // *Machine Learning*. 2019. 10 p. DOI: 10.48550/arXiv.1905.01303 (дата обращения: 10.06.2025).

16. Balázs B. Decentralized traffic management of autonomous drones / B. Balázs, T. Vicsek, G. Somorjai, T. Nepusz, G. Vásárhelyi // *Swarm Intelligence*. 2024. Vol. 19. Pp. 29–53. DOI: 10.1007/s11721-024-00241-y

17. Premkumar V.G.R., Scoy V.B. Optimal positioning of unmanned aerial vehicle (UAV) base stations using mixed-integer linear programming [Электронный ресурс] // *Drones*. 2025. Vol. 9, iss. 1. ID: 44. DOI: 10.3390/drones9010044 (дата обращения: 10.06.2025).

18. Chen Z. Probability-constrained path planning for UAV logistics using mixed integer linear programming / Z. Chen, S. Wang, K. Chen, X. Zhang [Электронный ресурс] // *Modelling*. 2025. Vol. 6, iss. 3. ID: 82. DOI: 10.3390/modelling6030082 (дата обращения: 08.10.2025).

19. Li J. Integrating charging station location and delivery UAV route by a cascade optimization framework / J. Li, X. Ni, M. Hua, Q. Wang, M. Xu, F. Zhu // *2025 IEEE International Mediterranean Conference on Communications and Networking (MeditCom)*. France, Nice, 2025. Pp. 47–52. DOI: 10.1109/MeditCom64437.2025.11104427

References

1. Aposporis, P. (2024). A review of global and regional frameworks for the integration of an unmanned aircraft system in air traffic man-

agement. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, vol. 24. ID: 101064. DOI: 10.1016/j.trip.2024.101064 (accessed: 10.06.2025).

2. Johnson, W. (2022). ATC in the era of advanced air mobility. *The Journal of Air Traffic Control*, vol. 64, no. 2, pp. 16–27.

3. Rumba, R., Nikitenko, A. (2020). The wild west of drones: a review on autonomous-UAV traffic-management. In: *2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, Athens, Greece, pp. 1317–1322. DOI: 10.1109/ICUAS48674.2020.9214031

4. Chmelev, V.S., Kalyuka, V.I., Dmitrenko, M.E. (2022). Overview of control systems unmanned aerial apparatus for general use. In: *Tekhnologii. Innovatsii. Svyaz: sborniki materialov nauchno-prakticheskoy konferentsii*. St. Petersburg, pp. 279–286. (in Russian)

5. Titkov, I.P., Karpunin, A.A. (2022). Detection of conflicts and determination of safe separation boundaries for trajectories of a group of unmanned aerial vehicles based on conditional optimization. In: *Budushcheye mashinostroyeniya Rossii: sbornik dokladov Chetyrnadtsatoy Vserossiyskoy konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov*, vol. 2. Moscow: MGTU GA im. N.E. Bauman, pp. 196–202. (in Russian)

6. Nagrare, S.R., Ghose, D. (2024). Droneage: a model for conflict resolution in aerial corridor intersections. *Journal of Aerospace Information Systems*, vol. 22, no. 3, 18 p. DOI: 10.2514/1.I011473 (accessed: 10.06.2025).

7. Tony, L.A., Ghose, D., Chakravarthy, A. (2022). Correlated-equilibrium based unmanned aerial vehicle conflict resolution. *Journal of Aerospace Information Systems*, vol. 19, no. 4, pp. 283–304. DOI: 10.2514/1.I011001 (accessed: 10.06.2025).

8. Ong, H.Y., Kochenderfer, M.J. (2017). Markov decision process-based distributed conflict resolution for drone air traffic management. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 40, no. 1, pp. 69–80. DOI: 10.2514/1.G001822 (accessed: 10.06.2025).

9. Sun, Y., Li, H., Tong, X. et al. (2023). A multi-unmanned aerial vehicle fast path-planning method based on non-rigid hierarchical discrete grid voxel environment modeling. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 116, Paper 103139.

DOI: 10.1016/j.jag.2022.103139 (accessed: 10.06.2025).

10. Choi, Y., Chen, M., Briceno, S., Mavris, D. (2020). Multi-UAV trajectory optimization utilizing a NURBS-based terrain model for an aerial imaging mission. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, vol. 97, pp. 141–154. DOI: 10.1007/s10846-019-01027-9

11. Acevedo, J., Capitán, C., Capitán, J., Castaño, A., Ollero, A. (2020). A geometrical approach based on 4D grids for conflict management of multiple UAVs operating in U-Space. In: *2020 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*. Athens, Greece, pp. 263–270. DOI: 10.1109/ICUAS48674.2020.9213929

12. Siqi, H., Cheng, S., Zhang, Y. (2018). A multi-aircraft conflict detection and resolution method for 4-dimensional trajectory-based operation. *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 31, no. 7, pp. 1579–1593. DOI: 10.1016/j.cja.2018.04.017

13. Neelakandan, D., Al Ali, H. (2023). Enhancing trajectory-based operations for UAVs through hexagonal grid indexing: A step towards 4D integration of UTM and ATM. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*, vol. 10, no. 2, pp. 5–17. DOI: 10.58940/2374-6793.1815

14. Erzberger, H., Heere, K. (2010). Algorithm and operational concept for resolving short-range conflicts. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal*

of Aerospace Engineering, vol. 224, no. 2, pp. 225–243. DOI: 10.1243/09544100JAERO546

15. Brittain, M., Wei, P. (2019). Autonomous air traffic controller: a deep multi-agent reinforcement learning approach. *Machine Learning*, 10 p. DOI: 10.48550/arXiv.1905.01303 (accessed: 10.06.2025).

16. Balázs, B., Vicsek, T., Somorjai, G., Nepusz, T., Vásárhelyi, G. (2024). Decentralized traffic management of autonomous drones. *Swarm Intelligence*, vol. 19, pp. 29–53. DOI: 10.1007/s11721-024-00241-y

17. Premkumar, V.G.R., Scoy, V.B. (2025). Optimal positioning of unmanned aerial vehicle (UAV) base stations using mixed-integer linear programming. *Drones*, vol. 9, issue 1, ID: 44. DOI: 10.3390/drones9010044 (accessed: 10.06.2025).

18. Chen, Z., Wang, S., Chen, K., Zhang, X. (2025). Probability-constrained path planning for UAV logistics using mixed integer linear programming. *Modelling*, vol. 6, issue 3. ID: 82. DOI: 10.3390/modelling6030082 (accessed: 08.10.2025).

19. Li, J., Ni, X., Hua, M., Wang, Q., Xu, M., Zhu, F. (2025). Integrating charging station location and delivery UAV route by a cascade optimization framework. In: *2025 IEEE International Mediterranean Conference on Communications and Networking (MeditCom)*, France, Nice, pp. 47–52. DOI: 10.1109/MeditCom64437.2025.11104427

Information about the author

Andrey L. Gorbunov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, a.gorbunov@mstuca.ru.

Сведения об авторе

Горбунов Андрей Леонидович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления воздушным движением МГТУ ГА, a.gorbunov@mstuca.ru.

Поступила в редакцию 08.09.2025
Одобрена после рецензирования 02.12.2025
Принята в печать 21.05.2026

Received 08.09.2025
Approved after reviewing 02.12.2025
Accepted for publication 21.05.2026