

На правах рукописи  
УДК629.7.076:519.863

**Фам Суан Куен**

**МЕТОДИКА ПЛАНИРОВАНИЯ ПОЛЕТА ЛЕГКОГО  
БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА**

Специальность 05.13.01  
Системный анализ, управление и обработка информации  
(Авиационная и ракетно-космическая техника)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

МОСКВА

2013

Работа выполнена на кафедре «Системный анализ и управление» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет, МАИ)»

Научный руководитель: Моисеев Дмитрий Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Системный анализ и управление» Московского авиационного института (национального исследовательского университета, МАИ)

Официальные оппоненты: Инсаров Вильям Викторович, доктор технических наук, профессор, академик РАЕН, начальник лаборатории Государственного научно-исследовательского института авиационных систем, зав. кафедрой Московского института повышения квалификации работников образования

Ким Николай Владимирович, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры «Информационно-управляющие комплексы» Московского авиационного института (национального исследовательского университета, МАИ)

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение имени С.А. Лавочкина», (ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», 141400, г. Химки, Московская область, ул. Ленинградская, д. 24).

Защита состоится «13» июня 2013 г. в 13-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.12 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете, МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета, МАИ) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

Автореферат разослан «08» мая 2013 г.

Отзывы, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4, Ученый Совет МАИ

Ученый секретарь диссертационного совета  
Д 212.125.12, к.т.н., доцент

В.В.Дарнопых

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы работы

В настоящее время беспилотные авиационные комплексы (БАК), системообразующим элементом которых являются беспилотные летательные аппараты (БЛА), относятся к одной из наиболее динамично развивающихся областей авиационной техники и широко используются в решении различных хозяйственных задач. Большое внимание уделяется использованию беспилотной авиации при чрезвычайных ситуациях, стихийных бедствиях, а также для обеспечения телекоммуникаций, метеорологических измерений, мониторинга трубопроводов, патрулирования границ, решении других задач гражданского назначения. Это обусловлено тем, что БЛА гораздо дешевле пилотируемых самолетов, проще в обслуживании, кроме того, они могут применяться в ситуациях, угрожающих жизни пилота.

Разработка и применение БЛА требует решения ряда специфических задач. Одной из них является задача автоматического управления полетом и, в частности, задача априорного планирования маршрута полета БЛА.

Специфика задачи априорного планирования маршрута полета легкого БЛА связана с необходимостью учета информации о ветре в зоне полета. Существующие на сегодняшний день подходы к решению этой задачи предполагают использование прогноза значений параметров ветра в зоне полета. Однако на практике возможности получения такого прогноза ограничены. Данная ситуация определяет необходимость нового подхода к априорному планированию маршрута полета легких БЛА, предусматривающего учет имеющейся статистической информации о состоянии ветра в зоне полета, или учет при маршрутизации неопределенности значений параметров ветра в зоне полета.

Таким образом, диссертационная работа посвящена решению актуальной технической задачи разработки методики априорного планирования маршрута полета легкого БЛА при отсутствии прогноза состояния ветра в зоне полета.

К настоящему времени, несмотря на определенные успехи, достигнутые в рассмотрении указанных вопросов, остаются нерешенными еще ряд проблем. Это, в частности, вопросы, связанные со свойствами замкнутого маршрута облета, свойствами областей постоянства решений задачи маршрутизации, учетом при маршрутизации статистической информации о ветре в зоне полета, получением вероятностных оценок целесообразности учета ветра при составлении маршрута в зависимости от воздушной скорости БЛА.

Таким образом, исследование указанных нерешенных вопросов является актуальным и практически значимым как путь к повышению эффективности планирования полета легких БЛА.

**Объект исследования.** В диссертационной работе в качестве объекта исследования рассмотрены легкие беспилотные летательные аппараты.

**Предмет исследования.** Методика планирования полета легкого БЛА является предметом исследования данной диссертационной работы.

**Целью работы** является повышение эффективности целевого функционирования легкого БЛА путем априорного планирования замкнутого

маршрута наискорейшего облета набора точек, местоположение которых задано, в ситуациях, когда о значении параметров ветра в зоне полета имеется статистическая информация, или известны диапазоны возможных значений параметров ветра.

Для достижения поставленной цели решены следующие научно-технические задачи:

- Исследованы свойства замкнутых маршрутов облета точек в поле постоянного ветра;
- Предложена процедура параметрического анализа решений задачи оптимальной маршрутизации и исследованы свойства множеств оптимальных маршрутов облета точек с заданным местоположением;
- Разработана методика планирования полета легкого БЛА по замкнутому маршруту при наличии интервальной неопределенности значений параметров ветра в зоне полета;
- Разработана методика планирования полета легкого БЛА по замкнутому маршруту с учетом статистических данных о значениях параметров ветра в зоне полета;
- Предложена методика вероятностной оценки целесообразности учета ветра в зоне полета при решении задачи предполетной маршрутизации в зависимости от воздушной скорости БЛА.

**Методы исследования.** В диссертационной работе основными методами исследования являются методы целочисленного математического программирования, теории вероятностей и математической статистики, теории оптимальных систем, а также принятия решений в условиях неопределенности.

**Научная новизна результатов** диссертационной работы заключается в следующем:

1. Сформулированы и доказаны свойства замкнутых маршрутов облета точек в поле постоянного ветра. Указанные свойства позволяют понять «физику» влияния постоянного ветра на результаты решения задач маршрутизации, а также используются в дальнейшем при разработке процедур решения задач маршрутизации и снижения объема расчетов при их вычислительной реализации.

2. Предложена и алгоритмически реализована процедура параметрического анализа решений задачи маршрутизации, позволяющая определить множество потенциально наискорейших замкнутых маршрутов облета и соответствующих им множеств значений параметров ветра.

3. Проведен анализ влияния воздушной скорости БЛА, расположения и количества точек, связываемых маршрутом, на характеристики и свойства множества потенциально наискорейших замкнутых маршрутов облета и соответствующих им множеств значений параметров ветра.

4. Разработана методика планирования полета легкого БЛА по замкнутому маршруту с учетом статистических данных о значениях параметров ветра в зоне полета.

5. Предложена методика нахождения наискорейшего замкнутого маршрута облета точек в условиях неопределенности значений параметров ветра в зоне полета. Фактически определяются гарантирующие оценки длительности полета и

обеспечивающий их маршрут облета в условиях учета интервальной неопределенности параметров ветра в зоне полета.

6. Введено в рассмотрение понятие пороговой скорости ветра, начиная с которой целесообразен учет ветра при решении задачи маршрутизации. Установлена качественная связь между пороговой скоростью ветра и воздушной скоростью БЛА. Предложена процедура вычисления вероятности, с которой фактическая скорость ветра не будет превосходить пороговую. Таким образом, фактически, по вероятности оценивается целесообразность учета ветра при решении задачи маршрутизации.

**Практическая значимость результатов исследования.** Результаты, полученные в диссертационной работе, могут использоваться для предполетного планирования маршрута полета БЛА, а также для оценки эффективности как уже созданных, так и разрабатываемых легких БЛА. В частности, разработанные методики, алгоритмы и программно-моделирующий комплекс могут использоваться для:

1. Предполетного планирования маршрутов облета заданных точек с учетом статистической информации о ветре в зоне полета, что обеспечит экономию энергетических ресурсов аппарата и повысит оперативность решения целевой задачи.

2. Расчета гарантированной оценки длительности облета совокупности заданных точек в целях снижения риска потери аппарата из-за непредвиденного перерасхода энергетических ресурсов аппарата.

Результаты диссертационной работы внедрены и используются в учебном процессе кафедры «Системный анализ и управление» МАИ. По материалам и результатам проведенных при выполнении диссертационной работы исследований подготовлено учебно-методическое пособие «Планирование полета легких беспилотных ЛА: Методические разработки для проведения групповых практических занятий магистров по дисциплине «Научный семинар по динамике полета и управлению аэрокосмическими системами». - М.: Кафедра 604 МАИ, 2012. Данное пособие предназначено для обучения магистров по профилю «Динамика полета и управление аэрокосмическими системами» в рамках направления 161700 «Баллистика и гидроаэродинамика».

**Достоверность и обоснованность** научных положений и полученных результатов обеспечивается корректным использованием математических методов, а также четкой формулировкой допущений и условий, в рамках которых проводились расчеты и были получены основные результаты.

#### **Основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту.**

1. Сформулированные и доказанные свойства замкнутых маршрутов облета точек в поле постоянного ветра.

2. Методика нахождения наискорейшего замкнутого маршрута облета точек в условиях неопределенности значений параметров ветра в зоне полета.

3. Методика планирования полета легкого летательного аппарата по замкнутому маршруту с учетом статистических данных о ветре в зоне полета.

4. Понятие и методика расчета величины скорости ветра, определяющей по вероятности целесообразность учета ветра при решении задачи маршрутизации.

**Апробация работы и публикации.** Результаты диссертационной работы докладывались и получили одобрение на:

- Научных семинарах кафедры «Системный анализ и управление» Московского авиационного института;

- 10-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика -2011» (г. Москва, МАИ, 8-10 ноября 2011г.);

- 17-ой Международной конференции "Системный анализ, управление и навигация» (Украина, г. Евпатория (Крым), с 1 по 8 июля 2012 г);

- 11-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика -2012» (г. Москва, МАИ, 13-14 ноября 2012г).

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в двух статьях [1,2] в журналах, входящих в рекомендованный ВАКом Минобрнауки России перечень изданий, и в трех работах [3-5] в сборниках тезисов докладов на научно-технических конференциях.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 98 наименований. Текст диссертации изложен на 155 машинописных страницах, включает 55 рисунков и 52 таблицы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения диссертационной работы, выносимые на защиту, а также сведения об апробации результатов диссертационной работы. Дан обзор основных публикаций, посвященных различным аспектам предполетного формирования маршрута полета БЛА. Описана структура диссертационной работы и дано краткое содержание ее разделов.

**В первой главе** отмечено, что одним из этапов подготовки полета, существенно влияющих на эффективность применения БЛА, является построение программы полета. Такая программа вводится на борт аппарата перед стартом и предусматривает выполнение координатного графика полета. Расположение точек на земной поверхности, над которыми аппарат должен пройти в процессе полета, обусловлено целевой задачей, решаемой в процессе данного полета. С точки зрения построения программы полета наибольший интерес представляет ситуация, когда по условию целевой задачи допустимы различные варианты маршрутов облета заданных точек. При этом обычным требованием является то, что связать определенный набор точек на земной поверхности надо замкнутым маршрутом облета. Естественно, что каждая точка включается в маршрут только один раз. Задача составления маршрута, как последовательности облета точек, при условии посещения каждой точки только один раз, интерпретирована как задача коммивояжера. При этом критерием является продолжительность облета всех заданных точек.

Описан класс аппаратов, для которых разработана методика планирования полета. Эти аппараты в дальнейшем называются легкими. По своим летно-техническим характеристикам они входят в группы микро, мини и легких БЛА малого радиуса действия. Воздушная скорость легких аппаратов составляет  $65 - 100 \text{ км / час}$ , продолжительность полета не более 1 – 3 часов и дальность действия несколько десятков километров. Принципиальной особенностью летно-технических характеристик легких аппаратов является, во-первых, то, что их воздушная скорость сопоставима с возможными скоростями ветра в зоне полета. Например, БЛА «Gatewing X100», имея крейсерскую воздушную скорость порядка  $75 \text{ км / час}$ , допускает эксплуатацию при скорости ветра до  $65 \text{ км / час}$ . Во-вторых, дальности и

время полета позволяют говорить о сравнительно небольших зонах и длительностях полета легких аппаратов. В пределах таких зон и продолжительностей полета вполне допустимо пренебречь временной и пространственной изменчивостью значений параметров постоянной составляющей ветра. Другими словами, при решении задачи маршрутизации справедливо считать направление ветра, задаваемое в связанной с поверхностью земли системе координат углом  $\lambda$ , и скорость ветра  $V_B$  в зоне полета постоянными.

Маршрут облета заданных точек в поле постоянного ветра находится в результате решения замкнутой задачи коммивояжера. Элементами несимметричной исходной матрицы коммивояжера являются продолжительности полета БЛА между всеми заданными точками. Соотношения для расчета продолжительности полета  $t_{AB}(\vec{V}_B)$  между парой точек  $A$  и  $B$  в условиях действия постоянного ветра с параметрами  $\vec{V}_B^T = (V_B \ \lambda)^T$  были получены в предположении об идеальной работе автопилота, обеспечивающего в условиях действия постоянного ветра удержание аппарата на требуемом курсе. При этом вектор путевой скорости в каждый момент времени совпадает с требуемым направлением полета.

Математическая формулировка задачи маршрутизации полета как задачи коммивояжера в комбинаторной постановке сводится к отысканию маршрута облета  $m^* \in M_{don}$  заданных на земной поверхности точек, для которого время облета  $t(m, \vec{V}_B)$  минимально при условии, что  $m \in M_{don}$ . Допустимое множество маршрутов  $M_{don}$  включает в себя только те маршруты, которые удовлетворяют условиям однократности облета каждой точки и отсутствия в маршруте подциклов. Решение  $m^*(\vec{V}_B)$  задачи

$$m^*(\vec{V}_B) = \arg \min_{m \in M_{don}} t(m, \vec{V}_B) \quad (1)$$

зависит от значений параметров ветра. Продолжительность полета по оптимальному маршруту

$$t^{\min}(\vec{V}_B) = \min_{m \in M_{don}} t(m, \vec{V}_B) = t(m^*, \vec{V}_B) \quad (2)$$

также является функцией параметров ветра.

Необходимые расчеты при решении задач нахождения оптимального маршрута полета проводились с помощью программы `bintprog`, входящей в состав пакета математического моделирования MATLAB и реализующей алгоритм «ветвей и границ».

На примерах составления маршрутов облета было продемонстрировано существенное влияние ветра в зоне полета на вид оптимального маршрута. В частности, на рисунках 1 и 2 показано, что изменение направления ветра с Южного на Юго-Западное приводит к изменению оптимального маршрута облета между точками 14, 1, 15, 3, а также точками 5, 7, 8, 6.

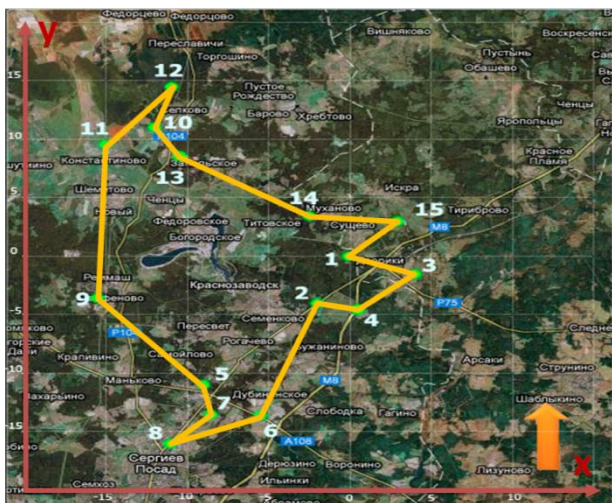


Рис.1. Оптимальный маршрут облета при Южном ветре

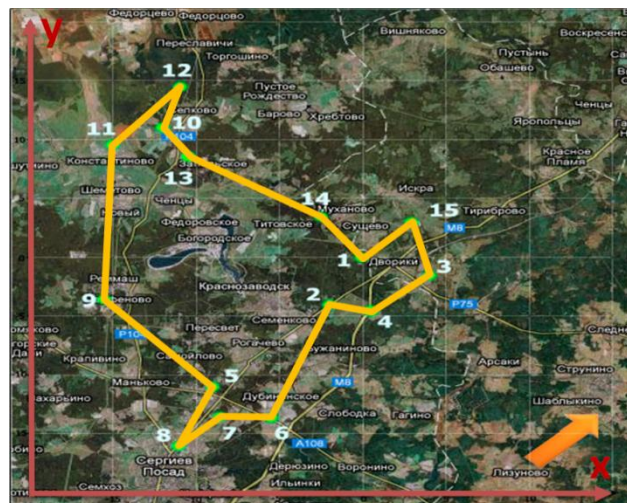


Рис.2. Оптимальный маршрут облета при Юго-Западном ветре

Показано также, что выигрыш по времени облета для одного и того же набора точек может достигать на оптимальном маршруте 15 – 20%.

**Во второй главе** сформулированы и доказаны некоторые свойства замкнутых маршрутов облета точек с известным местоположением в условиях воздействия на летательный аппарат постоянного по направлению и скорости ветра.

**Свойство 1.** Если  $S$  - протяженность маршрута облета, а  $V_{ЛА}$  - воздушная скорость БЛА, то время полета по замкнутому маршруту при отличной от нуля скорости ветра независимо от его направления окажется больше чем  $S / V_{ЛА}$ .

**Свойство 2.** При любой скорости и направлении ветра время полета по замкнутому маршруту “по” и “против” часовой стрелки одинаково.

**Свойство 3.** Время облета замкнутого маршрута при диаметрально противоположных направлениях ветра одинаково.

Перечисленные свойства были доказаны и в дальнейшем использованы при построении методик планирования полета и снижения связанных с этим вычислительных затрат.

Во второй главе был также проведен качественный анализ влияния направления и скорости постоянного ветра на результаты решения задачи маршрутизации при заданном наборе точек. С этой целью была разработана процедура параметрического анализа оптимальных маршрутов облета. При вычислительной реализации указанной процедуры непрерывное множество значений параметров ветра  $\phi$  было аппроксимировано дискретным множеством  $N$  допустимых пар значений вектора ветра  $\vec{V}_B$ . Результаты параметрического анализа было предложено представлять графически. Для этого на плоскости, каждая точка которой соответствует паре определенных значений параметров ветра, строятся области значений параметров ветра, для которых оптимальным является один и тот же маршрут облета.

Простейший пример иллюстрирует идею параметрического анализа решений задачи оптимальной маршрутизации и соответствующего графического представления получаемых результатов. Четыре точки могут быть связаны замкнутыми маршрутами трех разных конфигураций, показанными на рис.3. Для наглядности каждому маршруту ставится в соответствие свой цвет. Множество возможных в принципе



значений параметров ветра  $H$  оказывается разбитым на подмножества  $\theta_1$ ,  $\theta_2 = \theta_{21} \cup \theta_{22}$  и  $\theta_3 = \theta_{31} \cup \theta_{32}$ , так, что каждому подмножеству  $\theta_i$  соответствует свой оптимальный маршрут облета  $m_i$ . На рис.4 перечисленные подмножества изображены в виде областей значений параметров ветра, которым соответствуют определенные оптимальные маршруты облета заданных точек. Эти области значений параметров ветра можно трактовать как области постоянства, или устойчивости решений задачи маршрутизации.

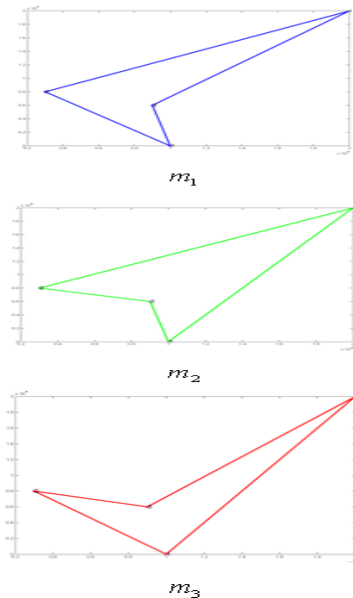


Рис.3. Маршруты облета четырех точек

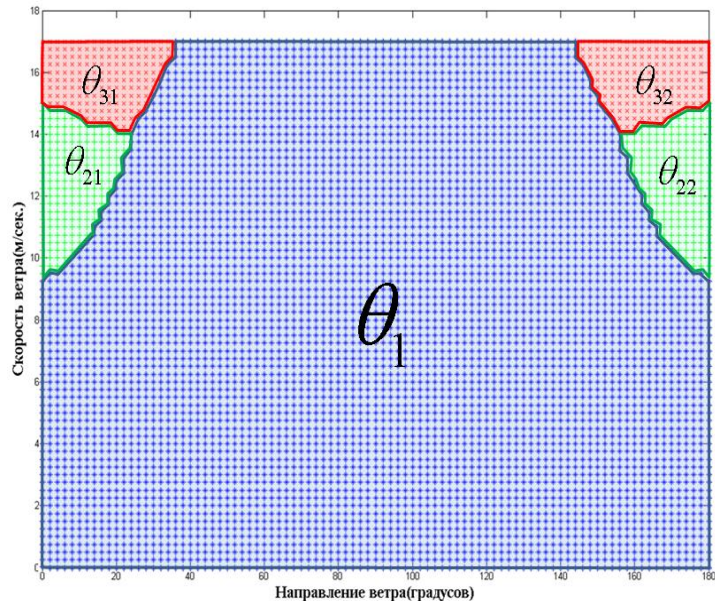


Рис.4. Подобласти постоянства решений задачи маршрутизации для четырех точек

Фактически, для построения подобластей постоянства оптимальных маршрутов, необходимо решить задачу оптимальной маршрутизации (1) для всех пар значений параметров ветра принадлежащих множеству  $H$ . Результаты расчета согласно (2) минимальных продолжительностей облета заданных точек в зависимости от значений параметров ветра представлены на рис.5. Можно сказать, что маршруты  $m_1, m_2, m_3$  образуют множество  $M$  потенциально оптимальных маршрутов облета. Другими словами, все маршруты, которые при каких-либо возможных значениях параметров ветра окажутся оптимальными, образуют множество  $M$ .

Исследование множеств оптимальных решений для задач маршрутизации с различными исходными данными позволило выявить ряд свойств этих множеств.

1. Двум точкам множества возможных значений параметров ветра  $\phi$ , соответствующим диаметрально противоположным направлениям ветра одинаковой скорости, будут соответствовать одинаковые оптимальные маршруты и значения функции  $t^{\min}$ , что иллюстрирует зависимость, приведенная на рис.5.

2. Количество потенциально оптимальных маршрутов облета фиксированного набора точек существенно меньше количества в принципе возможных маршрутов облета этих точек. Сравнение мощности множества  $M$  с количеством в принципе возможных вариантов облета приведено в таблице 1.

Количество точек (n)	Количество возможных маршрутов облета $N_M$ для ( $N_H = 1$ ) каждого возможного значения параметра ветра (n-1)!	Количество маршрутов облета ( $N_M$ ) в множестве M
2	(2-1)! = 1	1
3	(3-1)! = 2	1
4	(4-1)! = 6	3
5	(5-1)! = 24	4
6	(6-1)! = 120	6
7	(7-1)! = 720	10
8	(8-1)! = 5 040	9
9	(9-1)! = 40 320	9
10	(10-1)! = 362 880	8
11	(11-1)! = 3 628 800	10
12	(12-1)! = 39 916 800	9
13	(13-1)! = 479 001 600	12
14	(14-1)! = 6.2270 * 10^9	11

Таблица 1. Эффект уменьшения мощности множества потенциально оптимальных маршрутов

3. Количество подмножеств  $\theta_i$  и соответственно количество потенциально оптимальных маршрутов облета зависит от расположения точек, связываемых маршрутом. Например, для случая, когда связываемые маршрутом точки находятся на кривой близкой к окружности, оптимальный маршрут облета является единственным, причем независимо от количества точек.

4. Количество потенциально оптимальных маршрутов облета практически прямо пропорционально количеству точек маршрута. На рис.6 показана зависимость среднего количества потенциально оптимальных маршрутов облета от количества точек. Осреднение проводилось по множеству реализаций равномерного распределения в зоне полета связываемых в маршрут точек.

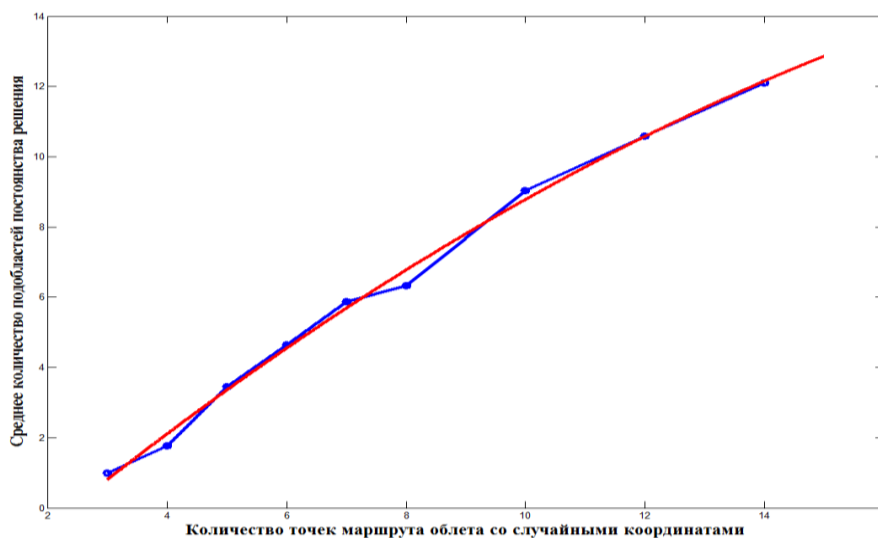


Рис.6. Среднее количество потенциально оптимальных маршрутов в зависимости от количества точек в маршруте

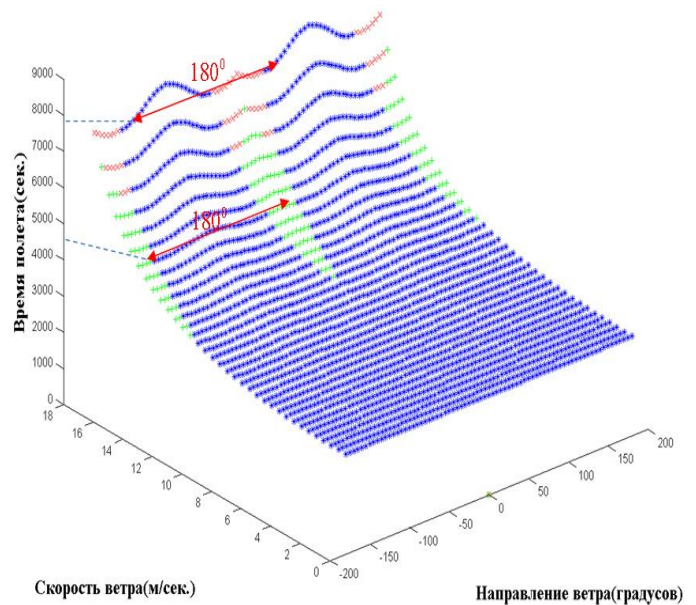


Рис.5. Функция  $t^{\min}(\vec{V}_B)$  для иллюстративного примера облета четырех точек

В главе 2 были получены оценки размеров выигрыша по времени, которые обеспечивает полет по оптимальному маршруту. Анализ решения ряда тестовых задач маршрутизации для разных вариантов расположения и количества связываемых маршрутом точек показал, что оптимальный маршрут дает определенный выигрыш по сравнению даже с теми маршрутами, которые входят в множество потенциально оптимальных. Причем величина этого выигрыша заметно увеличивается при уменьшении разницы между скоростью ветра и воздушной скоростью БЛА. Для иллюстрации сказанного на рис.7 для одного из тестовых примеров приведены осредненные по областям  $\theta_i$  значения увеличения времени облета по потенциально оптимальным маршрутам в процентах относительно времени наискорейшего облета. Для наглядности номер оптимального маршрута совпадает с номером соответствующей ему области значений параметров ветра. Области постоянства оптимальных маршрутов облета приведены на рис.8. В таблице 2 приведены символы, которыми обозначены области постоянства оптимальных маршрутов. На рис.7 видно, что время облета точек по маршруту  $m_1$  при значениях параметров ветра из области  $\theta_3$  в среднем на 9,5% больше оптимального  $m_3$ , а при значениях параметров ветра из области  $\theta_7$  в среднем на 34,5% больше оптимального  $m_7$ .

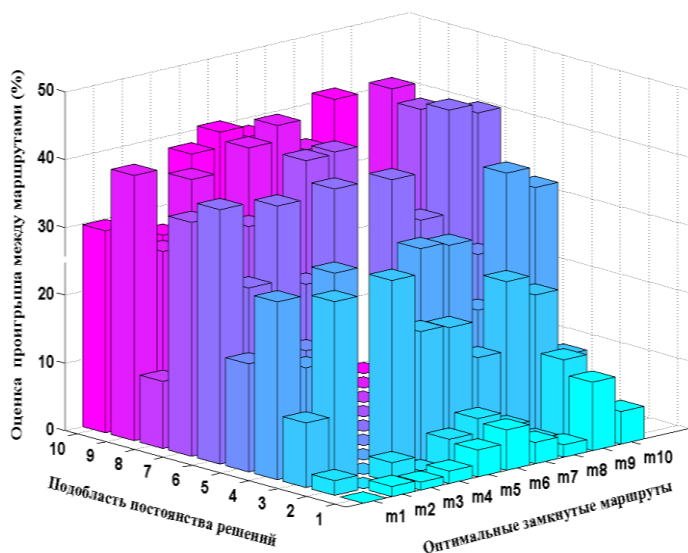


Рис.7. Относительное увеличение времени облета для потенциально оптимальных маршрутов по сравнению с оптимальными

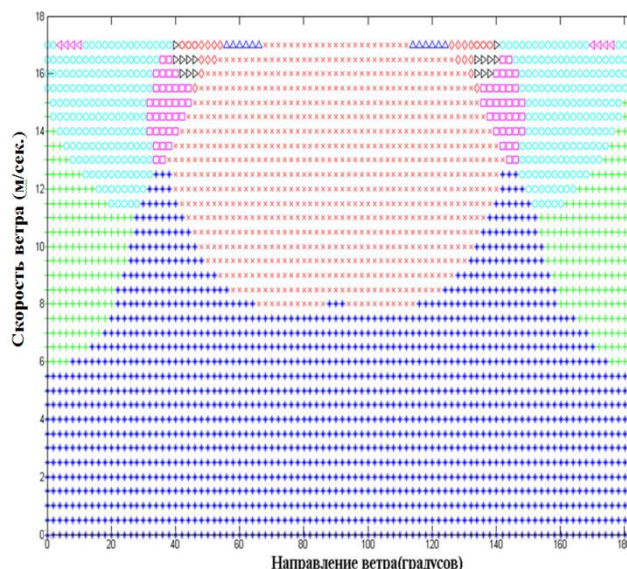


Рис.8. Области постоянства оптимальных маршрутов

Таблица 2. Символы обозначения областей постоянства оптимальных маршрутов

Символы	*	+	x	o	□	◇	▷	◁	o	△
Соответствующая подобласть значений параметров ветра	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$	$\theta_7$	$\theta_8$	$\theta_9$	$\theta_{10}$
Соответствующий оптимальный маршрут	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_4$	$m_5$	$m_6$	$m_7$	$m_8$	$m_9$	$m_{10}$

**В третьей главе** предложена методика решения задачи планирования полета в условиях интервальной неопределенности значений параметров ветра в зоне полета. Интерес к постановке и решению такой задачи обусловлен тем, что далеко не всегда на этапе предполетного планирования маршрута доступен прогноз ветра в зоне полета. Предложена процедура планирования, которая предусматривает два варианта раскрытия неопределенности. В первом используется минимаксный критерий Вальда, во втором применяется критерий Лапласа. Обсуждены также вычислительные проблемы, возникающие при решении задачи маршрутизации в условиях неопределенности и способ их преодоления на основе использования введенных в рассмотрение во второй главе множеств потенциально оптимальных маршрутов облета.

При планировании маршрута полета в условиях отсутствия информации о состоянии ветра в зоне полета, неопределенность исходной (первичной) целевой функции, то есть времени  $t(m, \vec{V}_B)$  облета точек, связываемых маршрутом, устраняется путем перехода к вторичной целевой функции. Поскольку о векторе  $\vec{V}_B$  ничего неизвестно, кроме возможной области его значений  $\phi$ , предложено в качестве вторичной целевой функции  $t^{\max}(m)$  рассматривать наихудшее по области возможных значений неопределенных параметров значение первичной целевой функции, т.е. функцию максимума:

$$t^{\max}(m) = \max_{\vec{V}_B \in \phi} t(m, \vec{V}_B). \quad (3)$$

При вычислительной реализации процедуры поиска экстремума (3) непрерывное множество значений параметров ветра заменяется дискретным так же, как это делалось во второй главе при параметрическом анализе оптимальных решений задачи маршрутизации. Кроме того, учитывается, что экстремум (3) при определенном направлении ветра всегда приходится на максимально возможное значение скорости ветра для данного направления. Это хорошо видно из графика, приведенного на рис.5.

Задача поиска наискорейшего маршрута облета  $m^*$  в рассматриваемом случае сводится к решению минимаксной задачи

$$m^* = \arg \min_{m \in M} t^{\max}(m). \quad (4)$$

Таким образом, при минимаксном подходе задача планирования маршрута полета формализована как задача поиска такого решения, которое гарантирует достижение наилучшего результата при наиболее неблагоприятных значениях параметров ветра в зоне полета из допустимой области  $\phi$ .

Сложность вычислительной реализации (4) обусловлена большой мощностью множества допустимых маршрутов облета  $M$ . Из данных, приведенных в таблице 1, видно, что количество допустимых маршрутов облета велико и быстро растет с ростом количества точек, соединяемых в маршрут.

Выходом из этой ситуации является использование множества потенциально оптимальных замкнутых маршрутов  $M$ , процедура нахождения которого была предложена во второй главе. Мощность этого множества существенно меньше

мощности множества  $\overline{M}$ , что хорошо видно из данных, приведенных в таблице 1. Таким образом, оптимальный гарантирующий маршрут находится по формуле

$$m^* = \arg \min_{m \in M} t^{\max}(m). \quad (5)$$

Гарантирующее решение является перестраховочным. Более оптимистичную оценку продолжительности облета заданного множества точек и соответствующий маршрут облета предложено получать, применяя критерий Лапласа. Это предполагает, что появление любой из возможных в принципе пар значений параметров ветра является равновероятным. В качестве вторичного критерия используется математическое ожидание времени облета заданного набора точек, которое определяется по формуле

$$MO[t(m)] = \iint_{V_B, \lambda \in \phi} t(m, V_B, \lambda) f(V_B, \lambda) dV_B d\lambda. \quad (6)$$

Здесь  $t(m, V_B, \lambda)$  и  $f(V_B, \lambda)$  - соответственно функция времени облета точек, связываемых маршрутом  $m$ , и функция плотности вероятности значений параметров ветра.

При вычислении вторичного критерия снова используется дискретное представление множества возможных значений векторов ветра  $\phi$ , то есть множество  $H$  допустимых пар значений вектора  $\vec{V}_B$  ветра. Далее при параметрическом анализе решений задачи маршрутизации определяется не только множество потенциально оптимальных замкнутых маршрутов облета  $M$ , но и множество соответствующих им времен облета  $t(m, V_B, \lambda)$ . При этом формула (6) используется в виде

$$MO[t(m)] = \sum_{V_B, \lambda \in H} t(m, V_B, \lambda) P(V_B, \lambda). \quad (7)$$

Здесь  $P(V_B, \lambda)$  - вероятность появления в зоне полета ветра с парой значений параметров  $(V_B, \lambda)$ , которая определяется по формуле

$$P(V_B, \lambda) = P(V_B, \lambda)_1 = P(V_B, \lambda)_2 = \dots = P(V_B, \lambda)_{N_H} = \frac{1}{N_H}. \quad (8)$$

Здесь  $N_H$  - мощность множества  $H$ .

Оптимальным будет маршрут облета  $m^*$ , при котором математическое ожидание (7) по множеству потенциально оптимальных маршрутов облета оказывается минимальным:

$$m^* = \arg \min_{m \in M} MO[t(m)]. \quad (9)$$

Для иллюстрации применения методики решения задачи планирования полета в условиях интервальной неопределенности значений параметров ветра приведены результаты решения задачи планирования полета БЛА с постоянной воздушной скоростью 20 м/сек. по маршруту, связывающему 8 точек. Предполагается, что ветер в зоне полета может иметь любое направление, а его скорость может достигать 17 м/сек. На рис.9 показаны гарантирующие оценки продолжительности полета по

каждому из восьми потенциально оптимальных маршрутов. Хорошо видно, что оптимальным по критерию Вальда является маршрут  $m_3$ .

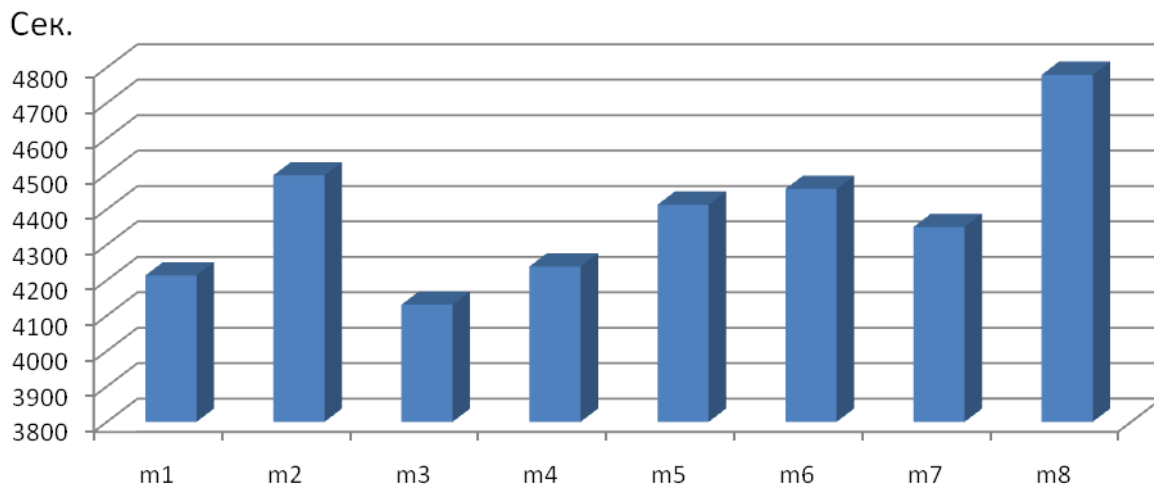


Рис.9. Гарантирующие оценки продолжительности полетов

На рис.10 показаны оценки продолжительности полетов по критерию Лапласа. Видно, что оптимальным по этому критерию является маршрут  $m_1$ .

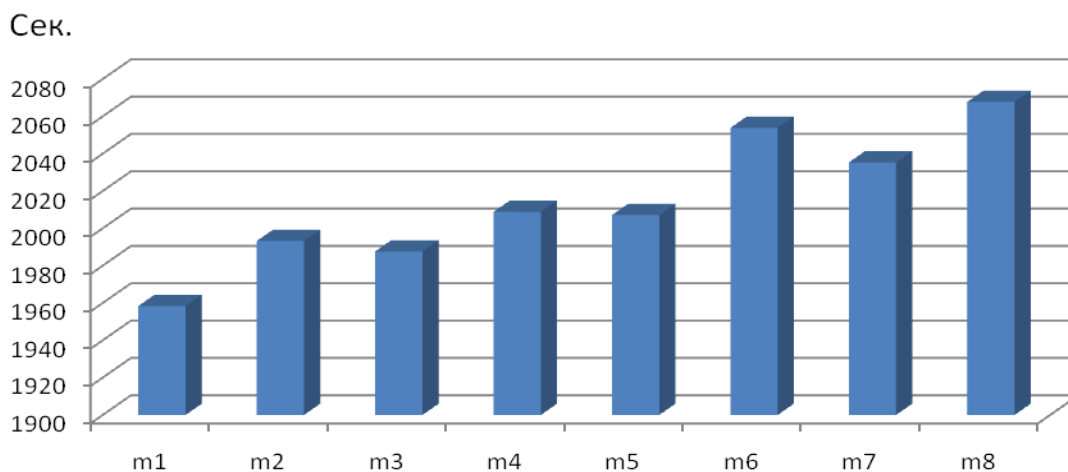


Рис.10. Оценки продолжительности полетов по критерию Лапласа

Маршруты  $m_1$  и  $m_3$  для рассматриваемого примера показаны на рис.11 и рис.12.

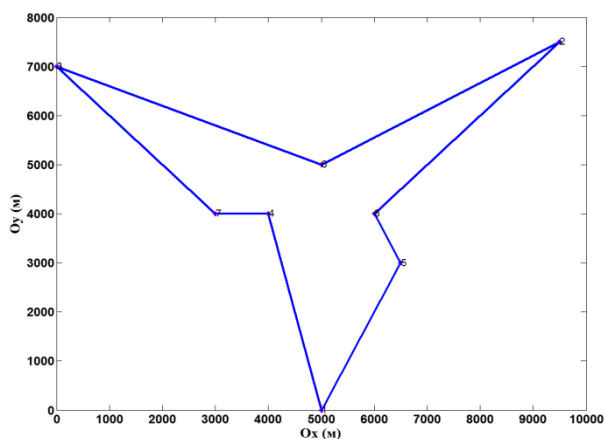


Рис.11 Маршрут  $m_1$

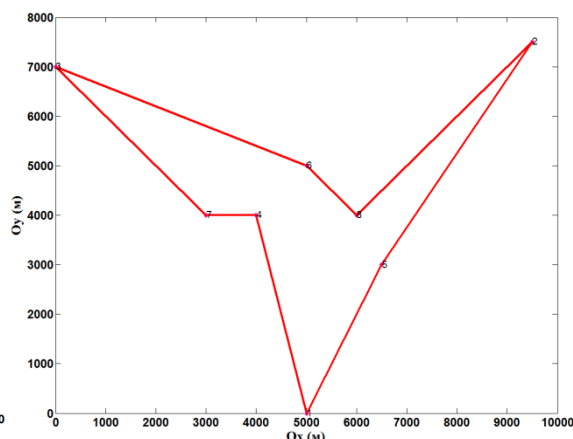


Рис.12 Маршрут  $m_3$

**В четвертой главе** предложена методика планирования маршрута полета с использованием статистических данных о повторяемости скорости ветра различных направлений. Введена в рассмотрение так называемая пороговая скорость ветра, которая определена как верхняя граница области значений параметров ветра, включающей точки с «нулевой» скоростью ветра. Установлена качественная связь между пороговой скоростью ветра и воздушной скоростью БЛА. Предложено определять вероятность того, что ветер в зоне полета в данный сезон и определенное местное время не будет иметь скорость выше пороговой, используя распределение Вейбулла. Найденную таким образом вероятность предложено использовать для оценки целесообразности учета ветра при решении задачи маршрутизации.

В таблице 3 представлен общий вид данных о повторяемости скорости ветра различных направлений за многолетний период, приведенных в «Справочнике по климату СССР». Эти данные «привязаны» к определенному времени суток, сезону и географическому месту.

Таблица 3. Обозначения, используемые для величин, фигурирующих в таблицах повторяемости различных скоростей ветра по направлениям

	$\lambda_1 = 0^0$	...	$\lambda_z$	...	$\lambda_8 = 315^0$
$V_{B1}^H \leq V_B \leq V_{B1}^6$	$P(\Omega_{1,1})$	...	$P(\Omega_{1,z})$	...	$P(\Omega_{1,8})$
...	...	...	...	...	...
$V_{Bk}^H \leq V_B \leq V_{Bk}^6$	$P(\Omega_{k,1})$	...	$P(\Omega_{k,z})$	...	$P(\Omega_{k,8})$
...	...	...	...	...	...
$V_{BK}^H \leq V_B \leq V_{BK}^6$	$P(\Omega_{K,1})$	...	$P(\Omega_{K,z})$	...	$P(\Omega_{K,8})$

Здесь  $z$  - номер направления ветра,  $k$  - номер диапазона значений скорости ветра,  $P(\Omega_{k,z})$  - вероятность появления ветра со значениями параметров, лежащих в подобласти  $\Omega_{k,z}$ . Естественно выполняется условие нормировки:

$$P = \sum_{\substack{z=\overline{1,8} \\ k=\overline{1,K}}} P(\Omega_{k,z}) = 1. \quad (10)$$

В качестве оценки кратчайшего времени облета заданного набора точек при ветре, параметры которого имеют значения, принадлежащие области  $\Omega_{k,z}$ , использовано максимальное по области  $\Omega_{k,z}$  значение кратчайшего времени облета

$$t^{\max}(m, \Omega_{k,z}) = \max_{\Omega_{k,z}} t(m, \vec{V}_B). \quad (11)$$

Математическое ожидание оценки кратчайшего времени облета заданного набора точек по маршруту  $m$  определяется по формуле

$$MO t(m) = \sum_{\substack{k=1, \overline{K} \\ z=1,8}} t^{\max}(m, \Omega_{k,z}) P(\Omega_{k,z}). \quad (12)$$

Тогда задача поиска оптимального маршрута  $m^*$  принимает вид

$$m^* = \arg \min_M MO t(m). \quad (13)$$

В качестве примера планирования маршрута полета с использованием статистических данных о значениях параметров ветра приведены результаты решения задачи планирования полета БЛА с постоянной воздушной скоростью 20 м/сек. по маршруту, связывающему 7 точек. При составлении маршрута использовалась статистическая информация о значениях параметров ветра в районе г. Тыгда, в марте, в 13-00 местного времени. На рис.13 – 15 изображены потенциально оптимальные маршруты облета  $m_1, m_2, m_3$  для рассматриваемого примера.

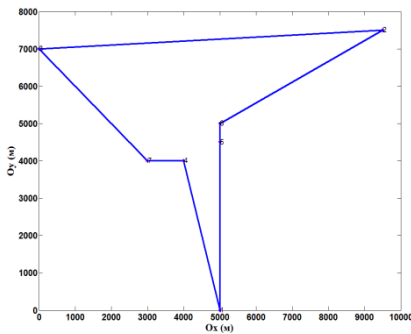


Рис.13. Маршрут  $m_1$

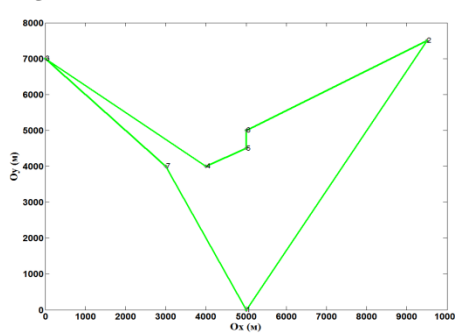


Рис.14. Маршрут  $m_2$

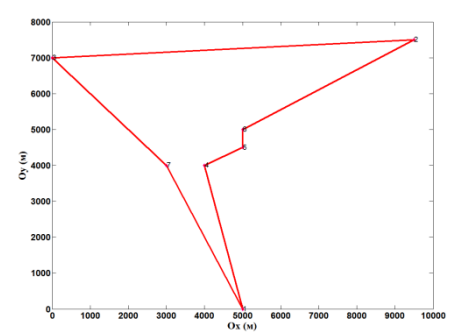


Рис.15. Маршрут  $m_3$

Математические ожидания оценок кратчайшего времени облета точек в рассматриваемом примере приведены в таблице 4.

Таблица 4. Математические ожидания оценок кратчайшего времени облета точек

Маршрутом облета	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$\min_{\substack{m_i \in M \\ i=1,2,3}} MO t(m_i)$
MO_Time_MAX (сек.)	1728,5	1723	1735	1723

Из таблицы 4 видно, что оптимальным является маршрут  $m_2$ .

Определенный интерес с точки зрения планирования маршрута полета представляет подобласть значений параметров ветра, включающая точки с «нулевой» скоростью ветра и соответствующая определенному маршруту облета. На рис.16 эта подобласть заполнена синими точками.



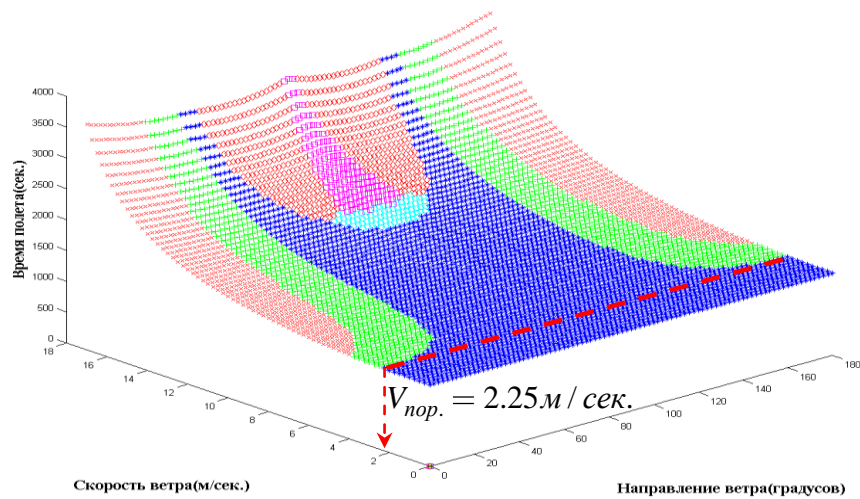


Рис.16. Подобласть  $\psi$  и пороговая скорость

Горизонтальная прямая, проведенная так, что под ней оказывается максимально большая часть подобласти, включающей точки, соответствующие нулевой скорости ветра, будет определять так называемую пороговую скорость ветра. Прямая линия, соответствующая значению пороговой скорости ветра, является верхней границей подобласти  $\psi$ . Как видно из рис.16, при любых значениях параметров ветра, принадлежащих подобласти  $\psi$ , оптимальный маршрут можно находить, не учитывая ветер.

Из результатов расчетов, приведенных на рис.17, следует, что пороговая скорость практически прямо пропорциональна воздушной скорости БЛА, а её математическое ожидание, полученное при статистическом моделировании равномерного размещения точек соединяемых в маршрут, как показано на рис.18, уменьшается при увеличении количества точек связываемых маршрутом.

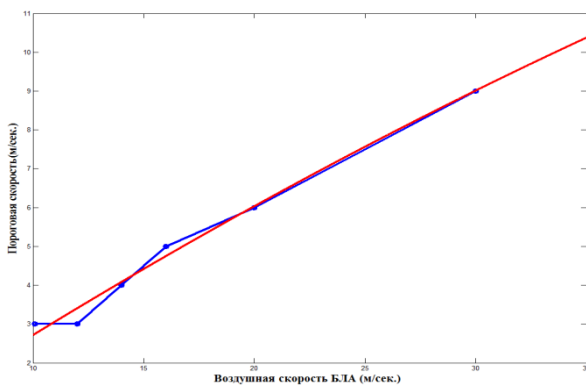


Рис.17. Зависимость пороговой скорости от воздушной скорости  $V_{БЛА}$

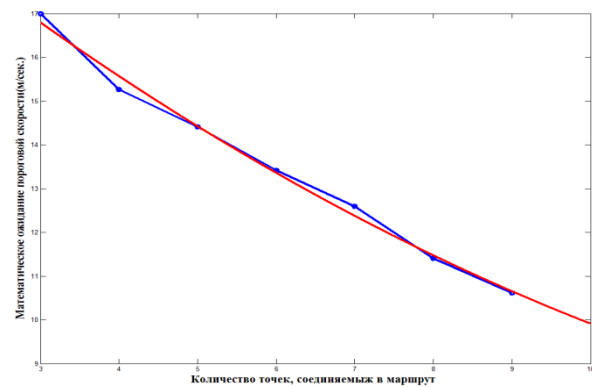


Рис.18. Зависимость математического ожидания пороговой скорости от количества точек

Для определения вероятности, с которой случайная реализация скорости ветра не будет превосходить значение пороговой скорости, предложено использовать функцию распределения Вейбулла

$$P_{s,a}(V) = \frac{s}{a} \left( \frac{V}{a} \right)^{s-1} \exp \left[ - \left( \frac{V}{a} \right)^s \right]. \quad (14)$$

Параметры « $s$ » и « $a$ » распределения определяются из следующих зависимостей:

$$\frac{\bar{V}^{-2}}{V_i^2} = \frac{\Gamma^2 \left( 1 + \frac{1}{s} \right)}{\Gamma \left( 1 + \frac{2}{s} \right)} \quad \text{и} \quad \bar{V} = a \Gamma \left( 1 + \frac{1}{s} \right). \quad (15)$$

Величина среднего значения скорости ветра  $\bar{V}$  определяется по формуле

$$\bar{V} = p_1 V_1 + p_2 V_2 + \dots + p_B V_B. \quad (16)$$

Здесь  $V_1, V_2, \dots, V_B$  - скорости ветра, соответствующие вероятностям повторения  $p_1, p_2, \dots, p_B$ , и содержащиеся в «Справочнике по климату».

Среднеквадратическое значение скорости ветра по диапазонам  $V_i^2$  определяется формулой:

$$V_i^2 = p_1 V_1^2 + p_2 V_2^2 + \dots + p_B V_B^2. \quad (17)$$

Для примера, рассмотренного в этой главе ранее, пороговая скорость, как показано на рис.16, равна  $2.25 \text{ м/сек}$ . Вероятность того, что в конкретной реализации скорость ветра не превысит пороговую скорость оказалась равна 0.2. Соответствующая этой вероятности область выделена на рис.19 синим цветом. Таким образом, с вероятностью 0.2 для рассматриваемого примера оптимальным окажется маршрут  $m_1$ , который можно находить без учета ветра в зоне полета.

Для этого же примера, определена вероятность появления в конкретной реализации ветра, скорость которого не превышает пороговую скорость, для разных значений воздушной скорости БЛА. Соответствующий график показан на рис. 20.

Для оценки влияния как воздушной скорости БЛА, так и количества точек, связываемых в маршруте, на вероятность появления в конкретной реализации ветра, скорость которого не превышает пороговую, были проведены соответствующие расчеты для количества точек от трех до девяти с учетом статистики ветра по району г. Тыгда (март, 13-00 местного времени).

При моделировании разыгрывалось равномерное распределение точек в зоне полета. Результаты расчетов приведены на рис.21.

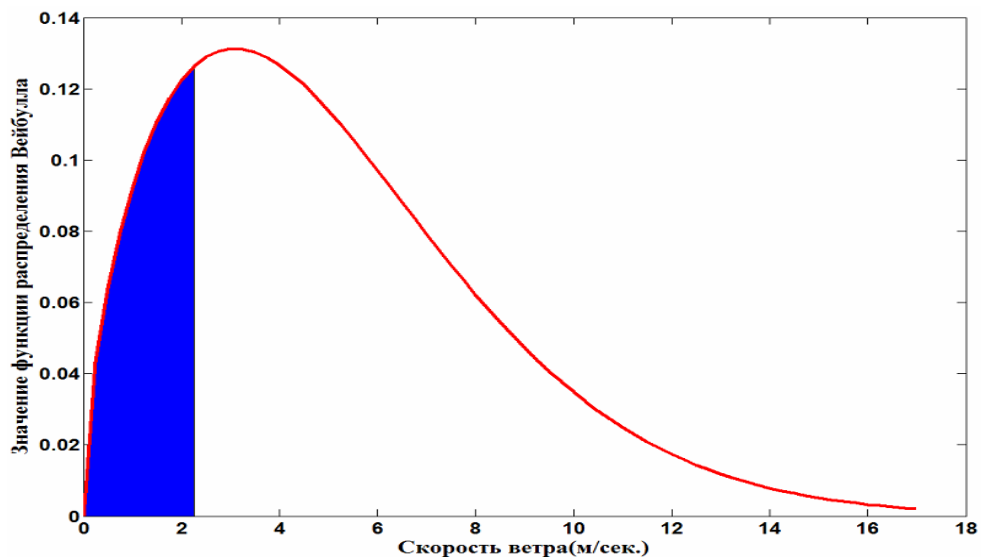


Рис.19. К определению вероятности появления ветра со скоростью не выше пороговой скорости

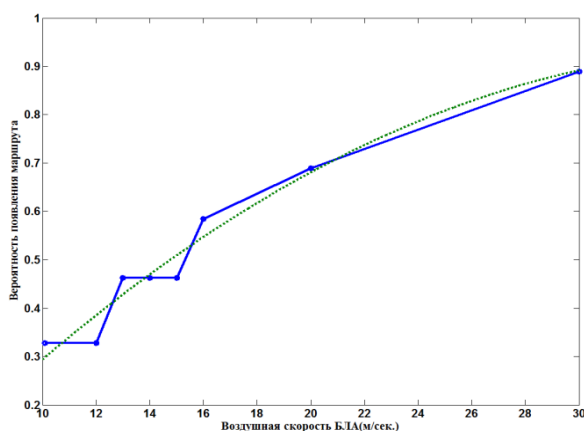


Рис.20. Вероятность появления ветра, скорость которого не превышает пороговую скорость, от воздушной скорости БЛА

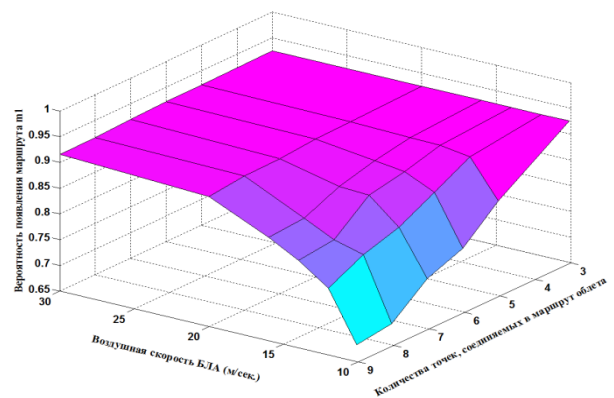


Рис.21. Зависимость вероятности появления ветра, скорость которого не превышает пороговую, от скорости БЛА и количества точек

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В данной диссертационной работе сформулирована и решена актуальная научно-техническая задача априорного планирования полета легкого БЛА по замкнутому маршруту при отсутствии прогноза ветра в зоне полета на основе методики, предусматривающей использование статистической информации о значениях параметров ветра в зоне полета, или информации о диапазонах возможных значений этих параметров. При решении указанной задачи автором получены следующие результаты, обладающие научной новизной и практической значимостью:

1. Сформулированы и доказаны свойства замкнутых маршрутов облета точек в поле постоянного ветра. Указанные свойства позволяют понять «физику» влияния постоянного ветра на результаты решения задач маршрутизации, а также используются в дальнейшем для уменьшения объема вычислений при решении задач маршрутизации при отсутствии прогноза ветра в зоне полета [1, 3].

2. Предложена программно-алгоритмическая реализация процедуры параметрического анализа решений задачи маршрутизации, позволяющая определить

множество потенциально наискорейших замкнутых маршрутов облета и соответствующих им множеств значений параметров ветра [2, 4].

3. Разработана методика планирования полета легкого БЛА по замкнутому маршруту с учетом статистических данных о значениях параметров ветра в зоне полета [5].

4. Предложена методика нахождения наискорейшего замкнутого маршрута облета точек в условиях неопределенности значений параметров ветра в зоне полета. Фактически определяются гарантирующие оценки длительности полета и обеспечивающий их маршрут облета в условиях интервальной неопределенности значений параметров ветра в зоне полета [5].

5. Предложена процедура нахождения минимальной (пороговой) скорости ветра, начиная с которой целесообразен учет ветра при решении задачи маршрутизации. Процедура предусматривает вычисление вероятности, с которой фактическая скорость ветра в конкретной реализации полета не будет превосходить эту минимальную. Таким образом, фактически, по вероятности оценивается целесообразность учета ветра при решении задачи маршрутизации [4].

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Публикации в изданиях из рекомендованного ВАК Минобрнауки России перечня:**

1. Фам С.К., Моисеев Д.В. Свойства оптимальных замкнутых маршрутов полета легкого самолета с учетом прогноза ветра // Электронный журнал “Труды МАИ”, 2012, № 52, [www.mai.ru/science/trudy/](http://www.mai.ru/science/trudy/).

2. Фам С.К., Моисеев Д.В., Таргамадзе Р.Ч. О рациональном выборе замкнутого маршрута полета легкого летательного аппарата с учетом прогноза ветра // «Вестник ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», 2012, №3.

**Публикации в других научных изданиях:**

3. Фам С.К., Моисеев Д.В. О некоторых свойствах оптимальных замкнутых маршрутов полета легкого самолета с учетом прогноза ветра Тезисы докладов 10-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика -2011», 8-10 ноября 2011 г., Москва. – Спб.: ООО «Принт-салон», 2011 – С.103-104.

4. Фам С.К., Моисеев Д.В., Таргамадзе Р.Ч. Об исследовании оптимальных замкнутых маршрутов облета точек в поле постоянного ветра // Тезисы докладов 17-ой Международной конференции "Системный анализ, управление и навигация», с 1 по 8 июля 2012 г., Украина, г. Евпатория (Крым). – М.:МАИ, 2012 – С.59-60.

5. Фам С.К., Моисеев Д.В. О планировании маршрута полета легкого летательного аппарата с учетом статистической информации о параметрах ветра в зоне полета // Тезисы докладов 11-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика -2012», 13-14 ноября 2012г., Москва. – Спб.: ООО «Принт-салон», 2012 – С.157-158.

Множительный центр МАИ (НИУ).

Заказ от 07.05.2013 г. Тираж 70 экз.