- Жучч на правах рукописи

Куц Константин Анатольевич

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ ПОЛЕТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЛЕТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ДАЛЬНЕМАГИСТРАЛЬНЫХ САМОЛЕТОВ

05.22.13 – Навигация и управление воздушным движением

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации».

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, профессор кафедры №21 Летной эксплуатации и безопасности полетов в гражданской авиации ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации», г. Санкт-Петербург

Коваленко Геннадий Владимирович

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры безопасности полетов и жизнедеятельности ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет гражданской авиации», г. Москва **Шаров Валерий Дмитриевич**

Кандидат технических наук, слушатель (штатный) отделения (учебно-летного) отдела (учебно-летного, подготовки испытателей) в/ч 18347,

г. Ахтубинск

Муравьев Иван Станиславович

Hayand.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева»

Защита состоится «15» апреля 2022 г. в 13.00 на заседании диссертационного совета Д223.012.01 на базе ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации», по адресу: 196210, г. Санкт-Петербург, ул. Пилотов, д. 38, ауд. 334. Тел./факс: (812) 704-15-96; e-mail: dissovetguga@spbguga.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО СПбГУГА и на сайте е https://spbguga.ru/root/main/ob-yavleniya-o-zashchite-dissertatsij

Автореферат разослан «14» февраля 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 223.012.01 кандидат технических наук, доцент

Н. Е. Баранов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Статистика показывает, что в наши дни количество авиационных происшествий на этапе полета дальнемагистрального самолета (ДМС) по маршруту лишь немногим ниже суммарного количества авиационных происшествий на других этапах полета. Также все более часто происходят авиационные происшествия и инциденты, связанные с неверным расчетом топлива или неверным решением об уходе на запасной аэродром. Отчасти это связано с тем, что некоторые правила планирования полета ДМС представляются недостаточно обоснованными.

Даже на самые крупные авиакомпании мира периодически ложится бремя экономических кризисов, вынуждая каждый раз задумываться о повышении эффективности своей работы. Несмотря на переход к эксплуатации ДМС нового поколения значительную долю расходов авиакомпаний (до 30%) составляют затраты на авиационное топливо, поэтому для любой авиакомпании никогда не отпадет вопрос повышения эффективности его использования. Это позволяет утверждать, что научная проблема планирования полета ДМС, включающая научные задачи построения маршрута, выбора и оценки маршрутных запасных аэродромов (МЗА) и предполетного расчета топлива, в цели осуществления его безопасной и эффективной летной эксплуатации (ЛЭ) сохраняет свою актуальность.

Степень разработанности темы исследования

Значительный вклад в научную разработку вопросов планирования полетов и ЛЭ ДМС внесли отечественные ученые: А. В. Липин, Ю. Н. Щепилов, Ю. Н. Сарайский, В. Д. Шаров, В. Н. Нартов, С. Ю. Скрипниченко, Г. В. Коваленко, Е. Н. Скриптунова и зарубежные ученые С. Ekstrand, М. Pandey, L. Kang, М. Hansen, К. Krajcek, D. Nikolic. В тоже время проблема планирования полетов и ЛЭ ДМС в отдельных ее направлениях исследована недостаточно.

Объект исследования

Процесс планирования полетов и ЛЭ современного ДМС.

Предмет исследования

Методы и алгоритмы планирования полетов (построения маршрута, выбора и оценки МЗА, предполетного расчета топлива) и ЛЭ ДМС.

Цели и задачи исследования

Целью работы является повышение эффективности и безопасности ЛЭ современных ДМС за счет разработки более совершенных методов и алгоритмов планирования полетов. Для достижения цели в работе поставлены следующие задачи:

- 1. Рассмотреть существующие алгоритмы оценки пригодности МЗА в рамках алгоритма навигации ДМС в условиях ограниченного количества МЗА, дать оценку безопасности реализации этих алгоритмов в процессе ЛЭ ДМС и разработать более совершенный алгоритм оценки пригодности МЗА в полете.
- 2. Провести анализ существующих методов ЛЭ навигационных комплексов (НК) современных ДМС при значительном ухудшении навигационных характеристик и разработать более совершенный метод ЛЭ навигационного комплекса ДМС IV поколения в условиях ухудшения навигационных характеристик.
- 3. Рассмотреть существующие методы определения временной величины зоны оперирования (3O) на основании вероятности отказа газотурбинного двигателя (ГТД) ДМС эксплуатанта и разработать более совершенный метод определения временной величины 3O на основании вероятности отказа ГТД.
- 4. Разработать метод определения значения радиуса 3O каждого М3A в единицах расстояния.
- 5. Разработать метод определения статистического компенсационного запаса топлива для эксплуатации ДМС на регулярных рейсах.
- 6. Разработать метод определения планируемых минимумов МЗА на регулярных рейсах ДМС на основе анализа базы данных аэродромных метеорологических наблюдений.

Научная новизна работы

Научной новизной диссертации является применение динамической оценки изменения параметров ДМС и метеорологических условий, а также научно-обоснованное устранение недостатков существующих методов и алгоритмов планирования полетов, применяемых в авиакомпаниях:

- 1. Разработан алгоритм оценки пригодности МЗА в полете, отличающийся от существующих применением последовательной оценки МЗА в полете независимо от величины 3О и количества ГТД ДМС.
- 2. Разработан метод ЛЭ НК Боинг 777, отличающегося от существующего применением метода полета по ортодромии вместо локсодромии.
- 3. Впервые разработан метод определения значения временной величины 3О ДМС в зависимости от вероятности отказа ГТД, отличающийся от существующих отсутствием учета требуемого времени рейса при вычислении значения временной величины 3О.
- 4. Впервые разработан алгоритм определения радиуса 3О МЗА в единицах расстояния, отличающийся от существующего наличием оценки изменения расчетной массы ДМС в критических точках.

- 5. Впервые разработан метод определения статистического запаса топлива на случай непредвиденных обстоятельств, учитывающий анализ массива статистических данных остатков топлива после рейсов.
- 6. Разработан метод определения планируемых минимумов M3A, отличающийся от существующих наличием оценки климатических характеристик конкретного M3A.

Теоретическая значимость работы состоит в том, что:

- получены новые данные для дальнейшего развития исследований, связанных с обоснованием радиусов 3О для самолетов, не оснащенных ГТД и однодвигательных самолетов;
- предложен и обоснован способ определения временной величины 3O ДМС на основании вероятности отказа ГТД, отличающийся от известных отсутствием параметра рейсового времени ДМС;
- предложен и обоснован метод ЛЭ НК ДМС Боинг 777 в условиях ухудшения навигационных характеристик;
- предложен алгоритм определения радиуса 3O M3A в единицах расстояния, учитывающий уменьшение массы ДМС в процессе полета;
- предложен метод определения компенсационного запаса топлива на основе статистического анализа для регулярных рейсов ДМС;
- предложен метод определения планируемых минимумов M3A на основе анализа случайных процессов изменения высоты нижней границы облаков (ВНГО) и видимости на маршрутных запасных аэродромах в период выполнения регулярных рейсов ДМС.

Практическая значимость состоит в том, что полученные результаты позволяют:

- повысить безопасность и эффективность ЛЭ ДМС за счет более совершенных методов и алгоритмов планирования полетов;
 - повысить вероятность благополучного исхода полета ДМС при закрытии МЗА;
- повысить безопасность и эффективность процесса сертификации порогового и максимального времени ухода на МЗА для ДМС;
- повысить эффективность планирования полетов ДМС за счет обоснованного сокращения потребного количества топлива на полет при применении политики статистического компенсационного запаса топлива;
- повысить безопасность и эффективность ЛЭ ДМС за счет обоснования планируемых минимумов МЗА, применяемых эксплуатантами на конкретных рейсах.

Методы исследования

При решении задач, поставленных в диссертационной работе, использовались основные положения теории вероятностей и математической статистики, теория

стационарного потока отказов Пуассона, методы статистической обработки результатов измерений, теория случайных процессов, а также методы статистического моделирования. В качестве программных средств решения научных задач в работе использованы электронные таблицы Excel и язык объектно-ориентированного программирования Visual Basic for Applications.

Положения, выносимые на защиту:

- 1. Алгоритм оценки пригодности МЗА в полете, позволяющий повысить безопасность ЛЭ ДМС за счет повышения вероятности благополучного исхода полета как минимум на 0,22.
- 2. Метод ЛЭ НК ДМС Боинг 777, позволяющий повысить безопасность ЛЭ ДМС за счет устранения риска бокового уклонения от маршрута вследствие действий экипажа, предписанных существующей эксплуатационной документацией ДМС.
- 3. Метод определения значения временной величины 3О ДМС в зависимости от вероятности отказа ГТД, позволяющий разработать процедуры допуска ДМС эксплуатанта к полетам с определенным временем ухода на МЗА.
- 4. Алгоритм определения радиусов 3O M3A в единицах расстояния, позволяющий прокладывать маршруты по кратчайшему расстоянию в условиях ограниченной временной величины 3O.
- 5. Метод определения статистического запаса топлива на случай непредвиденных обстоятельств на основе статистического анализа остатков топлива после рейсов ДМС, позволяющий повысить эффективность ЛЭ ДМС за счет экономии топлива до 300 кг за рейс.
- 6. Метод определения планируемых минимумов МЗА на основе анализа базы данных аэродромных метеорологических наблюдений, позволяющий повысить безопасность и эффективность ЛЭ ДМС за счет повышения вероятности пригодности МЗА по метеоусловиям в процессе регулярного рейса ДМС до 0,97 и увеличения количества дней в году, когда МЗА доступен как минимум в 1,5 раза.

Достоверность результатов работы

Достоверность исследования обеспечивается адекватностью и практической согласованностью разработанных методов с используемой в авиакомпаниях практике планирования и выполнения полетов ДМС, непротиворечивости положениям современной науки, а также корректным применением математического аппарата для решения задач диссертационного исследования: решением задачи определения ЗО ДМС с использованием теории стационарного потока отказов Пуассона, задачи определения компенсационного запаса топлива на основе статистического анализа и задачи определения приращений планируемых минимумов МЗА на основе регрессионного прогноза случайных процессов изменения метеорологических условий на МЗА в период выполнения рейсов ДМС.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 11 научных конференциях, в т. ч.: ІХ, Х, ХІ Международная молодежная научная конференция «Гражданская авиация: ХХІ век» (ФГБОУ ВО УИ ГА, Ульяновск 2017, 2018, 2019), «ХХІV Всероссийская научно-практическая конференция «Актуальные проблемы защиты и безопасности» 2021, ХІХ международные научные чтения имени Игоря Ивановича Сикорского 2017, ФГБОУ ВО СПбГУГА, г. Санкт-Петербург.

Публикации

По результатам исследований опубликовано 21 печатная работа, в том числе 3 публикации в изданиях, входящих в международную систему цитирования «Scopus», 6 публикациях в изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, 7 публикаций статей в других научных изданиях, 5 тезисов докладов.

Реализация результатов работы

Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО СПбГУГА специализаций «Организация аэронавигационного обеспечения полетов воздушных судов», «Организация летной работы», «Летная эксплуатация гражданских воздушных судов», «Летная эксплуатация летательных аппаратов»: при занятиях со студентами рассматриваются все разработанные в диссертации методы и алгоритмы планирования полетов в дисциплинах «Навигация», «Навигационное планирование полетов» и «Летная эксплуатация». Все результаты работы широко внедрены в практику планирования полетов и ЛЭ ДМС в авиакомпаниях РФ «Волга-Днепр», «Россия», «Ютэйр», «Нордвинд» и «Быстролет», что подтверждено актами о внедрении.

Структура и объем работы

Диссертация включает введение, четыре главы, заключение, список литературы и 6 приложений. Диссертация изложена на 154 страницах машинописного текста, содержит 31 таблицу и 55 рисунков, приложения на 122 страницах. Список литературы включает 165 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность исследования для авиакомпаний, эксплуатирующих современные ДМС. Изложены объект, предмет, цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования. Представлены положения, выносимые на защиту. Показана

достоверность результатов работы, указаны сведения об апробации результатов работы на различных научных конференциях по специальности, сведения о количестве публикаций, личный вклад автора, а также данные о реализации работы в учебном процессе и авиакомпаниях РФ. Приведена структура и объем работы.

В первой главе рассмотрены цели и задачи планирования полетов ДМС, проанализированы исторические аспекты проблем планирования полетов ДМС, обоснована актуальность исследования применительно к ДМС, рассмотрены возможные пути решения проблем планирования полетов ДМС.

Заложенная в наставлении по производству полетов (НПП ГА) концепция построения маршрута ДМС предполагала выбор только одного ЗА пункта назначения, выбор МЗА не регламентировался, поэтому, если, оказывалось, что необходимо уйти на ЗА, например, в середине маршрута, то подходящего МЗА могло не быть. Статистика показывает, что количество авиационных происшествий на маршруте лишь немногим ниже, чем суммарно на других этапах полета, а в определенные года может быть и выше (рис. 1).



Рисунок 1 — Статистика авиационных происшествий на этапах полета по данным Aviation-Safety.net

Это доказывает, что подбор пригодных МЗА, является крайне важным фактором, обеспечивающим безопасность полетов. В отличие от концепции НПП ГА, применявшейся в СССР (РФ, СНГ) за рубежом, прежде всего в США, развивалась иная концепция, связанная с определением ЗО МЗА, вылившаяся в дальнейшем в разработку правил Extended Operations (ETOPS) – Extended Diversion Time Operations (EDTO) и изданием в 2010-х годах документов

ИКАО Doc 9976 и Doc 10085. Первые научные публикации по вопросам планирования полетов, построения маршрута и предполетного расчета топлива начинают появляться только в 1990-х годах и на 2021 год в рецензируемых изданиях базы данных Scopus их количество возросло в 2-3 раза. Растущее количество выбросов парниковых газов гражданскими ДМС также подтверждает необходимость повышения эффективности ЛЭ ДМС за счет экономии топлива.

Наиболее актуально исследование прежде всего для ДМС, так как ближне и среднемагистральные самолеты как правило не выполняют полеты в районах с ограниченным количеством МЗА, кроме того, исследование А. В. Липина показывает, что влияние фактора непредвиденных обстоятельств на среднемагистральных рейсах достаточно высоко, поэтому даже стандартного компенсационного запаса топлива в 5% на таких рейсах недостаточно, следовательно нет возможности повысить их эффективность за счет сокращения запаса топлива.

Во второй главе рассмотрены существующие методы построения маршрута и ЛЭ ДМС в контексте алгоритма оценки пригодности МЗА в полете, эксплуатации НК, определения величины ЗО в единицах времени и расстояния, указаны их недостатки, которые потенциально могут привести к авиационному происшествию и предложены собственные методы и алгоритмы, в которых устранены указанные недостатки.

Существующие алгоритмы оценки пригодности МЗА в полете предполагают либо оценку сразу всех МЗА по правилам ЕDTO, либо вообще отсутствие требования по оценке МЗА в полете для ДМС с тремя и более ГТД, либо для ДМС с двумя ГТД при неприменении правил ЕDTO. Существующий алгоритм часто приводил к авиационным инцидентам, связанным с закрытием одного или нескольких МЗА и одновременным возникновением сложной или аварийной ситуации не борту ДМС. Новый алгоритм навигации ДМС предполагает непрерывную оценку МЗА в полете через выполнение главного правила: «ДМС все время должен находится в пределах подходящего МЗА» (рис. 2).

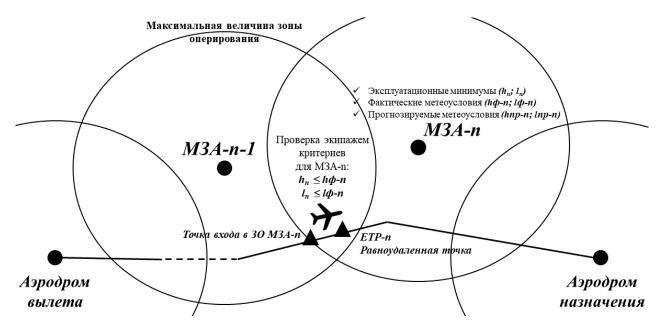


Рисунок 2 – Непрерывная проверка МЗА в процессе полета

Новый алгоритм оценки МЗА в полете (рис. 3) запрещает продолжение полета вне 3О подходящего МЗА независимо от количества ГТД ДМС и применения правил ЕDTО, для его выполнения экипажу предлагаются специальные палетки оценки МЗА, предлагаемые для заполнения в полете. В случае непредвиденного закрытия МЗА предполагается возможность подбора другого МЗА и повторения его оценки. При условии, что вероятность доступности всех потенциальных МЗА в 3О выбранного МЗА одинакова, вероятность невозможности выбора МЗА в полете:

 $p = \frac{1}{2^n}$, где n – количество МЗА в 3О заранее выбранного МЗА.

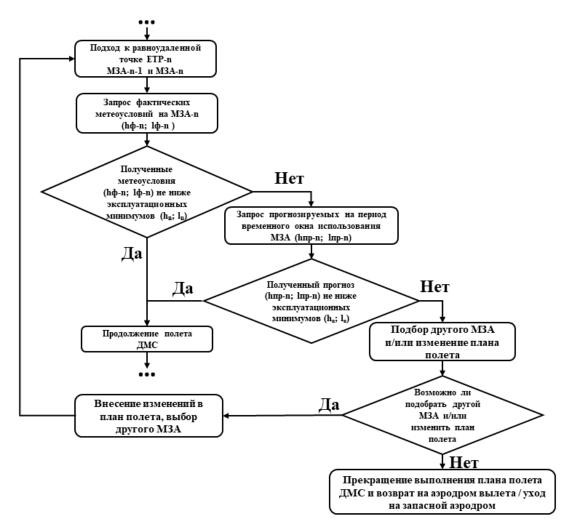


Рисунок 3 – Новый алгоритм навигации ДМС в условиях ограниченного количества МЗА

При условии, что вероятность закрытия каждого из потенциальных МЗА в 30 выбранного МЗА по метеоусловиям, согласно Φ AП-60, составляет q=0.44 (данные главы 4), то вероятность благополучного исхода полета согласно повысится как минимум на 0,22 (при одном МЗА в 3O) и составит 0,78:

$$P_{\text{благ исх}} = 1 - q * p = 1 - 0.44 * 0.5 = 0.78$$

Это позволяет утверждать, что новый алгоритм оценки пригодности МЗА в полете к повышению безопасности летной эксплуатации ДМС.

Существующий метод ЛЭ НК ДМС Боинг 777, являющегося основным ДМС в парке авиакомпаний РФ, может привести к существенному боковому уклонению от маршрута из-за отклонения ортодромии от локсодромии (рис. 4).

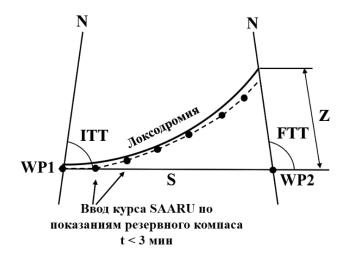


Рисунок 4 – Недостатки существующего метода ЛЭ НК ДМС Боинг 777

Предлагается новый метод ЛЭ резервной бесплатформенной инерциальной системы (БИНС) Боинг 777, позволяющий предотвратить значительное уклонение от маршрута в зависимости от степени ухудшения навигационных характеристик. При сохранении работоспособности Global Positioning System (GPS) экипажу предлагается вводить для выставки резервной БИНС следующий магнитный курс:

$$MH = IMT \pm \frac{\sqrt{U^2 - (GS - TAS)^2}}{TAS} * 57,3$$

В случае сохранения работоспособности только резервной БИНС (отказа основной БИНС и GPS) предлагается вводить путевой угол, рассчитанный для среднего меридиана главной ортодромии маршрута или Гринвичского меридиана. Рассчитанный на этапе планирования полета путевой угол рекомендуется указывать в рабочем плане полета *Remarks: Route Grid Track is 245*.

Определение временной величины 3О определяется вероятностью отказа ГТД в полете Engine In-Flight Shut-Down Rate (IFSD). Методы определения временной величины 3О, предлагаемые в ЕС и ИКАО предлагают учет как вероятности IFSD, так и времени рейса ДМС, однако так как ДМС эксплуатируются на рейсах разной протяженности их применение для сертификации ДМС является затруднительным.

К ГТД ДМС, как к сложной технической системе может применяться стационарный поток отказов Пуассона, а так как у большинства ДМС два ГТД, то можно записать:

$$IFSD = \frac{N}{T} = 2 * 10^{-4} te^{-t}$$

Построим график IFSD в зависимости от времени ухода на МЗА в часах (рис. 5). Из графика видно, что метод стационарного пуассоновского потока близка к значениям IFSD, определяемых в нормативных документах США – Boeing ETOPS Guide.

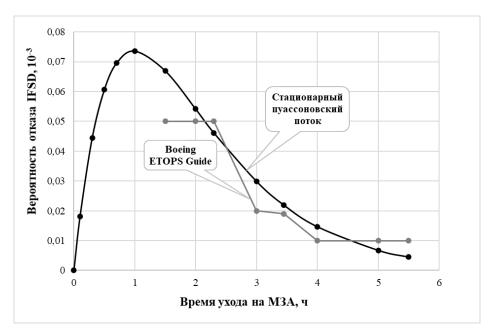


Рисунок 5 – Сравнение методов определения IFSD

На основе разработанного метода можно составить таблицу, которую будет использовать полномочный орган и эксплуатант для сертификации порогового и максимального времени ухода на МЗА для ДМС (табл. 1).

Таблица 1 – Значения вероятностей отказа ГТД ДМС для сертификации

Время ухода на МЗА		Вероятность отказа ГТД ДМС, 10-3			
мин	час	Boeing ETOPS Guide	Стационарный пуассоновский поток	Разность вероятностей	
60	1		0,074		
90	1,5	0,050	0,067	-0,017	
120	2	0,050	0,054	-0,004	
138	2,3	0,050	0,046	0,004	
180	3	0,020	0,030	-0,010	
207	3,45	0,019	0,022	-0,003	
240	4	0,010	0,015	-0,005	
300	5	0,010	0,007	0,003	
330	5,5	0,010	0,004	0,006	

Так как время ухода на МЗА на карте отложить нельзя, то необходимо перевести время в единицы расстояния в соответствии с эксплуатационной документацией ДМС. Для расчета радиуса в единицах расстояния применяются наиболее критические сценарии, влияющие на расчет — отказ ГТД для ДМС с двумя ГТД и разгерметизация для ДМС с тремя и более ГТД. Важно отметить, что причиной ухода на МЗА может быть что угодно, а не только отказ ГТД

или разгерметизация. Авиакомпании выбирают фиксированное значение радиуса ДМС, что не имеет под собой обоснования, так как масса ДМС в каждом рейсе разная, а радиус ЗО зависит от массы ДМС в расчетных КТ – точке отказа двигателя или разгерметизации. Новый алгоритм определения ЗО ДМС предполагает учет уменьшения массы ДМС в процессе полета, что предполагает увеличение радиуса ЗО (рис. 6).

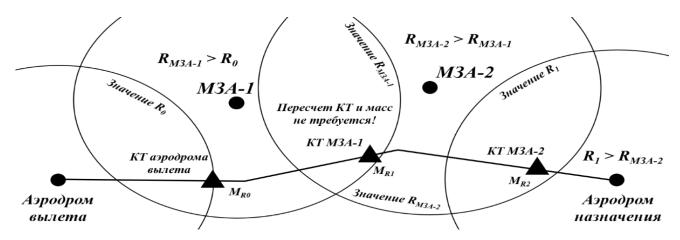


Рисунок 6 – Увеличение радиуса 3О от выбранных МЗА в процессе полета

Первоначальная масса для определения 3О определяется как разница между расчетной взлетной массой и израсходованном топливом за сертифицированное время ухода на МЗА для ДМС. Далее на основе первоначального радиуса 3О определяются массы в расчетных КТ и по ним уже определяются массы для определения новых радиусов 3О. В новый алгоритм заложено возможное уменьшение расчетной скорости для повышения высоты ухода на МЗА при значительной безопасной высоте полета (рис. 7).

Новый алгоритм определения радиуса ЗО МЗА в единицах расстояния на основе расчетных масс ДМС в КТ позволяет повысить эффективность прокладки маршрута при ограниченной величине ЗО, например, 60 минут или 90 минут. Например, новый алгоритм позволит проложить маршруты по кратчайшему расстоянию в районах с ограниченным выбором МЗА: Санкт-Петербург — Нью-Йорк при величине ЗО 90 минут. Алгоритм реализован в программе, написанной на языке Visual Basic for Applications.

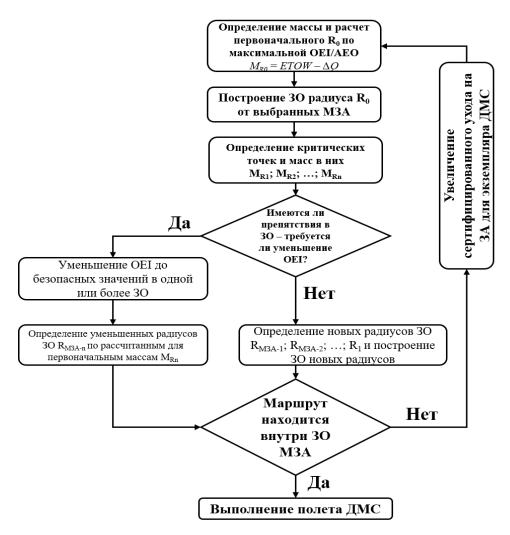


Рисунок 7 – Формализация нового алгоритма определения радиуса ЗО ДМС

В третьей главе впервые разработан метод определения статистического запаса топлива на случай непредвиденных обстоятельств Statistical Contingency Fuel (SCF). Впервые возможность применять SCF предложена в Doc 9976 ИКАО, выпущенного в 2015 году, однако до сегодняшнего дня в научных публикациях не предлагается метод определения SCF. Doc 9976 выдвигает требования к методу определения SCF, который разрабатывает эксплуатант. В мировой практике известны случаи применения SCF в авиакомпаниях, эксплуатирующих ДМС, однако его широкое применение ограничено нормативными документами государств.

Основой нового метода определения SCF будет является проактивный подход, то есть определение величины SCF в % от топлива для полета по маршруту Trip Fuel (TrF) будет применяться в следующем периоде сбора данных о расходе топлива на регулярных рейсах эксплуатанта ДМС. Проактивный подход уже применяется для определения фактора деградации планера и ГТД ДМС Degradation Factor. В соответствии с документами ИАТА фактор деградации должен определяться и учитываться эксплуатантом в предполетном расчете топлива. Период выборки для определения SCF рекомендуется брать аналогичным

периоду определения Degradation Factor. Объектом анализа в новом методе будет пара «тип планера – тип ГТД». Основным требованием Doc 9976 к методу определения SCF является правило исключения ненадежных и выпадающих данных. В разработанном методе будут исключаться случаи ухода на 3A.

В качестве базы для определения Statistical Contingency Fuel возьмем данные по остаткам топлива на регулярных рейсах Москва – Хабаровск и Москва – Южно-Сахалинск для ДМС Boeing 777-312 с ГТД Rolls-Royce Trent 892 за 2016-2018 годы. Оценку остатков топлива рекомендуется производить не в натуральной величине, а в % от Trip Fuel, что более репрезентативно, так как заправка на каждом рейсе ДМС разная. С помощью таблиц Excel (метод Скотта) построим гистограммы распределения остатков топлива в % от Trip Fuel (рис. 8).

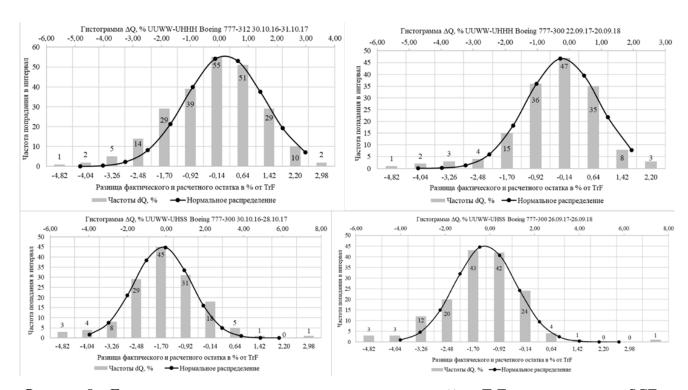


Рисунок 8 – Гистограммы распределения остатков топлива в % от TrF для определения SCF

Из графиков на рис. 8 видно, что распределения подчиняются нормальному закону, что можно доказать с помощью критерия Пирсона. Вычислим такие параметры нормального распределения, чтобы значение р-вероятности критерия χ^2 были максимум 10^{-5} (табл. 2). Определим значения SCF для использования в следующем годовом периоде:

$$SCF = m_{\Delta Q} - 2\sigma$$

В методе определения SCF удвоенного среднеквадратического отклонения СКО выборки остатков топлива в % от TrF будет достаточно, так как отклонения учитываются только в «худшую» сторону, что даст вероятность 0,98. Значение SCF в % рекомендуется округлять до 0,01, что эквивалентно натуральной величине топлива порядка 100 кг.

Таблица 2 – Применение метода определения SCF и оценка эффективности его применения

B777-312	UUWW-UHHH	UUWW-UHHH	UUWW-UHSS	UUWW-UHSS	
с ГТД	30.10.2016-	22.09.2017-	30.10.2016-	26.09.2017-	
RR Trent 892	31.10.2017	20.09.2018	28.10.2017	26.09.2018	
σ выборки, $\%$	1,371	1,134	1,4714	1,366	
Ожидаемое					
значение <i>CF</i>	0,2	-0,2	-0,2	-0,2	
$m_{\Delta Q}$, %					
Коэффициент	192	133	166	155	
распределения	192	133	100	133	
Значение р-					
вероятности	4,2E-5	6,763E-16	3,262E-19	1,23E-64	
критерия χ^2					
SCF, %	2,55	2,47	3,15	2,94	
Средняя					
экономия за	246	296	-87	35	
рейс $Q_{ECON\ FLT}$,	240	290	-0/	33	
кг					

По результатам определения SCF можно сделать вывод, что далеко не на всех рейсах ДМС эффективно применение SCF, так как значение может быть выше сокращенного компенсационного запаса 3%, широко применяемого эксплуатантами. Тем не менее, на рейсах, где значение SCF ниже 3% применение SCF может дать экономию топлива за рейс до 300 кг.

В четвертой главе разработан метод определения планируемых минимумов МЗА на основе анализа базы данных аэродромных метеорологических наблюдений — ВНГО и видимости по выбранным МЗА. Существующие методы определения планируемых минимумов МЗА, предлагаемые в нормативных документах ИКАО, РФ, США и ЕС имеют главный недостаток — применение планируемых минимумов ограничено правилами ЕDTO, хотя еще в исследованиях метеоролога Л. А. Ханджо 1977 года сказано, что неопределенность прогноза, по которому производится оценка МЗА, зависит от величины промежутка времени между составлением прогноза и временем использования прогноза — фактического пролета МЗА.

Группы рейсов ДМС имеют особенности: выбор одних и тех же МЗА на рейс и время может с незначительным разбросом величиной ± 1 ч. Например, на рейсах ДМС из Москвы на

Дальний Восток и обратно как правило выбираются одни и те же M3A – Нижневартовск USNN и Братск UIBB. Аналогично можно рассмотреть рейсы через Северную Атлантику и другие.

Рассмотрим процессы изменения приращений ВНГО $\Delta h = \Delta h(t)$ и видимости $\Delta l = \Delta l(t)$, необходимых для определения планируемых минимумов, в период выполнения рейсов ДМС на Дальний Восток на МЗА USNN и UIBB. Для определения приращений используем худшие эксплуатационные минимумы аэродрома (h_3, l_3) — минимум визуального маневрирования Circle-to-Land. На практике летный экипаж будет использовать заход на посадку с более низким минимумом, поэтому использование минимумов Circle-to-Land в расчетах заложит в приращения дополнительный запас. Эксплуатационные минимумы Circle-to-Land для категории ДМС D (Боинг 777) $h_3 = 700 \, ft$ для USNN, $h_3 = 1100 \, ft$ для UIBB, $l_3 = 3600 \, m$ для USNN и UIBB. Для целей разработки метода метеоусловия будем рассматривать за 2017 и 2018 годы. Приращения ВНГО и видимости будем определять по следующим формулам:

$$\Delta h(t_i) = egin{cases} 0, ext{если } h(t_i) \geq h_3 \ h_3 - h(t_i), ext{если } h(t_i) < h_3 \end{cases}$$
 $\Delta l(t_i) = egin{cases} 0, ext{если } l(t_i) \geq l_3 \ l_3 - l(t_i), ext{если } l(t_i) < l_3 \end{cases}$

С использованием электронных таблиц Excel и архива METAR на аэродромах USNN и UIBB проанализируем ансамбли случайных процессов изменения приращений на каждом МЗА отдельно за 2017 и 2018 годы. Берется период с 1 января по 31 декабря для учета сезонности изменения метеоусловий. Интервал рассмотрения процессов соответствует интервалу времени от вылета до пролета соответствующего МЗА. Среднее время вылета прямых рейсов из Шереметьево составляет 15.00 UTC. Среднее время вылета обратных рейсов из дальневосточных городов составляет 09.00 UTC. Время пролета МЗА Нижневартовск USNN и Братск UIBB на прямых рейсах составляет 18.00 UTC и 21.00 UTC соответственно. Среднее время рейса — 9 ч, таким образом временной период рейса делится на 3 равных промежутка.

По результатам тестов Фишера и Стьюдента процессы изменения ВНГО и видимости можно принять как стационарные в узком смысле. Типовая гистограмма сечения ансамбля, имеет наибольшую частоту на интервале, куда попадают средние значения, принятые за математические ожидания. Плотность распределения в сечении можно определить как нормальный с осью на среднем значении выборки. По критериям согласия Пирсона и Колмогорова (уровень значимости 10^{-3}) его можно представить как экспоненциальный (Лапласа). Для данного закона распределения вероятность того, что данная величина не превысит одностороннее удвоенное СКО выборки равна 0.96.

Таким образом, условное математическое ожидание приращений ВНГО и видимости можно рассчитать по следующей формулам:

$$\Delta hyc\pi(ti) = M[\Delta h(ti)] + 2\sigma[\Delta h(ti)]$$
$$\Delta lyc\pi(ti) = M[\Delta l(ti)] + 2\sigma[\Delta l(ti)]$$

Для определение заданных приращений построим линейные регрессионные прогнозы по условному математическому ожиданию (рис. 9). Полученные значения результатов прогноза округлим до 100 ft и 100 м в большую сторону соответственно и составим табл. 3.

Новый метод определения планируемых минимумов МЗА позволит установить обоснованные значения приращений, тем самым повысив надежность выбора МЗА, что поможет предотвратить авиационные происшествия, связанные с закрытием выбранного МЗА. По текущим методам определения планируемых минимумов среднее количество дней в году, когда МЗА недоступен может достигать 30% в Северной Атлантике и даже 70% в Тихоокеанском регионе. Разработанный метод определения приращений позволит повысить эффективность использования МЗА за счет того, что количество дней в году, когда МЗА недоступен, сократится как минимум в 1,5 раза, поэтому целесообразно применять его не только на дальневосточных маршрутах авиакомпаний Российской Федерации, но и на маршрутах через Северную Атлантику или Тихий Океан. Важно отметить, что вычисленные в табл. 3 приращения необходимо использовать при планировании рейсов ДМС независимо от радиуса ЗО МЗА.

Таблица 3 – Планируемые минимумы M3A USNN и UIBB

Минимум	Нижневартовск USNN			Братск UIBB				
ожидаемой	Прямой рейс		Обратный рейс		Прямой рейс		Обратный рейс	
системы посадки	ВНГО	Lвид	ВНГО	Lвид	ВНГО	Lвид	ВНГО	Lвид
	+200		+200		+500		+400	
2018 год	ft ĸ	+700 м к	ft ĸ	+400 м к	ft ĸ	+1300 м к	ft ĸ	+1200 м к
(по данным	ВПР	минимуму	ВПР	минимуму	ВПР	минимуму	ВПР	минимуму
2017 года)	или	видимости	или	видимости	или	видимости	или	видимости
	MBC		MBC		MBC		MBC	
	+200		+200		+700		+300	
2019 год	ft ĸ	+900 м к	ft к	+400 м к	ft ĸ	+1500 м к	ft ĸ	+500 м к
(по данным	ВПР	минимуму	ВПР	минимуму	ВПР	минимуму	ВПР	минимуму
2018 года)	или	видимости	или	видимости	или	видимости	или	видимости
	MBC		MBC		MBC		MBC	

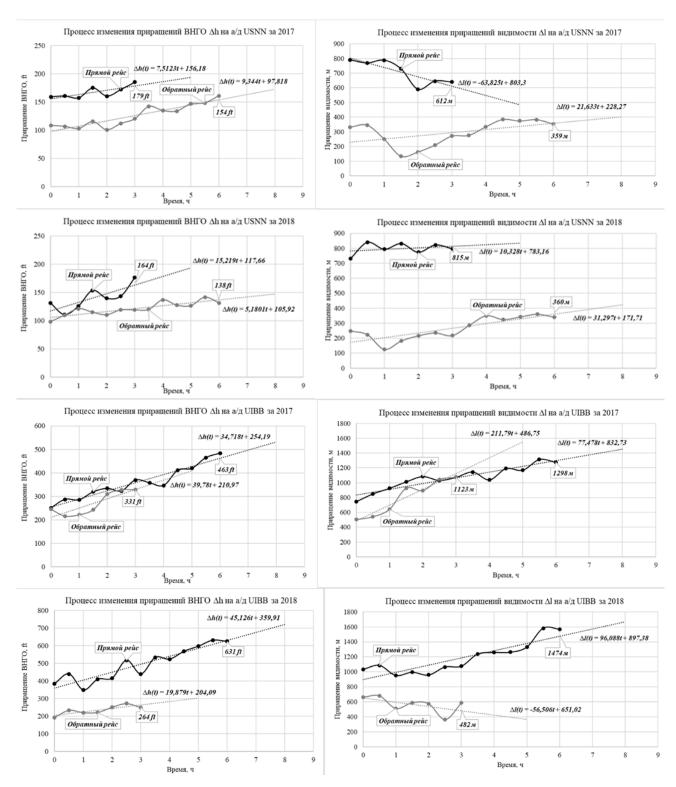


Рисунок 9 — Результаты регрессионных прогнозов случайных процессов изменения ВНГО и видимости по условному математическому ожиданию

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие научные результаты:

- 1. Разработан алгоритм оценки пригодности МЗА в полете при ограниченном радиусе ЗО МЗА, который позволяет повысить безопасность ЛЭ ДМС за счет повышения вероятности благополучного исхода полета как минимум на 0,22.
- 2. Разработан новый метод ЛЭ НК ДМС Боинг 777, который позволит повысить безопасность ЛЭ ДМС за счет устранения риска бокового уклонения от маршрута вследствие действий экипажа, предписанных существующей эксплуатационной документацией ДМС.
- 3. Разработан метод определения значения временной величины 3О ДМС в зависимости от вероятности отказа ГТД, который позволяет разработать процедуры допуска ДМС эксплуатанта к полетам с определенным временем ухода на МЗА.
- 4. Разработан алгоритм определения радиуса 3О МЗА в единицах расстояния на основе расчетных масс ДМС в критических точках (КТ), который позволит прокладывать маршруты по кратчайшему расстоянию в условиях ограниченного радиуса 3О.
- 5. Разработан метод определения статистического запаса топлива на случай непредвиденных обстоятельств на основе статистического анализа остатков топлива после рейсов ДМС, который позволит повысить эффективность летной эксплуатации ДМС за счет экономии топлива до 300 кг за рейс.
- 6. Разработан метод определения планируемых минимумов МЗА, который позволит повысить безопасность и эффективность планирования полетов ДМС за счет повышения вероятности пригодности МЗА по метеоусловиям в процессе регулярного рейса ДМС до 0,97 и увеличения количества дней в году, когда МЗА доступен как минимум в 1,5 раза.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные публикации в изданиях, входящих в международную систему цитирования «Scopus» (3):

- 1. Kuts K. A., Kovalenko G. V. Enroute Alternate Planning Minima Determination Method Based on METAR Database Analysis. Ninth World Congress «Aviation in the XXI-st Century», Kyiv, Ukraine, Lecture Notes in Mechanical Engineering (LNME), Springer, 2021. pp. 559-573, https://doi.org/10.1007/978-3-030-85057-9_46
- 2. Zaitseva A.A., Kuts K.A., Dubovitskiy M.A. Justification of Boeing 777 flight crew actions in the conditions of complicated navigation situation. Proceedings of the 3rd 2021 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2021, pp. 1-4, https://doi.org/10.1109/REEPE51337.2021.9388071
- 3. Куц К. А., Коваленко Г. В. Определение статистического компенсационного запаса топлива для флота «Боинг-777» на фиксированных маршрутах // Известия ВУЗов.

Авиационная техника. КНИТУ-КАИ (Казань) 2021 №4, https://old.kai.ru/aviatech/archive/4.21.pdf

Научные публикации в изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации (6):

- 4. Куц К. А., Коваленко Г. В. Алгоритм навигации дальнемагистрального самолета в условиях ограниченного количества маршрутных запасных аэродромов. Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации №4(29) 2020. /С.-Петербург: СПбГУ ГА, 2020, с. 32-42
- 5. Куц К. А., Коваленко Г. В. Применение стационарного пуассоновского потока к обоснованию времени ухода на запасной аэродром по правилам EDTO. Научный Вестник ГосНИИ ГА №33. /Москва: ГосНИИ ГА, 2020, с. 97-106, http://gosniiga.ru/wp-content/uploads/2021/01/Nauchnyj-vestnik-GosNII-GA-33.pdf
- 6. Куц К. А. Совершенствование алгоритма определения зон оперирования дальнемагистральных самолетов. Научный Вестник МГТУ ГА Том 23 №6 (2020). /Москва: МГТУ ГА, 2020, с. 40-50, https://doi.org/10.26467/2079-0619-2020-23-6-40-52
- 7. Куц К. А. Обоснование действий летного экипажа самолета Boeing 777 в условиях ухудшения навигационной способности. Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации №2(27) 2020. /С.-Петербург: СПбГУ ГА, 2020, с. 28-40
- 8. Куц К. А. К вопросу выбора маршрутных запасных аэродромов в регионах Северной Атлантики и Тихого океана. Научный вестник ГосНИИ ГА №30. /Москва: ГосНИИ ГА, 2020, с. 39-47, http://gosniiga.ru/wp-content/uploads/2020/06/NV-30.pdf
- 9. Куц К. А. Анализ правил планирования полетов. Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации №1(22) 2019. /С.-Петербург: СПбГУ ГА, 2019, с. 85-95

Публикации в изданиях, не входящих в перечень ВАК (7):

- 10. Куц К. А. Алгоритм навигации дальнемагистрального самолета для повышения безопасности ухода на запасной аэродром. Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды XXIV Всероссийской научно-практической конференции РАРАН (31 марта 3 апреля 2021 г.). Том 6, 2021, с. 153-159, http://apzb.info/userfiles/files/%D0%A2%D0%BE%D0%BC_6_2021_%D0%B4%D0%BB%D1%8F%20%D1%81%D0%B0%D0%B9%D1%82%D0%B0.pdf
- 11. Куц К. А., Зайцева А. А. Обоснование действий летного экипажа самолета Boeing 777 в условиях усложнения навигационной обстановки. Актуальные проблемы защиты и безопасности: Труды XXIII Всероссийской научно-практической конференции РАРАН (1–4 апреля 2020 г.). Том 2, 2020, с. 278-285, http://www.apzb.info/userfiles/%D0%A2%D0%9E%D0%9C 2 %D0%B4%D0%BB%D1%8 F%20%D1%81%D0%B0%D0%B9%D1%82%D0%B0.pdf
- 12. Куц К. А. Противоречия правил EDTO-ETOPS. Проблемы летной эксплуатации и безопасность полетов. Межвузовский тематический сборник научных трудов. Выпуск XIV: ФГБОУ ВО СПбГУГА, 2020, с. 119-127
- 13. Куц К. А. Совершенствование правил EDTO-ETOPS. Гражданская авиация: XXI век: сборник материалов XI Международной молодежной научной конференции (18–19 апреля 2019 г.). Ульяновск: УИ ГА, 2019. 235 с. с. 50-52

- 14. Куц К. А. Перспективы совершенствования топливной политики авиакомпании. Гражданская авиация: XXI век: сборник материалов X Международной молодежной научной конференции (5–6 апреля 2018 г.). Ульяновск: УИ ГА, 2018. 225 с. с. 15-16
- 15. Куц К. А. Полеты с увеличенным временем ухода на запасной аэродром (EDTO). Гражданская авиация: XXI век: сборник материалов IX Международной молодежной научной конференции (13–14 апреля 2017 г.). Ульяновск: УИ ГА, 2017. 227 с. с. 53-55
- 16. Куц К. А. Полеты с увеличенным временем ухода на запасной аэродром (ЕDTO). Сборник докладов Девятнадцатых международных научных чтений имени Игоря Ивановича Сикорского 24-29 апреля 2017.-217 с. с. 115-116

Тезисы докладов (5):

- 17. Куц К. А. Методика определения планируемых минимумов запасных аэродромов на основе теории случайных процессов. Сборник тезисов докладов LI научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, посвященная памяти авиаконструктора И.И. Сикорского: ФГБОУ ВО СПбГУГА, 2019. 430 с. с. 101-102
- 18. Куц К. А. Совершенствование топливной политики авиакомпании. Сборник тезисов докладов L юбилейной научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, посвященная памяти авиаконструктора И.И. Сикорского: $\Phi \Gamma F O V B O C \Pi G \Gamma V \Gamma A$, 2018.-445 с. с. 85-86
- 19. Куц К. А. Проблемы выполнения полетов с увеличенным временем ухода на запасной аэродром. Сборник тезисов докладов XLIX научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, посвященная памяти авиаконструктора И.И. Сикорского: ФГБОУ ВО СПбГУГА, 2017. 373 с. с. 47-48
- 20. Куц К.А. Перспективы совершенствования топливной политики авиакомпании. Гагаринские чтения 2018: XLIV Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов: Том 2: М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2018. 417 с. с. 338-339, https://gagarin.mai.ru/files/2018/Vol_2.pdf
- 21. Куц К. А. Полеты с увеличенным временем ухода на запасной аэродром (EDTO). Гагаринские чтения 2017: XLIII Международная молодежная научная конференция: Сборник тезисов докладов: М.; Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2017. 1479 с. с. 862, https://gagarin.mai.ru/files/2017/Abstracts.pdf