

На правах рукописи



Попов Андрей Сергеевич

**МЕТОДЫ, МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И КОМПЛЕКС ПРОГРАММ
ДЛЯ ВЫБОРА СТРУКТУРЫ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА
И ИНФРАСТРУКТУРЫ АЭРОДРОМА
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ**

1.2.2. «Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ (технические науки)»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2022

Работа выполнена в Федеральном автономном учреждении «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ФАУ «ГосНИИАС»)

Научный руководитель:

Вишнякова Лариса Владимировна

доктор технических наук, профессор, начальник подразделения ФАУ «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»

Официальные оппоненты:

Соломенцев Виктор Владимирович

доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе и развитию АО «Азимут»

Болелов Эдуард Анатольевич

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта» Московского государственного технического университета гражданской авиации

Ведущая организация:

Федеральное автономное учреждение «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», 140180, г. Жуковский, Московская область, ул. Жуковского, 1

Защита состоится «24» ноября 2022 года в 16 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.327.03 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский авиационный институт» (национальный исследовательский университет) (МАИ) по адресу 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МАИ по ссылке: https://mai.ru/events/defence/index.php?ELEMENT_ID=168285

Автореферат разослан: «___» _____ 2022 г.

Отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью организации, просим отправлять по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д.4, Отдел Ученого и диссертационных советов МАИ.

Учёный секретарь диссертационного совета
24.2.327.03, д.т.н., доцент

А.В. Старков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В условиях роста интенсивности воздушного движения (ВД) возникает задача обеспечения безопасности и эффективности выполнения полетов, а также обеспечения баланса между пропускной способностью воздушного пространства (ВП) и потребностью в выполнении полетов. Одним из способов обеспечения выполнения полетов в прогнозных условиях роста интенсивности ВД является совершенствование структуры ВП и инфраструктуры аэродрома. Структура ВП включает в себя зоны, районы и маршруты обслуживания ВД, районы аэродромов и аэроузлов, зоны ограничения использования ВП. Под инфраструктурой аэродрома понимается комплекс взлетно-посадочных полос, сеть рулежных дорожек, перрон и места стоянок.

Проектирование новой структуры ВП является сложным, многоэтапным, многокритериальным процессом, в котором на каждом этапе проектирования должны быть задействованы различные специалисты. Основными заинтересованными лицами при внедрении или совершенствовании структуры ВП и инфраструктуры аэродрома являются: пользователи ВП, провайдеры аэронавигационных услуг, операторы аэропортов, а также авиационные власти. Зачастую нет согласованного подхода к решению задачи: интересы специалистов расходятся, что приводит к затягиванию сроков модернизации структуры ВП и инфраструктуры аэродрома. Таким образом, возникает потребность не только в четкой постановке целей и задач, но и в определении характеристик, которые необходимо достичь.

В авиационной отрасли был принят подход, основанный на характеристиках, который позволяет задавать и аналитически оценивать целевые показатели эффективности функционирования системы организации воздушного движения (ОрВД) на основании эксплуатационных данных, что позволяет оценить только существующую систему ОрВД. В свою очередь, выбор перспективных вариантов структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, как элементов системы ОрВД, должен быть основан на прогнозных потоках увеличенной интенсивности ВД.

Вследствие этого, тема диссертации, направленная на решение задачи разработки математических моделей и комплекса программ для выбора структуры ВП и инфраструктуры аэродрома на основе анализа эффективности их использования в перспективных потоках ВД, является актуальной и практически важной.

Степень разработанности темы исследования. Исследованию и разработке методов, математических моделей и компьютерных программ для оценки показателей использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, посвящено большое количество работ.

Основные работы зарубежных авторов (X. Prats, C. Barrado, F. Netjasov, D. Crnogorac, G. Pavlovic, A. Vidosavljevic, I. Agui, D. Delahaye, T. An. Granberg, V. Polishchuk, B. Josefsson, R. Christien, E. Hoffman, A. Trzmiel, K. Zeghal, F. Herrema, V. Treve, B. Desart, R. Curran, D. Visser, R. Marcos, D. Toribio, R. Herranz, N. Adrienko, G. Andrienko и др.) посвящены оценке как самой структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, так и показателей эффективности её использования. В рамках выполнения этих исследований разработаны математические модели, позволяющие имитировать процессы ОрВД, обрабатывать данные по результатам выполнения полётов, а также рассчитывать различные показатели. Созданы компьютерные программы для оценки структуры ВП и инфраструктуры аэродрома: ТААМ, AirTop, SIMMOD и др.

Основные работы отечественных авторов (Пятко С.Г., Спиридонов А.А., Ю.Е. Глухов Ю.Е., Коновалов А.Е., Алёшин В.И., Дегтярёв О.В., Зубкова И.Ф. и др.) посвящены методам проектирования и оценки структуры ВП и инфраструктуры аэродрома. Однако до настоящего времени оценка эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома методами имитационного моделирования в РФ не проводилась. В рассмотренных работах исследуется конкретный показатель (или группа показателей) в интересах только одного участника системы ОрВД и решается однокритериальная задача по оценке

эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, что не позволяет комплексно провести оценку по разным группам показателей и сформулировать обоснованный вывод о выборе конкретного ее варианта.

Диссертационная работа посвящена разработке математических моделей, комплекса программ и методов анализа эффективности использования ВП при модернизации его структуры, основанные на решении многокритериальной задачи рационального поиска решений, учитывающей интересы различных участников системы ОрВД.

Цель исследования – повышение качества выбора рационального варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома (по показателям безопасности полетов, эффективности полетов, пропускной способности и влияния на окружающую среду) с учётом интересов различных участников системы ОрВД.

Для достижения поставленной цели исследования необходимо решить **научную задачу**, заключающуюся в разработке математических моделей и комплекса программ анализа эффективности использования ВП и инфраструктуры аэродрома, позволяющих повысить качество выбора рационального варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома с учётом интересов различных участников системы ОрВД.

Объект исследования – структура ВП и инфраструктура аэродрома.

Предметом исследования являются методы, математические модели и комплекс программ для выбора структуры ВП и инфраструктуры аэродрома на основе анализа эффективности их использования.

Для достижения поставленной цели исследования решены следующие **частные задачи исследования**:

1. Проведен анализ опыта применения математического моделирования при решении задачи оценки эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, обоснована актуальность и сформулированы задачи исследования.

2. Разработаны математические модели и алгоритмы для расчёта системы показателей эффективности системы ОрВД и метод выбор рационального варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома.

3. Разработан комплекс программ имитационного моделирования системы ОрВД по оценке эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома.

4. Разработана методика проведения исследований по анализу эффективности использования ВП и инфраструктуры аэродрома и проведены исследования по оценке эффективности использования структуры ВП.

5. Сформулированы практические рекомендации по оптимизации структуры ВП и инфраструктуры аэродрома.

Методы исследования: методы системного анализа, информационного анализа, построения и анализа сложных систем, формализованного представления систем, аналитического и имитационного моделирования, решения многокритериальных задач, методы оптимизации и теории вероятности, численные методы.

Основные научные результаты, выносимые на защиту:

1. Математические модели, позволяющие комплексно описать элементы системы ОрВД, их функционирование и процессы взаимодействия между ними и алгоритмы управления воздушным движением и движением ВС по поверхности аэродрома, основанные на численных методах: имитации отжига при оптимизации расстановки ВС по местам стоянок и алгоритма A^* при построении маршрута ВС по поверхности аэродрома и Дейкстры при построении маршрута полета. Результаты опубликованы в [1-4].

2. Метод выбора рационального варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, позволяющий учесть интересы всех участников системы ОрВД для выработки общего решения. Результаты опубликованы в [6],[7].

3. Система показателей эффективности использования структуры ВП и инфраструктур

туры аэродрома, позволяющая всесторонне и объективно провести соответствующую оценку эффективности, в том числе с применением численного метода аппроксимации результатов моделирования полиномом 2-го порядка методом МНК для определения зависимости задержек от интенсивности ВД. Результаты опубликованы в [6],[7].

4. Методика оценки эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, позволяющая на основе разработанной системы показателей количественно оценить характеристики каждого из рассматриваемых вариантов структуры ВП и инфраструктуры аэродрома в интересах выбора рационального варианта. Результаты опубликованы в [5].

5. Комплекс программ для оценки эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, дающий возможность осуществить обоснованный выбор рационального варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома при значительном снижении трудозатрат и времени. Результаты опубликованы в [1-4],[6-8].

Научная новизна результатов исследования заключается в следующем:

1. Математические модели элементов и процессов системы ОрВД, разработанные на основе методов системного анализа, построения и анализа сложных систем, математического моделирования, численных методов, отличаются от известных моделей тем, что позволяют проводить моделирование «gate-to-gate» (от перрона до перрона), включая моделирование и алгоритмы выполнения и обслуживания полётов в ВП и на поверхности аэродрома, обнаружения потенциальных конфликтных ситуаций, формирования бесконфликтной очереди прибывающих и вылетающих ВС с оценкой пропускной способности аэродрома, диспетчерской зоны района аэродрома и верхнего ВП в перспективных потоках ВД.

2. Метод выбора рационального варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, разработанный на основе методов математического моделирования, структурного синтеза, решения многокритериальных задач, отличается от известных методов тем, что выбор рационального варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома осуществляется из ограниченного числа рассматриваемых вариантов путем оценки эффективности их использования с применением метода последовательных уступок, заключающегося в формировании приоритетного ряда показателей.

3. Система показателей эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома и алгоритмов их расчета, разработанные на основе методов системного и структурного анализа, информационного анализа, решения многокритериальных задач, отличается тем, что комплексно учитывает современные требования к структуре ВП и инфраструктуре аэродрома, а также подходы к оценке ее использования за счет включения разнородных групп показателей в интересах всех основных участников системы ОрВД.

4. Методика оценки эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, разработанная на основе методов информационного анализа, математического моделирования, отличается от известных методик тем, что оценка выполняется путем расчетного и имитационного компьютерного моделирования процессов ОрВД с использованием разработанной системы показателей.

5. Комплекс программ для оценки эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, разработанный на основе методов построения и анализа сложных систем, математического моделирования, отличается тем, что является реконфигурируемым под различные типы задач, использует технологию «бесшовного моделирования» и реализует имитационное моделирование реалистичных сценариев, описывающих движение ВС как по поверхности аэродрома, так и при полете в ВП района аэродрома и на маршруте обслуживания ВД в интересах обоснованного выбора рационального варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома для перспективных потоков ВД.

Теоретическая значимость заключается в разработке математических моделей элементов и процессов системы ОрВД, архитектуры их взаимодействия, метода выбора рационального варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, методики и ком-

плекса программ для оценки эффективности их использования, определяющих вклад в развитие теории применения математического моделирования, численных методов и комплексов программ для решения задач ОрВД.

Практическая значимость. Разработанные методы, алгоритмы, математические модели реализованы в составе программного комплекса имитационного моделирования системы организации воздушного движения (КИМ ОрВД - свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2017619766 от 01 сентября 2017 года). Комплекс введен в эксплуатацию во ФГУП «Госкорпорация по ОрВД» - национального провайдера аэронавигационных услуг и используется специалистами по организации ВП для проведения исследований в поддержку принятия решений при модернизации структуры ВП. Имеются акты о внедрении результатов диссертации. В процессе эксплуатации комплекс неоднократно дорабатывался по мере возникновения новых задач и появления новых концепций по организации и управлению воздушным движением.

Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов обеспечивается корректным использованием положений ранее известного и апробированного научно-методического аппарата; корректным выбором используемых показателей; использованием проверенных исходных данных; практической реализуемостью разработанных моделей, метода и методики и *подтверждается* сходимостью результатов показателей использования ВП и инфраструктуры аэродрома, полученных, с одной стороны, с использованием разработанных математических моделей, с другой стороны, рассчитанных на основе эксплуатационных данных (4D – траекторий) по результатам выполненных полётов воздушных судов.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в семи статьях [1-6],[8] в периодических изданиях из перечня ВАК, одна статья [7] в периодических изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования, в том числе Web of Science, а также в других научных изданиях и сборниках трудов научных конференций [9-18]. Получены 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ [19-21]. Всего по теме 21 публикация.

Апробация материалов работы: на Рос. науч.-технич. семинаре «Состояние и перспективы развития автоматизированных систем планирования использования воздушного пространства в РФ», ПИВП-2011, Москва, ФГУП «ГосНИИАС», 2011 г.; на Всерос. науч.-практич. конф. по имитационному моделированию соц.-экономических систем (ВКИМСЭС), Москва, 2012 г.; на 4:th Council of European Aerospace Societies (CEAS) Air and Space Conference in Linköping, 2013 г.; на Всерос. науч.-технич. конф. «Моделирование авиационных систем», Москва, 2013 г.; на VII Всерос. науч.-практич. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2015), Москва, 2015 г.; на 2nd International Conference on Traffic Engineering (ICTE17), Spain, Barcelona, 2017 г.; на VIII Всерос. науч.-практич. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2017), Москва, 2017 г.; на Юбилейной конф. «Авиационные системы в XXI веке», Москва, ФГУП «ГосНИИАС», 2017 г.; на Юбилейной Всерос. науч.-технич. конф. «Авиационные системы в XXI веке», Москва, ФГУП «ГосНИИАС», 2022 г.

Комплекс имитационного моделирования системы ОрВД был представлен и продемонстрирован в 2016–2019 гг. на международной выставке World Air Traffic Management Congress (WATM) в г. Мадрид, посвященной передовым технологиям в области ОрВД.

Реализация результатов работы. С использованием программного комплекса имитационного моделирования был проведен ряд исследований в интересах национального провайдера аэронавигационных услуг ФГУП «Госкорпорация по ОрВД» в целях оценки эффективности структуры ВП и инфраструктуры аэродромов при их модернизации, в том числе: оценка эксплуатационных характеристик проектируемой структуры ВП Москов-

ской зоны ЕС ОрВД и Московского узлового диспетчерского района с использованием имитационного моделирования, комплексная оценка эффективности выполнения полётов в новой ВП пространства Московской, Санкт-Петербургской, Ростовской, Самарской и Екатеринбургской зонах ЕС ОрВД, оценка пропускной способности основных аэродромов Московского узлового диспетчерского района с учётом моделирования в нём ВД и движения воздушных судов по поверхности аэродромов Шереметьево, Домодедово, Внуково. На основе результатов исследований был выбран наилучший вариант структуры ВП Московской и смежных зон ЕС ОрВД, который был внедрен 03 декабря 2020 года.

С использованием разработанных математических моделей в интересах ФГБУ «НИЦ имени Н.Е. Жуковского» проведены исследования по развитию Московского авиационного узла (МАУ) на основе формирования и реализации потенциала авиаузла на рынке международного трансфера.

Результаты реализации подтверждены соответствующими актами.

Внедрение. Результаты диссертационной работы были внедрены во ФГУП «Госкорпорация по ОрВД» (г. Москва). Имеется акт о внедрении результатов.

Личный вклад. Все излагаемые результаты получены лично автором. Научному руководителю принадлежит руководство постановкой задачи выбора варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома.

Структура и объем диссертации. По структуре диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем работы составляет 168 страниц текста, включающие список литературы, изложенный на 10 страницах и содержащий 97 наименований. Работа содержит 53 рисунка и 3 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении содержится обоснование актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, определена практическая значимость работы. Сформулированы научная новизна и положения, выносимые на защиту, представлена краткое содержание глав диссертации.

В первой главе проводится анализ опыта применения имитационного моделирования при решении задачи оценки эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома. Рассматриваются методы и компьютерные программы, применяемые для решения аналогичных задач, а также их недостатки. Проводится обоснование целесообразности применения имитационного моделирования для решения задачи оценки эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома.

Первая глава посвящена постановке задачи поиска оптимальной структуры ВП и инфраструктуры аэродрома.

В работе рассматриваются методы оценки структуры ВП и инфраструктуры аэродрома на основе эксплуатационных характеристик, полученных по результатам имитационного и аналитического моделирования.

Рассматриваются альтернативные варианты структуры \bar{s} ВП и инфраструктуры аэродрома, которые характеризуются парой векторов $\{\bar{s}_{ВП}, \bar{s}_a\}$, где вектор $\bar{s}_{ВП}$ - структура ВП, \bar{s}_a - инфраструктура аэродрома. Представим структуру ВП в виде набора элементов:

$\bar{s}_{ВП} = (\bar{s}_{сек}, \bar{s}_{BT}, \bar{s}_{SID}, \bar{s}_{STAR}, \bar{s}_{app})$, где $\bar{s}_{сек}$ - структура секторов УВД, \bar{s}_{BT} - сеть ВТ, \bar{s}_{SID} - маршруты вылета моделируемого(ых) аэродрома(ов) (SID – standard instrument departure), \bar{s}_{STAR} - маршруты прибытия моделируемого(ых) аэродрома(ов) (STAR – standard terminal arrival), \bar{s}_{app} - маршруты захода на посадку (approach) моделируемого(ых) аэродрома(ов).

Далее определим инфраструктуру моделируемого(ых) аэродрома(ов): $\bar{s}_a = (\bar{s}_{ВПП}, \bar{s}_{РД}, \bar{s}_{МС})$, где $\bar{s}_{ВПП}$ – система ВПП, $\bar{s}_{РД}$ – сеть рулежных дорожек (РД), $\bar{s}_{МС}$ – места стоянок (МС).

На рисунке 1 представлены примеры структуры ВП РФ и инфраструктуры аэродрома Шереметьево.

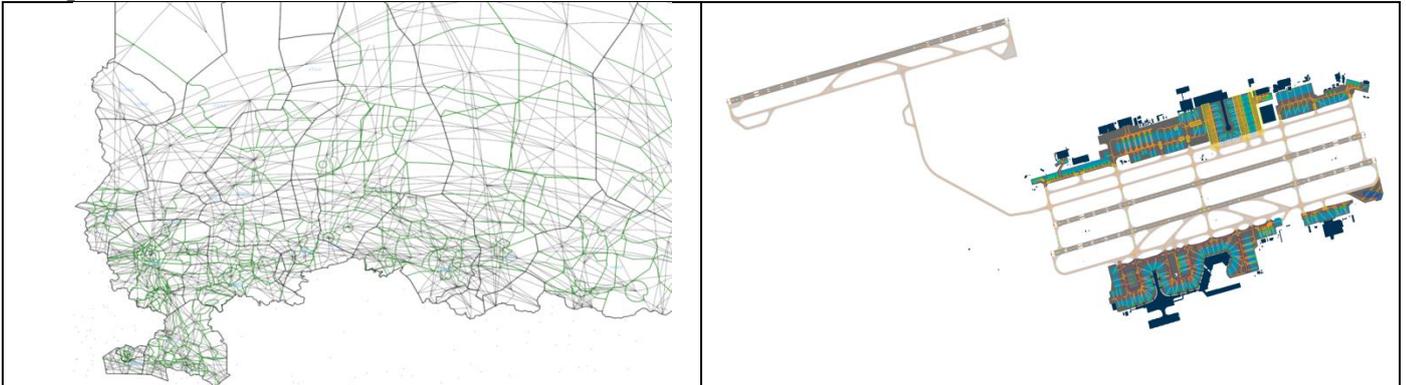


Рисунок 1 - Структура ВП и инфраструктура аэродрома

Критерий эффективности при выборе одного из альтернативных вариантов определяется следующим вектором:

$$W = (W_A, W_B, W_{OpВД}, W_{ПВП}, W_{ПА}, W_{Ср})^T,$$

где каждая группа показателей отражает интересы участников процессов в системе OpВД.

С точки зрения пользователей ВП определена следующая группа:

- показатели, характеризующие эксплуатационную эффективность для пользователей ВП (авиакомпаний) W_a .

Интересы авиационных властей отражают следующие группы показателей:

- безопасность выполнения полетов W_6 ;
- окружающая среда $W_{ср}$.

Для служб, осуществляющих аэронавигационное обслуживание, определены две группы показателей:

- эффективность использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома для системы OpВД $W_{OpВД}$;
- пропускная способность ВП (ПВП) и сложность УВД в секторе $W_{ПВП}$.

Показатели для операторов аэропортов сформулированы в следующей группе:

- пропускная способность аэродрома $W_{ПА}$.

При выборе варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома каждую группу показателей, а также значения показателей в самих группах, требуется максимизировать или минимизировать.

Эффективность использования ВП и аэродрома зависит от условий их применения: интенсивности ВД, метеоусловий, ограничений, накладываемых на ВП (в том числе и временных), технической оснащенности рабочих мест диспетчера. Критерий эффективности для выбора структуры ВП и инфраструктуры аэродрома можно представить в виде следующей функции: $\mathbf{W} = W(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v})$, где заданы аргументы функции:

- структура ВП и инфраструктура аэродрома \bar{s} ;
- алгоритмы управления и средства поддержки диспетчера при УВД и движением ВС по поверхности аэродрома \bar{u} ;

и параметры:

- полетные данные, включающие потоки ВС и их летно-технические характеристики (ЛТХ) \bar{y} ;

- условия выполнения полетов (метеоусловия и ограничения использования ВП) $\bar{\omega}$;
- технология работы диспетчера \bar{v} .

В качестве ограничений задаются целевые значения показателей, которым должен удовлетворять выбранный вариант структуры ВП и инфраструктуры аэродрома:

$$\bar{c} = (c_a, c_6, c_{\text{ПВП}}, c_{\text{ПА}}, c_{\text{окр.ср}}),$$

где c_a - средняя задержка при вылете и прибытии в аэропорт, c_6 – целевые значения уровня безопасности при выполнении полетов (требуемый уровень безопасности при оценке рисков инцидентов), $c_{\text{ПВП}}$ – норматив пропускной способности секторов УВД, коэффициент временной загруженности диспетчеров, $c_{\text{ПА}}$ – заданная целевая ПА, $c_{\text{окр.ср}}$ – заданный уровень шумовых воздействий, вредных выбросов в окружающую среду.

Математическая постановка заключается в решении задачи многомерной условной оптимизации, где по каждой группе показателей требуется оптимизировать (максимизировать или минимизировать) критерий. Задача формулируется следующим образом: при заданных алгоритмах управления потоками ВС и средствах поддержки диспетчера u найти наилучший вариант структуры ВП и инфраструктуры аэродрома $\hat{s}^* = (\hat{s}_{\text{ВП}}, \hat{s}_a)$ среди альтернативных вариантов, при котором показатели обращаются в максимум/минимум, с учетом накладываемых ограничений:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_a = W_1(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \rightarrow^* \min_s, \\ W_6 = W_2(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \rightarrow^* \min_s, \\ W_{\text{ОрВД}} = W_3(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \rightarrow^* \min_s, \\ W_{\text{ПВП}} = W_4(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \rightarrow^* \max_s, \\ W_{\text{ПА}} = W_5(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \rightarrow^* \max_s, \\ W_{\text{ср}} = W_6(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \rightarrow^* \min_s, \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} c_a = B(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \leq c_{\text{задер}}^*, \\ c_6 = F(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \leq c_{\text{TLS}}^*, \\ c_{\text{ПВП1}} = \Phi_1(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \leq c_{\text{НПС}}^*, \\ c_{\text{ПВП2}} = \Phi_2(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \leq c_{\text{КЗ}}^*, \\ c_{\text{ПА}} = R(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \geq c_{\text{ВПО}}^*, \\ c_{\text{шум}} = U(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \leq c_{\text{шум}}^* \end{array} \right.$$

где \rightarrow^* - операция оптимизации вектора по каждой группе показателей.

Во второй главе приводятся математические модели для расчета показателей эффективности системы ОрВД, а также метод выбора рационального варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома.

Для расчёта **показателей эффективности** системы ОрВД были разработаны **математические модели**. Каждая группа показателей определяется вектором, который состоит из показателей. Для каждого из показателей в работе представлены алгоритмы их расчёта. Далее кратко приведены основные показатели и алгоритмы их расчёта.

Так группа показателей безопасности определяется следующим вектором: $W_6 = (W_{\text{ПКС}}, W_{\text{ННЭ}}, W_{\text{инт.ВПП}}, W_{\text{конфл.схем}}, W_{\text{риски}})^T$, где $W_{\text{ПКС}}$ – количество потенциальных конфликтных ситуаций, $W_{\text{ННЭ}}$ – количество нарушений норм эшелонирования, $W_{\text{инт.ВПП}}$ – количество нарушений временных интервалов на ВПП, $W_{\text{конфл.схем}}$ – количество конфликтных схем маневрирования, $W_{\text{риски}}$ – оценка рисков.

В автореферате представлено описание одного из показателей данной группы – количество ПКС. Под ПКС понимается ситуация, требующая вмешательства диспетчера, когда прогнозируется нарушение одновременно вертикальных и горизонтальных норм эшелонирования между ВС. Для вычисления показателя используется расчетно-аналитическое моделирование. Местоположение ВС задается четырьмя координатами: $x_i^f = (lat_i^f, long_i^f, alt_i^f, t_i^f)$, где lat_i^f - широта ВС f в i -й точке траектории, измеряемая в гра-

дусах, $long_i^f$ - долгота ВС f в i -й в точке траектории, alt_i^f - высота ВС f в i -й точке траектории, t_i^f - время нахождения ВС в i -й точке траектории. Нормы эшелонирования характеризуются параметрами зоны безопасности вокруг каждого ВС f . Зона безопасности вокруг каждого ВС представляет собой цилиндр с радиусом $R_{без}$ и высотой $H_{без}$. Для двух любых ВС $f, g \in L, f \neq g$, ПКС $w_{f,g}^{ПКС}$ определяется:

$$w_{f,g}^{ПКС} = \begin{cases} 1, (t_i^f = t_j^g) \wedge (D_{i,j}^{f,g} \leq 2R_{без}) \wedge (|alt_i^f - alt_j^g| < H_{без}), \\ 0 \text{ иначе,} \end{cases}$$

где f – первое ВС, участвующее в ПКС; g – второе ВС, участвующее в ПКС; $D_{i,j}^{f,g}$ - ортодромия между двумя ВС в i -й точке траектории ВС f и в j -й точке траектории ВС g . Тогда показатель «Количество ПКС» находится следующим образом:

$$W_{ПКС} = \sum_{f,g} w_{f,g}^{ПКС}, \forall f, g \in L, f \neq g.$$

Ортодромия между двумя ВС $f, g \in L$, рассчитывается как:

$$D_{i,j}^{f,g} = R_{зем} (\arccos[\sin(lat_i^f) \sin(lat_j^g) + \cos(lat_i^f) \cos(lat_j^g) \cos(long_j^g - long_i^f)])$$

Эффективность для пользователей ВП (авиакомпаний) характеризуется вектором, состоящим из следующих показателей: $W_a = (W_{а.зад}, W_{протяж.марш}, W_{а.налет}, W_{а.топл.эф}, W_{ортодр}, W_{врем.рул})^T$, где $W_{а.зад}$ - задержки воздушных судов, $W_{протяж.марш}$ - протяженность маршрута, $W_{а.налет}$ - налёт (продолжительность полёта), $W_{а.топл.эф}$ - расход топлива, $W_{ортодр}$ - ортодромичность маршрута, $W_{врем.рул}$ - время руления ВС по поверхности аэродрома.

Задержки являются одним из основных показателей для пользователей ВП. Показатель вычисляется с использованием имитационной модели. Для любого ВС $f \in L$, где f - прилетающее или вылетающее ВС, задержка $w^{зад}$ определяется как:

$$w^{зад} = \begin{cases} t_{в_факт}^f - t_{в_план}^f, t_{п_факт}^f - t_{п_план}^f > \varepsilon, \\ 0 & t_{факт}^f - t_{план}^f \leq \varepsilon, \end{cases}$$

где $t_{в_план}$ и $t_{п_план}$ - плановые времена вылета и прибытия, а $t_{в_факт}$ и $t_{п_факт}$ - фактические времена вылета и прибытия, ε - погрешность расчета задержки.

Показатель задержки по всем моделируемым рейсам $W_{а.зад}$ задается средней $W_{а.зад}^{сред}$ и максимальной задержками $W_{а.зад}^{max}$:

$$W_{а.зад}^{сред} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m w_i^{зад}, \quad W_{а.зад}^{max} = \max_i (w_i^{зад}),$$

где m - количество рейсов в моделируемом потоке ВС.

Эффективность для системы ОрВД состоит из показателей, характеризующих использование элементов структуры ВП и равномерность распределения потока ВД по элементам, и определяется вектором: $W_{ОрВД} = (W_{загр.уч.ВТ}, W_{загр.точек.ВП}, W_{эш}, W_{исп.ЗО}, W_{МС})^T$, где $W_{загр.уч.ВТ}$ - показатель неравномерности загруженности участков ВТ, $W_{загр.точек.ВП}$ - показатель неравномерности загруженности точек ВП, $W_{эш}$ - показатель использования ВС неэффективных эшелонов, $W_{исп.ЗО}$ - использование зон ожидания, $W_{МС}$ - показатель неэффективности использования мест стоянок. Одним из основных показателей данной группы является показатель неравномерности загруженности участков ВТ.

Загруженность участка воздушной трассы (ВТ) определяется количеством ВС, которые входят на участок ВТ в интервал времени. Как правило, интервал времени оценки загрузки равен одному календарному часу.

Показатель предназначен для выявления неравномерности распределения трафика через сеть ВТ, а также обнаружения наиболее загруженных участков ВТ. Интенсивность ВД на участках ВТ определяется с использованием расчетно-аналитического моделирования на основе плановых или фактических полетных данных. Загрузка любого i -го участка ВТ $s_{i, \text{участок.ВТ}} \in S_{\text{ВП}}$ любым рейсом f в интервале $[t_{\text{begin}}, t_{\text{end}})$:

$$w_{f, s_{i, \text{участок.ВТ}}}^{\text{загр.уч.ВТ}} = \begin{cases} 1, & s_{i, \text{участок.ВТ}}^f \in [t_{\text{begin}}, t_{\text{end}}), \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases}$$

где $t_{i, \text{участок.ВТ}}^f$ - время входа ВС на участок $s_{i, \text{участок.ВТ}}$ (время пролета первой точки участка), t_{begin} - начало интервала времени оценки, t_{end} - конец интервала времени оценки.

Показатель загруженности i -го участка ВТ на интервале времени оценки для всего потока ВС определяется:

$$W_{\text{загр.уч.ВТ}}^i = \sum_{j=1}^m w_{f_j, s_{i, \text{участок.ВТ}}}^{\text{загр.уч.ВТ}}.$$

Загруженность всех участков ВТ задается вектором: $(W_{\text{загр.уч.ВТ}}^1, \dots, W_{\text{загр.уч.ВТ}}^i, \dots, W_{\text{загр.уч.ВТ}}^n)^T$, где n - количество участков ВТ в структуре ВП.

Показатель неравномерности загруженности участков ВТ рассчитывается как средне-квадратичное отклонение:

$$W_{\text{загр.уч.ВТ}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W_{\text{загр.уч.ВТ}}^i - M(W_{\text{загр.уч.ВТ}}))^2}{n}}, \quad \text{где } M(W_{\text{загр.уч.ВТ}}) = \frac{\sum_{i=1}^n W_{\text{загр.уч.ВТ}}^i}{n}.$$

Использование структуры ВП и инфраструктуры аэродрома для авиаперевозок ограничивается их пропускной способностью. Для анализа пропускной способности определены две группы: для ВП: $W_{\text{ВП}} = (W_{\text{врем.загр.дисп}}, W_{\text{сек}})^T$, где $W_{\text{врем.загр.дисп}}$ - равномерность временной загруженности диспетчера, $W_{\text{сек}}$ - загрузка секторов без превышения норматива пропускной способности (НПС) сектора; для аэродрома $W_{\text{ПА}} = (W_{\text{ВПО}}, W_{\text{пересеч}})^T$, где $W_{\text{ВПО}}$ - количество взлетно-посадочных операций (ВПО), $W_{\text{пересеч}}$ - количество аэродромных операций без пересечения ВПП.

Основным показателем, характеризующим пропускную способность ВП, является $W_{\text{сек}}$ - загрузка секторов без превышения НПС сектора. Под загрузкой сектора понимается интенсивность ВД в секторе, определяемая количеством входов ВС в зону ответственности диспетчера за единицу времени. Загрузка любого i -го сектора $s_{i, \text{сек}} \in S_{\text{ВП}}$ любым рейсом f в

интервале $[t_{\text{begin}}, t_{\text{end}})$ определяется как:

$$w_{f, s_{i, \text{сек}}}^{\text{сек}} = \begin{cases} 1, & t_{s_{i, \text{сек}}}^f \in [t_{\text{begin}}, t_{\text{end}}), \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases}$$

где $t_{i, \text{сек}}^f$ - время влета рейса f в сектор $s_{i, \text{сек}}$, t_{begin} - начало интервала времени оценки, t_{end} - конец интервала времени оценки.

Показатель загруженности i -го сектора на интервале времени оценки:

$$W_{\text{сек}}^i = \sum_{j=1}^m w_{f_j, s_{i, \text{сек}}}^{\text{сек}}.$$

Загруженность по секторам на интервале времени оценки задается в виде вектора: $(W_{\text{сек}}^1, \dots, W_{\text{сек}}^i, \dots, W_{\text{сек}}^n)^T$, где n - количество секторов в структуре ВП.

Показатель загрузки секторов без превышения НПС рассчитывается как:

$$W_{\text{сек}} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (W_{\text{НПС}}^i - W_{\text{сек}}^i)}, \quad \text{где } W_{\text{НПС}}^i - \text{НПС } i\text{-го сектора.}$$

Пропускная способность аэродрома заключается в количестве взлётно-посадочных операций. Поэтому основным является показатель $W_{\text{ВПО}}$ - количество ВПО. Пропускная способность определяется количеством ВПО, которые способен обслужить аэродром в единицу времени. За единицу времени принимается 1 ч.

В составе КИМ ОрВД реализована методика расчета ПА (количества ВПО) на основе допустимого уровня задержек как в воздухе, так и на земле. Оценка количества ВПО производится с использованием имитационного моделирования.

Количество ВПО в i -й интервал времени: $W_{\text{ВПО}}^i = \sum_j w_{j\text{ВПО}}^i$,

где $w_{j\text{ВПО}}^i$ - вылет или прилет j -го ВС в i -й интервал времени.

Выполнение авиаперевозок оказывает негативное влияние на окружающую среду. Поэтому была определена группа показателей влияния на окружающую среду $W_{\text{ср}}$, которая состоит из следующих показателей: $W_{\text{ср}} = (W_{\text{шум}}, W_{\text{CO}_2})^T$, где $W_{\text{шум}}$ - шумовые воздействия, W_{CO_2} - выбросы вредных веществ.

Оценка уровня шума в последнее время приобретает актуальность ввиду близкой застройки жилых кварталов к аэродромам и ростом интенсивности ВД. Расчет производится по результатам имитационного моделирования управляемых полетов ВС в районе аэродрома или аэроузла и реализуется в соответствии с методикой. Для оценки строятся контуры шума (значения индекса шума) вокруг аэродрома.

Эквивалентный взвешенный уровень шума в точке определяется как

$$W_{\text{шум}} = 10 \log \left(\frac{1}{T_0} \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{E,i} + \Delta_i}{10}} \right),$$

где T_0 – период, для которого рассчитывается контур шума, $L_{E,i}$ – уровень звука единичного воздействия, N – количество шумовых событий, Δ_i – весовой коэффициент i -го события (в соответствии со временем суток).

Показатель W_{CO_2} определяет массу выбросов вредных веществ CO_2 в окружающую среду. Расчет производится по результатам имитационного моделирования на основе траекторий полета ВС. Масса выбросов CO_2 i -го ВС рассчитывается как $M_{\text{CO}_2}^i = 3.12M_T^i$, где M_T^i - масса израсходованного топлива i -м ВС.

Показатель по всем ВС определяется следующим образом: $W_{\text{CO}_2} = \sum_i M_{\text{CO}_2}^i$.

Задача выбора рационального варианта представляет собой задачу структурного синтеза, которая для сложных технических систем (система ОрВД является сложной организационно-технической системой) решается на практике путем выбора из ограниченного ряда спроектированных вариантов структуры на основе оценки их эффективности. Алгоритм решения многокритериальной задачи выбора наилучшего варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома заключается в выборе одного оптимального варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома из дискретного множества $S = \{\bar{s}_1, \bar{s}_2, \dots, \bar{s}_j, \dots, \bar{s}_M\}$ с использованием метода последовательных уступок. При этом экспертами определяется приоритетность показателей: согласно требованиям ИКАО, наиболее важным будет показатель W_6 , за ним в порядке убывания важности следуют показате-

тели эффективности для пользователей ВП W_a , затем показатели пропускной способности $W_{ПВП}$, $W_{ПА}$ и далее - остальные группы показателей $W_{ср}$, $W_{ОрВД}$. Поскольку показатели эффективности использования ВП и инфраструктуры аэродрома W_6 , W_a , $W_{ПВП}$, $W_{ПА}$, $W_{ОрВД}$, $W_{ср}$, в свою очередь, представляют собой векторы, элементы векторов также упорядочиваются по важности.

Третья глава посвящена программному комплексу имитационного моделирования, разработке архитектуры и схемы взаимодействия моделей. Представлены математические модели, алгоритмы и ключевые решения комплекса моделирования.

Задача оценки альтернативных вариантов структуры ВП решается с использованием комплекса имитационного моделирования системы ОрВД, который был разработан в интересах российского провайдера аэронавигационных услуг ФГУП «Госкорпорация по ОрВД». В составе программного комплекса реализованы расчетные и имитационные модели для вычисления показателей и предназначен для поддержки принятия решений экспертами системы ОрВД. Комплекс состоит из ряда программных средств (ПС), разделенных по функциональному назначению. Функционирование обеспечивается через базу данных (БД) КИМ ОрВД, реализованную под управлением СУБД Oracle. На рисунке 2 представлен состав программных средств и функциональная схема комплекса.



Рисунок 2 - Состав программных средств и функциональная схема комплекса

Каждое ПС в составе комплекса обеспечивает решение определенного объема задач:

- ПС «Импортирование данных из ЦБД» - ПС предназначено для импортирования и обработки информации из различных источников и форматов данных в БД КИМ ОрВД. Импортирование происходит в автоматическом режиме.
- ПС «Исследование ОрВД» - ПС предназначено для автоматизированного формирования и подготовки моделируемого варианта данных, включая поток ВД, структуру ВП и системы ОрВД, условий выполнения полетов, также выполнения расчетного моделирования по оценке использования ВП и эффективности системы.
- ПС «Имитация полетов ВС» - ПС предназначено для оценки предложений по организации ВП и реконфигурации маршрутов с учетом внедрения перспективных методов навигации, основанных на характеристиках, при обслуживании ВД на трассах, в зонах подхода и аэродрома. Программное средство основано на имитационном моделировании.
- ПС «Имитационная математическая модель оценки безопасности полетов» - ПС предназначено для проведения исследований, поддерживающих оценку безопасности полетов в заданных условиях.

Архитектура комплекса реализована на модульной платформе, что позволяет использовать только те модели, которые необходимы для конкретных исследований. На рисунке 3 представлена схема взаимодействия и информационные связи моделей.

По функциональному назначению модели делятся на группы: подготовка данных, синтез структуры ВП и потоков ВС, имитационное и расчетное моделирование, расчет показателей.

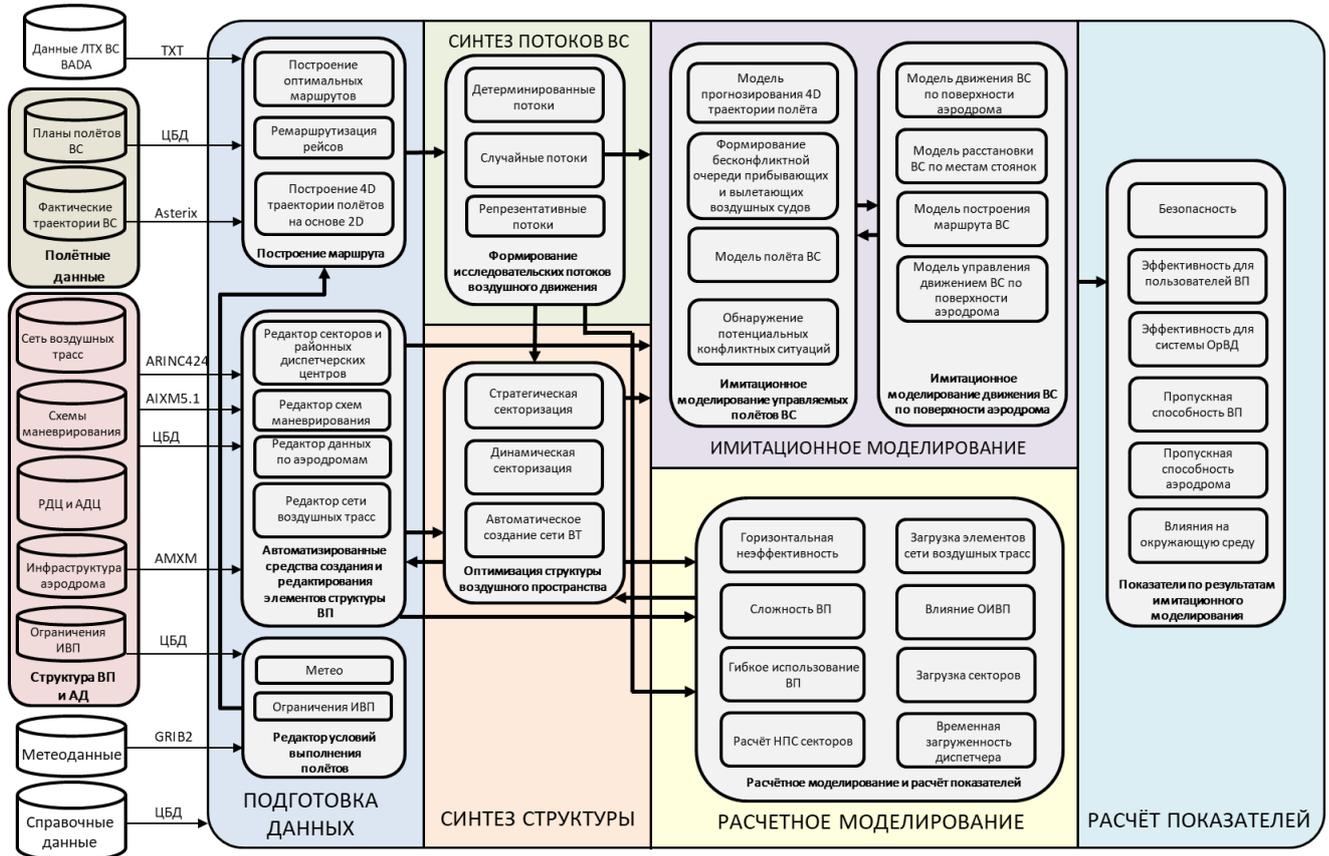


Рисунок 3 - Архитектура и схема взаимодействия моделей.

На рисунке 4 представлены скриншоты 2D и 3D визуализация и интерфейсные решения комплекса моделирования.

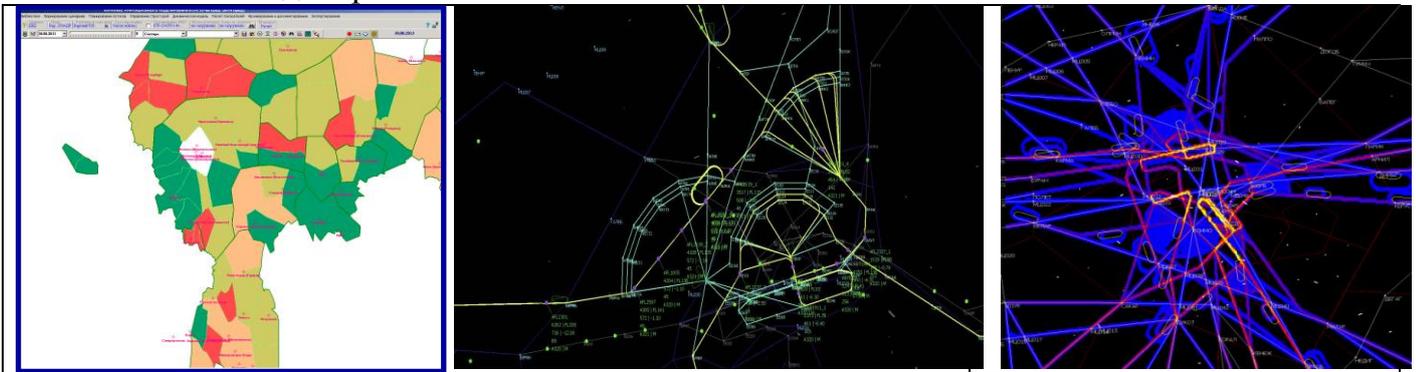


Рисунок 4 - Визуализация процесса моделирования и интерфейсные решения комплекса

На каждом этапе проведения исследований решается ряд задач, в которых находят применение численные методы: на этапе подготовки полётных данных решается задача построения кратчайшего маршрута на основе алгоритма Дейкстры, на этапе моделирования оптимизируется расстановка ВС по местам стоянок с использованием численного метода имитации отжига и строится кратчайший маршрут движения ВС по поверхности аэродрома с использованием алгоритма A^* , в модели полёта ВС производится численное интегрирование методом Эйлера. По результатам моделирования для расчета пропускной способности аэродрома используется аппроксимация полиномом результатов моделирования и выявление зависимости задержек от интенсивности ВД. Комплекс имитационного моделирования является, в том числе, базой для исследования численных методов как для решения локальных задач (поиск кратчайших маршрутов, оптимизация структуры и потоков), так и для решения комплексных задач по оценке использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома.

Для создания исследовательских прогнозных потоков ВД был разработан **алгоритм формирования случайных потоков ВД** с использованием бета-распределения. Потоки

ВД предназначены для исследования существующего и перспективных вариантов структуры ВП и инфраструктуры аэродрома. Для проведения имитационного моделирования полётов воздушных судов в диспетчерской зоне района аэродрома была реализована модель **формирования бесконфликтного очереди прибывающих и вылетающих воздушных судов**. Основной задачей модели является формирование бесконфликтных потоков ВС в моделируемом ВП, прибывающих и вылетающих с моделируемых аэродромов. В процессе моделирования для обеспечения бесконфликтного полета ВС, а также для оценки показателей безопасности требуется прогнозирование и **обнаружение потенциальных конфликтных ситуаций**. Модель среднесрочного обнаружения потенциальных конфликтных ситуаций в процессе имитационного моделирования имитирует работу АС УВД, а также работу диспетчера в части обнаружения ПКС.

В **четвертой главе** приводится методика проведения исследований по анализу эффективности использования ВП и инфраструктуры аэродрома и пример проведения исследований по оценке эффективности их использования. Методика основана на моделировании процессов ОрВД. В зависимости от целей и области моделирования применяется расчетное или имитационное моделирование. Для исследования верхнего воздушного пространства используются и расчётное и имитационное моделирование, но в основном последнее. Метод основан на использовании математических моделей, которые предназначены для следующих видов расчетов: расчет загрузки и интенсивности в элементах структуры ВП, расчет количества ПКС. Метод расчета показателей с использованием имитационных моделей применяется для оценки процессов ОрВД преимущественно в диспетчерской зоне района аэродрома или терминальной зоне авиаузла, где происходит интенсивное маневрирование ВС.

Исследования состоят из пяти этапов, представленных на рисунке 6.



Рисунок 6 - Общая схема проведения исследований

Проведение исследований по оценке структуры ВП и инфраструктура аэродрома в зависимости от области моделирования можно разделить на три типовые задачи:

- Задача 1. Оценка эксплуатационных характеристик проектируемой структуры верхнего ВП на основе сравнительного анализа с действующей;
- Задача 2. Оценка эксплуатационных характеристик терминальной зоны (диспетчерской зоны района аэродрома) проектируемой структуры ВП с учетом полетов ВС по маршруту на основе сравнительного анализа с действующей структурой ВП методами имитационного и расчётного моделирования ВП.
- Задача 3. Комплексная оценка эксплуатационных характеристик терминальной зоны (диспетчерской зоны района аэродрома) проектируемой структуры ВП с учетом как полетов ВС по маршруту, так и движения ВС по поверхности аэродромов (аэродрома) на основе сравнительного анализа с действующей методами имитационного моделирования.

Исследования основывались на моделировании и сравнительном анализе трех вариантов структуры воздушного пространства. Исследуются три варианта структуры ВП Московской зоны ЕС ОрВД. Один из вариантов является действующей на период проведения исследований структурой ВП (Вариант 1), а два других перспективных варианта, разработанных в рамках процессов модернизации системы ОрВД (Варианты 2 и 3).

В части исходных данных использовались данные по потокам ВД, которые соответствуют плановым полетным данным (фактическое расписание) за 30.06.2014. Данные по структуре ВП по каждому варианту включали в себя: точки ВП, участки ВТ, каталог маршрутов Московской зоны ЕС ОрВД и другие данные.

На первом этапе согласно методике оценки были выбраны ключевые показатели эффективности и определены условия моделирования. На втором этапе была проведена подготовка данных, которая заключалась, в том числе: в создании сценариев по каждому варианту структуры воздушного пространства, анализе исходных потоков ВД на основные аэродромы МУДР, а также ремаршрутизации исходных потоков ВД и создании прогнозных увеличенных в 1,5 раза по интенсивности случайных потоков ВД.

На следующем этапе было проведено имитационное моделирование управляемых полетов ВС в пределах Московской зоны ЕС ОрВД, включая ВП районов аэродромов Шереметьево, Внуково и Домодедово с использованием модели построения бесконфликтной очереди прибывающих и вылетающих воздушных судов и обнаружения ПКС для трех вариантов структуры ВП в условиях прогнозных потоков ВД. Моделирование было проведено для каждого из трех вариантов.

На рисунке 7 представлен пример полученных результатов моделирования, которые использовались для расчёта показателей эффективности в перспективных условиях.

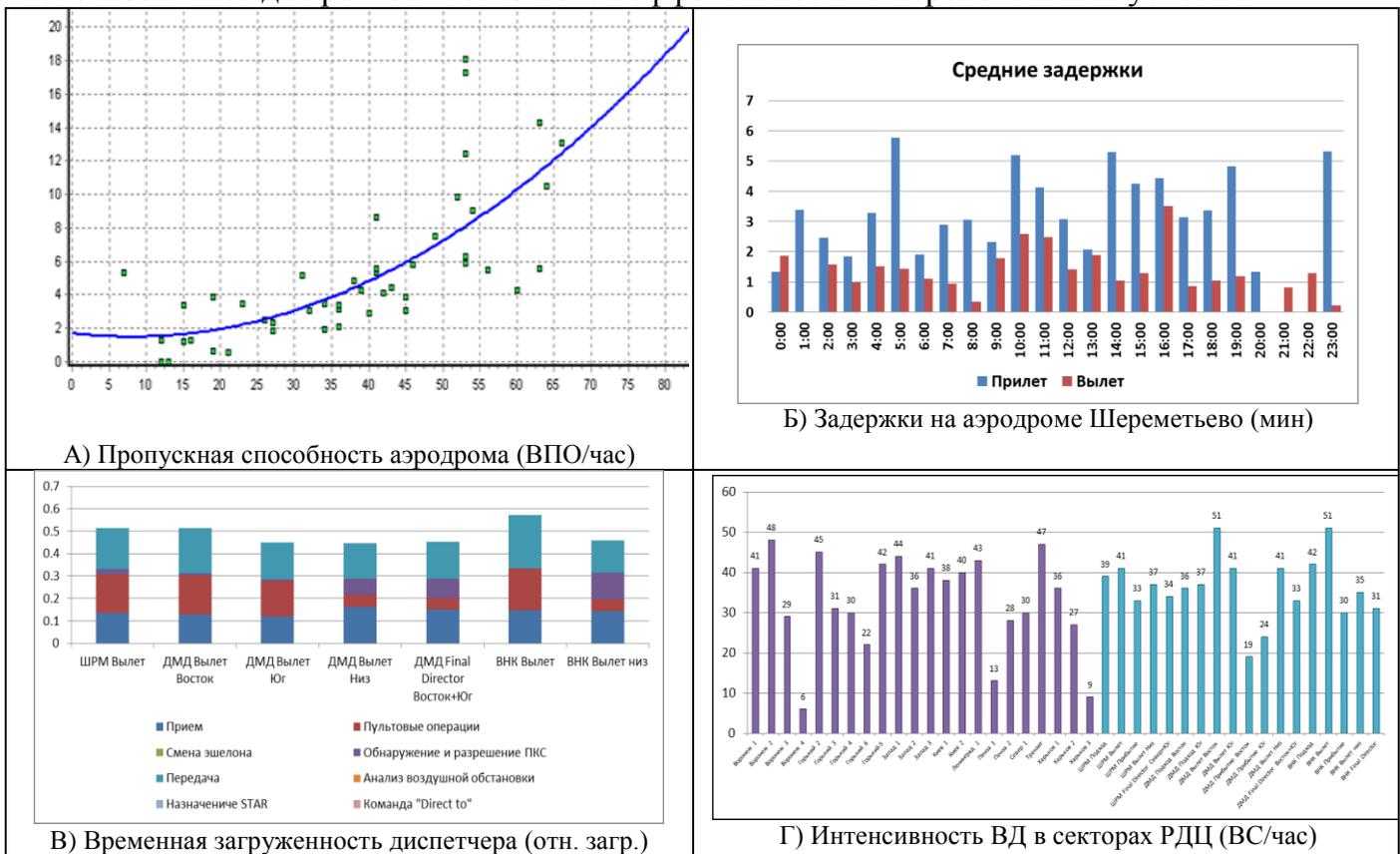


Рисунок 7. Результаты моделирования для расчета показателей эффективности

На основе полученных результатов моделирования были рассчитаны показатели эффективности, представленные во второй главе. Значения показателей отображены в таблице 1.

На рисунке 8 дано графическое представление исследуемых вариантов. Для графического представления все показатели были нормированы к значениям от 0 до 1. Для j -го

показателя i -го варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома $x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - x_{\min j}}{x_{\max j} - x_{\min j}}$,

где x_{ij} - значение j -го показателя до нормирования, $x_{\min j} = 0$, $x_{\max j} = \sum_{i=1}^3 x_{ij}$. Так как по не-

которым группам показателей необходимо минимизировать критерий, а по другим максимизировать, то для удобства графического представления часть результатов показателей, которые необходимо было минимизировать, была преобразована: $W_j^* = 1 - W_j$.

Таблица 1 - Значения рассчитанных показателей

Группа показателей	Показатель	Вар. 1	Вар. 2	Вар. 3
Безопасность (W_6)	Количество ПКС ($W_{ПКС}$)	6457	2680	2602
Эффективность для пользователей ВП (W_a)	Протяженность маршрута ($W_{протяж.марш}$), км	711	666	632
	Задержки ($W_{a.зад}$), мин	36	9	9
	Расход топлива ($W_{a.топл.эф}$), кг/рейс	2795	2665	2671
	Налет (продолжительность полета) ($W_{a.налет}$), мин/рейс	62	57	56
Пропускная способность ВП ($W_{ВП}$)	Равномерность временной загруженности диспетчера ($W_{врем.загр.дисп}$),	0.5	0.83	0.82
	Загрузка секторов без превышения НПС сектора ($W_{сек}$), сектор-час/рейс	10.4	22.5	22.3
Пропускная способность аэродрома ($W_{ПА}$)	Количество ВПО ($W_{ВПО}$), ВПО/час	140	158	159
Эффективность для системы ОрВД ($W_{ОрВД}$)	Неравномерность загруженности участков ВТ ($W_{загр.уч.ВТ}$), ВС/час	73	85	76
	Неравномерность загруженности точек ВП ($W_{загр.точек.ВП}$), ВС/час	122	110	100
	Использование зон ожидания ($W_{исп.зо}$)	51.5	9.16	8.7
Влияние на окружающую среду (W_{cp})	Выбросы вредных веществ (W_{CO_2}), тыс. кг/рейс	8.72	8.314	8.333

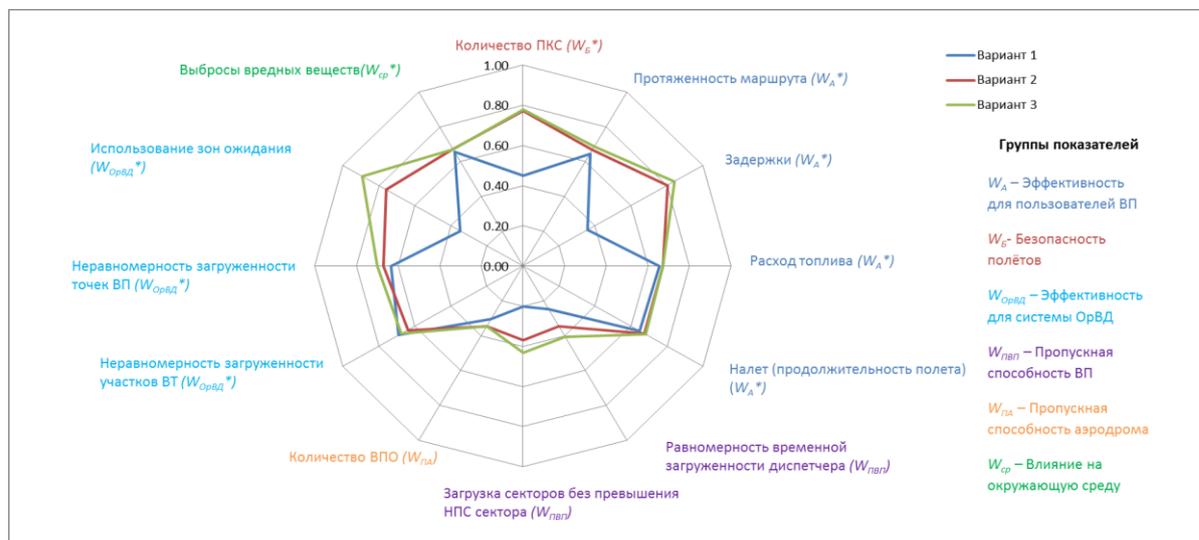


Рисунок 8 - Графическое представление результатов расчета показателей по трем вариантам структуры ВП и инфраструктуры аэродрома

Анализ полученных результатов показывает, что оба варианта перспективной структуры (Варианты 2 и 3) превосходят базовый вариант структуры (Вариант 1). С использованием предложенного метода был выбран Вариант 3, который оказался предпочтительнее остальных двух вариантов. На основе анализа результатов были предложены рекомендации по оптимизации выбранного варианта структуры ВП.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена научная задача разработки методов, математических моделей и комплекса программ для выбора структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома на основе анализа эффективности их использования.

Основные научно-методические и практические результаты работы состоят в следующем:

1. Проведен анализ опыта применения математического моделирования при решении задачи оценки эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, обоснована актуальность и сформулированы задачи исследования.
2. Разработаны математические модели и алгоритмы, позволяющие комплексно описать элементы системы ОрВД, их функционирование и процессы взаимодействия между ними.
3. Разработана система показателей эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, дающая возможность всесторонне и объективно провести оценку эффективности, а также разработаны математические модели для их расчета.
4. Разработан метод выбора рационального варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома.
5. Разработана методика оценки эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, позволяющая на основе разработанной системы показателей количественно оценить характеристики каждого из рассматриваемых вариантов структуры ВП и инфраструктуры аэродрома в интересах выбора рационального варианта.
6. Разработаны архитектура и схема взаимодействия математических моделей в составе комплекса имитационного моделирования.
7. Разработан комплекс программ имитационного моделирования системы ОрВД по оценке эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома.
8. Проведены исследования по оценке и выбору одного из альтернативных вариантов структуры ВП с использованием разработанных методов, математических моделей и комплекса имитационного моделирования системы ОрВД.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

В рецензируемых научных журналах и изданиях, входящих в Перечень Высшей аттестационной комиссии Российской Федерации и международных систем цитирования

1. Обухов Ю.В., Попов А.С., Орлов В.С., Котова А. О. Применение имитационного моделирования для оценки безопасности полетов // Тр. МАИ. 2015. №81, (№2030, перечень ВАК (2015-2018)).
2. Попов А.С., Обухов Ю.В., Сикачев В.Ю. Оценка безопасности полетов в одном из вариантов перспективной структуры московского районного центра с применением имитационного моделирования // Тр. ГосНИИАС. Сер.: Вопросы авионики. 2018. №2(35). С. 3-17, (№2020, перечень ВАК (2015-2018)).
3. Попов А.С., Стороженко С. Р. Формирование случайных потоков воздушного движения с использованием бета-распределения для имитационного моделирования полетов воздушных судов, Труды ГосНИИАС, №1(34), с.23-40, 2018 (№2020, перечень ВАК (2015-2018)).
4. Попов А.С., Скавинская Д.В. Формирование бесконфликтных потоков воздушного движения для оценки эффективности полетов воздушных судов районе аэроузла// Труды ГосНИИАС, Серия: Вопросы авионики, №2(35), 2018, С. 18-38 (№1730, перечень ВАК от 29.03.2022 г.).
5. Попов А.С., Методика проведения исследований по анализу эффективности использования воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома, // «Труды ГосНИИАС, Серия: Вопросы авионики, №4(55), 2021, с.47-64 (№2342, перечень ВАК от 29.03.2022 г.).
6. Вишнякова Л.В., Попов А.С., Выбор структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродромов при их модернизации методами математического моделирования, Журнал: «Известия РАН. Теория и системы управления», 2021, № 6, с.66-105 (№123 перечень ВАК МРБД и СИ).
7. Vyshnyakova L.V., Popov A.S., Selection of Airspace Structure and Aerodrome Infrastructure During Their Modernization by Methods of Mathematical Modeling, Journal of Computer and Systems Sciences International, 2021, Vol. 60, No. 6, pp 918-955 (Scopus, Web of Science).

8. Вишнякова Л.В., Попов А.С., Сикачев В.Ю., Петрова А.В., Скавинская Д.В., Комплекс имитационного моделирования системы организации воздушного движения, Журнал «Полёт», 2021, №7, с. 22-37 (№1730, перечень ВАК от 29.03.2022 г.).

В других журналах и сборниках научных трудов

9. Попов А.С., Вишнякова Л.В., Дегтярев О.В. Комплекс имитационного моделирования организации воздушного движения (КИМ ОрВД) // Всерос. науч.-практич. конф. по имитационному моделированию социально-экономических систем (ВКИМСЭС). Труды конференции М., 2012, с.59-67.

10. Попов А.С., Минаенко В.Н., Оценка ПС аэродромного ВП с использованием имитационного моделирования на примере аэропорта Сочи, ФГУП ГосНИИАС // «Моделирование авиационных систем», 2013. Труды конференции.с. 154-155.

11. A.S. Popov, The Russian Federation Airspace Structure Analysis with the Use of ATM Research Simulation Tool, Proceedings of the 4:th Council of European Aerospace Societies (CEAS) Air and Space Conference in Linkoping, 2013, p.569-578.

12. Попов А.С., Вишнякова Л.В., Сикачев В.Ю. Имитационное моделирование системы организации воздушного движения // Седьмая всерос. науч.-практич. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2015), Труды конференций, Т.1 Пленарные доклады – М.:ИПУ РАН, 2015, с.23-24.

13. Стороженко С.Р., Попов А.С. Формирование случайных потоков воздушного движения прогнозной интенсивности для моделирования полетов воздушных судов в верхнем воздушном пространстве и в терминальной зоне аэродрома (аэроузла), сборник докладов конф. «Авиационные системы в XXI веке», 2017, с. 303-310.

14. Суслов Д.Д., Попов А.С., Сикачев В.Ю. Особенности моделирования 4D траекторий полётов воздушных судов на всех этапах полёта в составе комплекса имитационного моделирования (КИМ ОрВД), сборник докладов конф. «Авиационные системы в XXI веке», 2017, с. 311-317.

15. Popov A.S., Storozhenko S.R. Air traffic flow forecast in the period of major events based on cost-effectiveness optimization, 2nd International Conference on Traffic Engineering (ICTE17), 2nd International Conference on Traffic Engineering (ICTE17), Spain, Barcelona, 2017 Proceedings of the 2nd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering, international ASET Inc., p. No 120/1-120/7.

16. Попов А.С., Вересов К.А., Оценка уровня шума в районе аэродрома с применением имитационного моделирования, Авиационные системы в XXI веке. Тезисы докладов юбилейной Всерос. науч.-технич. конф. Москва, 2022. С. 220-221.

17. Попов А.С., Петрова А.В., Котова А.О. Методика и результаты исследований по оценке пропускной способности аэродромов Московского авиационного узла с учётом развития международного авиационного трансфера, Авиационные системы в XXI веке. Тезисы докладов юбил. Всерос. науч.-технич. конф. Москва, 2022.с. 218.

18. Попов А.С. Определение системы показателей оценки эксплуатационных характеристик функционирования системы ОрВД, Авиационные системы в XXI веке. Тезисы докладов юбилейной Всерос. науч.-технич. конф. Москва, 2022. С. 216-217.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

19. Попов А.С., Вишнякова Л.В., Сикачев В.Ю., Скавинская Д.В., Вересов К.А., Обухов Ю.В., Суслов Д.Д., Глебов С.М., Егоркина А.В., Стороженко С.Р., Березнев Е.В. Программное обеспечение «Имитация полетов воздушных судов». Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017619766. Дата регистрации: 03 июля 2017 г.

20. Попов А.С., Топин В.А., Вересов К.А., Кибзун Ю.А., Новомлинский И.В., Погорелов Н.А. Программное обеспечение «Дизайнер АМДВ». Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2021680738. Дата регистрации 14 декабря 2021 г.

21. Попов А.С., Вишнякова Л.В., Вересов К.А., Сикачев В.Ю., Топин В.А., Кибзун Ю.А., Новомлинский И.В., Обухов Ю.В., Погорелов Н.А., Файзрахманов А.Э. Программное обеспечение «Имитационная модель аэродрома (СимАП)» Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2022619235. Дата регистрации 14 мая 2022 г.