

Федеральное автономное учреждение
«Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»

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**

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

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель

д.т.н., профессор,

Вишнякова Л.В.

Москва, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	5
ВВЕДЕНИЕ	8
ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ВП И ИНФРАСТРУКТУРЫ АЭРОДРОМА ПРИ ИХ МОДЕРНИЗАЦИИ	
1.1. Обоснование целесообразности применения моделирования.....	20
1.2. Анализ опыта применения моделирования при решении задачи анализа эффективности использования воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома...23	23
1.2.1. Моделируемые процессы в области организации воздушного движения	23
1.2.2. Общие принципы построения средств имитационного моделирования.....	28
1.2.3 Анализ существующих средств имитационного моделирования.....	31
1.2.4. Применение имитационного моделирования при решении задачи анализа эффективности использования воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома	32
1.3. Постановка задачи поиска оптимальной структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома.....	33
1.3.1. Показатели эффективности использования воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома	33
1.3.2. Группы параметров, определяющие показатели эффективности	37
1.3.3. Структура воздушного пространства и инфраструктура аэродрома.....	38
1.3.4. Условия использования структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома	41
1.3.5. Система ограничений по показателям эффективности.....	42
1.3.6. Математическая постановка задачи	46
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ОРВД И МЕТОД ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА СТРУКТУРЫ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА И ИНФРАСТРУКТУРЫ АЭРОДРОМА.....	
	47

2.1. Математические модели и алгоритмы расчёта показателей эффективности системы ОрВД	47
2.1.1. Модели расчета показателей безопасности полетов W_6	47
2.1.2 Модели расчета показателей эксплуатационной эффективности для пользователей ВП W_a	55
2.1.3. Модели расчета показателей эффективности для системы ОрВД $W_{\text{ОрВД}}$	61
2.1.4. Модели расчета показателей ПВП $W_{\text{ПВП}}$	66
2.1.5. Модели расчета показателей ПА $W_{\text{ПА}}$	68
2.1.6. Модели расчета показателей влияния на окружающую среду $W_{\text{ср}}$	71
2.2. Метод решения многокритериальной задачи выбора наилучшего варианта структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома	73
ГЛАВА 3. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ.....	79
3.1. Структура и состав программного комплекса КИМ ОрВД	79
3.2. Архитектура и схема взаимодействия моделей	84
3.3. Расчётное моделирование верхнего воздушного пространства	89
3.4. Имитационное моделирование управляемых полётов воздушных судов в диспетчерской зоне района аэродрома (аэроузла)	92
3.4.1. Модель прогнозирования 4D траектории полета	92
3.4.2. Модель полета ВС	95
3.4.3. Имитационная модель диспетчерского управления	96
3.4.4. Модель обнаружения потенциальных конфликтных ситуаций	98
3.4.5. Модель построения бесконфликтной очереди на прилет/вылет	98
3.5. Имитационное моделирование движения воздушных судов по поверхности аэродрома	99
3.5.1. Управление движением воздушных судов по поверхности аэродрома	99
3.5.2. Модель движения воздушных судов по поверхности аэродрома	102
3.5.3. Модель обнаружения потенциальных конфликтных ситуаций на поверхности аэродрома	103
3.5.4. Модель регулирования движения ВС на поверхности аэродрома, включая ВПП.	104
3.6. Алгоритмы и ключевые решения для обеспечения проведения моделирования .	105
3.6.1. Алгоритм формирования случайных потоков ВС	105

3.6.2. Алгоритм формирования бесконфликтной очереди	109
3.6.3. Алгоритм обнаружения потенциальных конфликтных ситуаций	115
3.6.4. Алгоритм расстановки ВС по местам стоянок.....	120
3.6.5. Алгоритм построения маршрутов движения ВС по поверхности аэродрома	123
ГЛАВА 4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО АНАЛИЗУ	
ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА И	
ИНФРАСТРУКТУРЫ АЭРОДРОМА И ПРИМЕР ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ	
ПО ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ВОЗДУШНОГО	
ПРОСТРАНСТВА И ИНФРАСТРУКТУРЫ АЭРОДРОМА.....	
	127
4.1. Общая схема проведения исследований	127
4.2. Исследовательские задачи.....	135
4.3. Оценка эффективности использования структуры воздушного пространства	
Московской зоны ЕС ОрВД	138
4.3.1. Исходные данные.....	138
4.3.2. Анализ полётных данных.....	140
4.3.3. Показатели эффективности для оценки структуры ВП	143
4.3.4. Имитационное моделирование	145
4.3.5. Результаты моделирования	148
4.3.6. Выводы по результатам моделирования	153
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	157
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	159

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

AMAN	Arrival Manager (управление прилетом)
Approach	маршруты захода на посадку
BADA	base of aircraft data (база данных ЛТХ ВС)
DMAN	Departure Manager (управление вылетом)
PBN	performance based navigation
RNP	required navigation performance (требуемые навигационные характеристики)
STAR	Standard terminal arrival route (стандартный маршрут прибытия)
SID	Standard instrument departure (стандартный маршрут вылета)
АДЦ	аэродромный диспетчерский центр
АС УВД	автоматизированная система управления воздушным движением
БД	база данных
БП	безопасность полетов
ВД	воздушное движение
ВО	воздушная обстановка
ВП	воздушное пространство
ВПО	взлетно-посадочная операция
ВПП	взлетно-посадочная полоса
ВС	воздушное судно
ВТ	воздушные трассы
ДП	диспетчерская позиция
ДПК	диспетчер процедурного контроля
ДРЛУ	диспетчер радиолокационного управления
ДСС	диспетчер соседнего сектора
ЕС ОрВД	Единая система организации воздушного движения

ЗО	зона ожидания
ИВД	интенсивность воздушного движения
ИВП	использование воздушного пространства
ИКАО	международная организация гражданской авиации
ИМ	имитационное моделирование
ЛПД	линии передачи данных
ЛТХ	летно-технические характеристики
МДЛА	модель динамики летательного аппарата
МДУ	модель диспетчерского управления
МЗ	Московская зона
МНК	метод наименьших квадратов
МС	место стоянки
МУДР	Московский узловой диспетчерский район
НИР	научно-исследовательская работа
НМЭ	нарушение минимумов эшелонирования
ННЭ	нарушение норм эшелонирований
НПС	нормативы пропускной способности
ОВД	обслуживание воздушного движения
ОИВП	ограничения использования воздушного пространства
ОПВД	организация потоков воздушного движения
ОрВД	организация воздушного движения
ПА	пропускная способность аэродрома
ПВП	пропускная способность воздушного пространства
ПКС	потенциально конфликтная ситуация
ПОД	пункт обязательного донесения
ППМ	пункт перемены маршрута

ПС	программное средство
РДЦ	районный диспетчерский центр
РЦ	районный центр
СКО	среднеквадратичное отклонение
СУБД	система управления базой данных
СУВД	система управления воздушным движением
ТТХ	тактико-технические характеристики
УВД	управление воздушным движением
ЦБД	центральный банк данных

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Система организации и управления воздушным движением является сложной системой, которая состоит из обслуживания воздушного движения (ОВД), организации потоков воздушного движения (ОПВД) и воздушного пространства (ВП) [1]. Система включает в себя большое число взаимосвязанных элементов (воздушные суда, автоматизированные системы управления воздушным движением, системы наблюдения и навигации, и т.д), взаимодействующих между собой в процессе её функционирования [2]. Основной целью данной системы, согласно Глобальному аэронавигационному плану, является обеспечение качественного и эффективного обслуживания полетов воздушных судов с соблюдением требуемого уровня безопасности выполнения полетов [3].

В условиях роста интенсивности воздушного движения (ВД) возникает задача обеспечения безопасности и эффективности выполнения полетов, а также обеспечения баланса между пропускной способностью и потребностью в выполнении полетов. Одним из способов обеспечения выполнения полетов в прогнозных условиях роста интенсивности ВД является совершенствование структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома. Структура воздушного пространства включает в себя зоны, районы и маршруты обслуживания воздушного движения (воздушные трассы, маршруты вылета, прибытия и захода на посадку, местные воздушные линии и т.д.), районы аэродромов и аэроузлов, зоны ограничения использования воздушного пространства [4]. Под инфраструктурой аэродрома понимается комплекс взлетно-посадочных полос, сеть рулежных дорожек, перрон и места стоянок.

Проектирование новой структуры воздушного пространства является сложным, многоэтапным, многокритериальным процессом, в котором на каждом этапе проектирования должны быть задействованы специалисты соответствующего профиля и квалификации. В состав заинтересованных участников системы ОрВД при модернизации структуры ВП и инфраструктуры аэродрома входят: авиационные власти, эксплуатанты (пользователи ВП), аэропорты и провайдеры аэронавигационных услуг. Пользователями ВП являются физические и юридические лица, которые осуществляют деятельность по использованию ВП, основными из которых являются авиакомпании.

Кроме авиакомпаний пользователями ВП являются государственная авиация, экспериментальная авиация, авиация общего назначения, владельцы и операторы беспилотных летальных аппаратов и др. Обслуживание ВД в РФ осуществляет провайдер аэронавигационных услуг - ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», которая обеспечивает планирование использования ВП и управление воздушным движением. Авиационные власти являются регулирующим органом и занимаются координацией процессов в системе организации воздушного движения (ОрВД). Управлением движения ВС по поверхности аэродрома занимаются как аэродромные центры ОВД, так и операторы аэропортов. Зачастую нет согласованного подхода к решению задачи: интересы специалистов расходятся, что приводит к затягиванию сроков модернизации структуры воздушного пространства 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 существующей системы организации воздушного движения (ОрВД) на основании эксплуатационных фактических данных [5], 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.

Исследованию и разработке методов, математических моделей и компьютерных программ для оценки показателей, характеризующих использование структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, посвящено большое количество работ.

Основные работы зарубежных авторов (X. Prats, C. Barrado, F. Netjasov, D. Crnogoras, 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 их 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 (Анодина Т.Г., Соломенцев В.В., 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 (например, авиакомпаний или провайдеров аэронавигационных услуг) 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. Для каждого участника системы ОрВД важна своя группа показателей эффективности. Пользователей ВП, в первую очередь, интересует эксплуатационная эффективность, снижение затрат и регулярность выполнения полётов. В интересах операторов аэродрома приоритетом является увеличение количества взлетно-посадочных операций без ущерба безопасности выполнения полётов. Задачей служб, осуществляющих деятельность по организации и планированию использования воздушного пространства и обслуживанию воздушного движения, является обеспечение баланса между пропускной способностью воздушного пространства и аэродрома и заявками пользователей ВП на выполнение полётов, в том числе недопущение загруженности диспетчерского персонала сверх нормативов по пропускной способности. Авиационные власти вместе с провайдером аэронавигационных услуг, следят за уровнем безопасности выполнения полетов.

Диссертационная работа посвящена разработке методов, математических моделей, и комплекса программ для системного (комплексного) анализа эффективности использования воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома при их модернизации. В основе работы лежит решение многокритериальной задачи выбора рационального варианта структуры с учётом интересов различных участников системы организации воздушного движения.

Вследствие этого, диссертационная работа посвящена решению задачи разработки методов, математических моделей и комплекса программ для выбора структуры ВП и инфраструктуры аэродрома на основе анализа эффективности их использования, является актуальной и практически важной.

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 структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, позволяющих повысить качество выбора рационального варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома с учётом интересов различных участников системы ОрВД.

Объектом исследований является структура ВП и инфраструктура аэродромов.

Предметом исследований 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 воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома.
- 3) Разработан комплекс программ имитационного моделирования системы организации воздушного движения по оценке эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома.
- 4) Разработана методика проведения исследований по анализу эффективности использования воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома и проведены исследования по оценке эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома.

- 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 алгоритмов: A* при построении маршрута движения ВС по поверхности аэродрома и Дейкстры при построении маршрута полета ВС. Результаты опубликованы в [50],[53],[64],[68,69],[76],[78,79],[81].
2. Метод выбора рационального варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, позволяющий учесть интересы всех участников системы ОрВД для выработки общего решения. Результаты опубликованы в [47,48].
3. Система показателей эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, позволяющая всесторонне и объективно провести соответствующую оценку эффективности, в том числе с применением численного метода аппроксимации результатов моделирования полиномом 2-го порядка методом наименьших квадратов (МНК) для определения зависимости задержек от интенсивности ВД. Результаты опубликованы в [44],[47,48].
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 [62,63],[90].
5. Комплекс программ для оценки эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, позволяющий осуществить обоснованный выбор рационального варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома при значительном снижении трудозатрат и времени. Результаты опубликованы в [66-69].

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, формализованного представления систем, аналитического и 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 воздушном пространстве 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 воздушного пространства в перспективных потоках воздушного движения.
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 вариантов путем оценки эффективности их использования с применением метода последовательных уступок, заключающегося в формировании приоритетного ряда показателей, реализации следующих этапов: анализа группы показателей безопасности полетов, формирования соответствующей уступки; анализа группы показателей для эксплуатантов ВП (авиакомпаний), формирования соответствующей уступки; анализа группы показателей пропускной способности ВП, формирования соответствующей уступки; анализа группы показателей пропускной способности аэродрома, формирования соответствующей уступки; анализа группы показателей влияния на окружающую среду, формирования соответствующей уступки; анализа группы показателей эффективности системы ОрВД и выбора единственного конечного решения.
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: безопасности полетов, пропускной способности ВП, пропускной способности аэродрома, эффективности для пользователей ВП, эффективности для системы ОрВД, влияния на окружающую среду 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 моделирования процессов ОрВД с использованием разработанной системы показателей и включает пять этапов: анализ требований и формирование задания на проведение оценки эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, подготовка данных для оценки эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, моделирование (формирование сценария моделирования, получение базовой модели (валидация модели), моделирование сформированного сценария и расчет показателей), обработка и анализ результатов моделирования, формулирование результатов и выводов, отражающих все преимущества и недостатки исследуемых вариантов структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, а также моделируемых процессов.
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 (включая рулежные дорожки, зону перрона, взлетно-посадочную полосу (ВПП)), 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

комплекса 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 воздушного пространства для проведения исследований в поддержку принятия решений при модернизации структуры воздушного пространства. 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 разработанной модели, 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 [47],[50],[53],[66],[78],[81],[90] в периодических изданиях из перечня ВАК, одна статья в периодических изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования, в том числе Web of Science [48], опубликованы в десяти материалах конференций, в том числе, сборниках трудов научных конференций [44],[62-64],[67-69],[76],[79-80]. Получены 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ [74-75],[77]. Всего по теме 21 публикация.

Апробация работы. Основные результаты работы представлены на российских и международных конференциях:

- Российский научно-технический семинар «Состояние и перспективы развития автоматизированных систем планирования использования воздушного пространства в РФ», ПИВП-2011, Москва, ФГУП «ГосНИИАС»;
- Всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию социально-экономических систем (ВКИМСЭС), Москва, 2012 год;
- 4:th Council of European Aerospace Societies (CEAS) Air and Space Conference in Linköping, 2013;
- Всероссийская научно-техническая конференция «Моделирование авиационных систем», Москва, 2013 год; Седьмая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2015);
- 2nd International Conference on Traffic Engineering (ICTE17), Spain, Barcelona, 2017;
- Восьмая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2017);
- Юбилейная конференция «Авиационные системы в XXI веке», 2017 год, Москва, ФГУП «ГосНИИАС»;
- Юбилейная конференция «Авиационные системы в XXI веке», 2022 год, Москва, ФГУП «ГосНИИАС».

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

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 воздушного пространства и инфраструктуры аэродромов при их модернизации, в том числе:

- в научно-исследовательской работе «Оценка эксплуатационных характеристик проектируемой структуры воздушного пространства Московской зоны (МЗ) ЕС

- ОрВД и Московского узлового диспетчерского района (МУДР) с целью определения достижения установленных стратегических целей и заданных показателей безопасности полетов, пропускной способности, эффективности предоставляемых услуг пользователям воздушного пространства с использованием имитационного моделирования», шифр «Модель НСВП-Москва"», 2015-2016 гг., а именно: проведение сравнительного анализа эксплуатационных характеристик существующей и проектируемой структур воздушного пространства МЗ ЕС ОрВД и МУДР по заданным целевым показателям с использованием разработанного комплекса имитационного моделирования [91];
- в научно-исследовательской работе «Модернизация комплекса имитационного моделирования процессов ОрВД с целью расширения возможностей по подготовке исходных данных, получения результатов моделирования с оценками эксплуатационных характеристик проектируемой структуры воздушного пространства, показателей безопасности полётов, пропускной способности, эффективности предоставляемых услуг пользователям на всех этапах полёта, включая: полёты по маршруту ОВД и в зонах подхода при прилёте – вылете, а также движение ВС по поверхности аэродрома», 2017-2019 гг., а именно: разработана новая архитектура и схема взаимодействия математических моделей, включая имитационные модели управляемых полётов в районе аэродрома и движения воздушных судов по поверхности аэродрома, а также разработана методика оценки эффективности использования ВП и инфраструктуры аэродрома [92-94];
 - в научно-исследовательской работе «Комплексная оценка эффективности выполнения полетов в новой структуре воздушного пространства Московской, Санкт-Петербургской, Ростовской, Самарской и Екатеринбургской зонах ЕС ОрВД, а также оценка показателей эффективности выполнения полетов в районах основных аэродромов Московского узлового диспетчерского района с использованием имитационного моделирования», 2018- 2019 гг., а именно: проведение оценки эффективности выполнения полётов в новой структуре с использованием математических моделей управляемых полётов на маршруте ОВД и в районе аэродрома и разработанной системы показателей эффективности использования воздушного пространства [95];

- в научно-исследовательской работе «Оценка пропускной способности основных аэродромов Московского узлового диспетчерского района с учетом моделирования в нем воздушного движения, включая полеты в районе аэродрома, операции взлета, посадки и движение воздушных судов по поверхности аэродрома с использованием имитационного моделирования», 2018- 2019 гг., а именно: проведена оценка пропускной способности аэродромов Шереметьево, Внуково, Домодедово с использованием математических моделей, системы показателей эффективности и методики оценки эффективности использования ВП и инфраструктуры аэродрома [96].

На основе результатов исследований был выбран наилучший вариант структуры воздушного пространства Московской и смежных зон ЕС ОрВД, который был внедрен 03 декабря 2020 года.

С использованием математических моделей в интересах ФГБУ «НИЦ имени Н.Е. Жуковского» в рамках научно-исследовательской работы «Проведение прогнозных исследований по развитию Московского авиационного узла (МАУ) на основе формирования и реализации потенциала авиаузла на рынке международного авиационного трансфера», 2021 г., выполнены исследования, а именно: проведена оценка показателей пропускной способности как аэроузла в целом, так и отдельных аэродромов с учётом роста интенсивности воздушного движения [97].

Результаты реализации подтверждены соответствующими актами.

Внедрение. Результаты диссертационной работы были внедрены в ФГУП «Госкорпорация по ОрВД» (г. Москва).

Структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка из 97 наименований. Общий объем работы 168 страниц, в том числе рисунков и таблиц: 53 рисунка, 3 таблицы.

Первая глава посвящена постановке задачи поиска оптимальной структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома. Приводится анализ опыта применения имитационного моделирования при решении задачи оценки эффективности использования структуры воздушного пространства 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 воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома.

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

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

В четвертой главе приводятся методика проведения исследований по анализу эффективности использования воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома и пример проведения исследований по оценке эффективности использования структуры воздушного пространства Московской зоны ЕС ОрВД.

ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ВП И ИНФРАСТРУКТУРЫ АЭРОДРОМА ПРИ ИХ МОДЕРНИЗАЦИИ

1.1. Обоснование целесообразности применения моделирования

Система ОрВД имеет свои показатели качества функционирования, включая: безопасность выполнения полетов, эффективность и регулярность. Повышение эффективности функционирования системы ОрВД в условиях неуклонного возрастания трафика ВС может быть достигнуто за счет:

- строительства инфраструктуры – ВПП, новых терминалов, радиотехнического обеспечения, командно-диспетчерских пунктов, новых центров автоматизированного УВД;
- совершенствования структуры ВП и повышения эффективности использования инфраструктуры аэродрома – оптимизация сети воздушных трасс (BT), создание маршрутов зональной навигации (PBN - performance-based navigation) как в верхнем ВП, так и в диспетчерской зоне района аэродрома, повышение эффективности выполнения операций на поверхности аэродрома;
- обучения и повышения квалификации диспетчерского состава – внедрение новых тренажеров, разработка технологий и методик обучения диспетчеров;
- совершенствования технологических процессов – внедрение системы совместного согласованного принятия решений (CDM - collaborative decision-making) как на аэродроме, так и при УВД в верхнем ВП и в диспетчерской зоне района аэродрома, интеграция процессов планирования в ВП (NOP - network operation plan) и на аэродроме (AOP - airport operation plan), распространение информации всем участникам процесса организации и УВД в рамках инициативы по гармонизации обмена данными (SWIM - system wide information management);
- систем поддержки принятия решения – внедрения систем управления прилетающими и вылетающими потоками ВД (AMAN/DMAN - arrival manager/departure manager), а также системы управления движением на

поверхности аэродрома (A-SMGCS - advanced surface management guidance and control system), интеграция средств поддержки диспетчера при обнаружении и разрешении конфликтных ситуаций в автоматизированную систему УВД (MTCD - medium-term conflict detection и CORA - conflict resolution assistant);

- внедрения перспективных бортовых приложений – процедур: обнаружение конфликтов – (CD - conflict detection), автоматическое разрешение конфликтов (ACM - automatic collision management), ситуационная осведомленность об обстановке на поверхности аэропорта (ASAS - airborne separation assurance systems), поддержка вертикального эшелонирования на маршруте (ITP - in-trail procedure).

Рассмотренные факторы, позволяющие повысить эффективность функционирования системы ОрВД, могут применяться как отдельно (последовательное внедрение), так и параллельно. Однако во втором случае требуется синхронизация процессов внедрения. В Российской Федерации (РФ) организована и проводится федеральная целевая программа «Модернизация Единой системы ОрВД Российской Федерации» [6]. В работе рассмотрен один из перечисленных выше факторов – совершенствование структуры ВП и использования инфраструктуры аэродрома. Задача состоит в выборе наилучшего варианта структуры ВП и варианта инфраструктуры аэродрома из ряда альтернативных вариантов, построенных специалистами по ОрВД с учетом соответствующих нормативных документов.

Структура воздушного пространства и инфраструктура аэродрома являются элементами системы организации и управления воздушным движением. Однако их характеристики влияют на всех участников системы организации воздушного движения. Использование структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома включают различные компоненты эксплуатационной концепции ОрВД, в том числе построение и организацию воздушного пространства, согласование потребностей и возможностей воздушного пространства, синхронизацию воздушного движения, организацию деятельности пользователей воздушного пространства, разрешение конфликтных ситуаций. Основными целями совершенствования системы ОрВД являются: повышение или поддержание уровня безопасности полётов, увеличение пропускной способности воздушного пространства и аэродромов, повышение эффективности выполнения полётов для пользователей воздушного пространства (в том

числе при использовании навигации, основанной на характеристиках (PBN)), уменьшение воздействия на окружающую среду [7].

Таким образом, изменение характеристик элементов или совершенствование процессов системы ОрВД требует анализа в различных условиях функционирования. Для проведения исследований могут применяться различные методы, которые отличаются быстродействием, стоимостью, трудозатратами. В зависимости от метода количество сценариев может варьироваться от одного до нескольких десятков. Наиболее распространены полунатурные комплексы с участием человека в контуре: диспетчерские тренажеры, полунатурные стенды моделирования, летные тренажеры. С их помощью отрабатываются технологические задачи, проводится обучение специалистов и тестирование новых функциональных возможностей автоматизированных систем. Однако такие комплексы требуют детальной проработки и позволяют решать локальные задачи, не обеспечивая решения комплексных задач. С другой стороны, находят своё применение расчётные модели, позволяющие решать задачи, которые могут быть описаны аналитически. Вместе с тем, такие модели не подходят для описания системы ОрВД в связи с введением допущений и упрощений и как следствие, низкой точности. Для создания моделей, описывающих сложные системы, всё чаще используются методы имитационного моделирования, позволяющие учесть множество параметров, а также реализовать поведение элементов подсистемы и их взаимодействие в системе в целом.

Имитационное моделирование для оценки эффективности использования воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома находит применение при:

- Проведении анализа использования воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома как в существующих условиях, так и в для перспективных вариантов. При этом может также быть решена задача синтеза системы на основе проведенного анализа.
- Создании цифровых двойников системы для сопровождения функционирования системы или подсистемы.
- Использовании как средства поддержки принятия решения, как на уровне планирования, так и в контуре управления воздушным движением.

В работах [8-10] рассматривается применение математического моделирования в области организации и планирования воздушного движения.

Особое значение имитационного моделирования процессов организации и управления воздушным движением связано с продолжающейся реорганизацией систем ОрВД в мире. Происходит внедрение технологий CNS/ATM (Communication, Navigation and Surveillance/Air Traffic Management - Связь, навигация и наблюдение/Организация воздушного движения), в основе которых лежат новые принципы, концепции методы и алгоритмы управления и планирования. Потребность в кардинальном изменении существующих подходов возникает ввиду роста интенсивности ВД при выходе на предел по пропускной способности. Немаловажным также остается вопрос эффективности выполнения полетов эксплуатантами, а также эффективности функционирования самой системы ОрВД. В Европе в поддержку оценки эффективности системы ОрВД в рамках программы по исследованию организации воздушного движения «Единое небо Европы» (SESAR) разработаны 4 проекта (PACAS [11], INTUIT [12,13], AURORA [14,15], APACHE [16-19]), целью которых является валидация и верификация проектов по совершенствованию ОрВД, создание платформы для анализа показателей эффективности функционирования системы ОрВД. Возникает необходимость в создании имитационных моделей для оценки эффективности при внедрении новых методов, процедур и технологий по планированию и управлению ВД.

1.2. Анализ опыта применения моделирования при решении задачи анализа эффективности использования воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома

1.2.1. Моделируемые процессы в области организации воздушного движения

а) Моделирование полетов на маршруте

Моделирование полетов воздушных судов на маршруте основывается на моделировании полета ВС в соответствии с его планом полета. В зависимости от решаемых задач и целей проведения моделирования в современных средствах имитационного моделирования используются два вида моделирования полетов в верхнем воздушном пространстве. Для получения таких показателей, как:

интенсивность воздушного движения в секторе ОВД, временная загруженность диспетчера, потенциальные конфликтные ситуации, возможно использование расчетного моделирования [20]. Данный метод используется для «грубой» оценки, например, проектируемого варианта структуры воздушного пространства [5]. При этом имитация полета ВС не выполняется. Расчет траектории производится в соответствии с планом полета (принимается гипотеза точного выполнения ВС 4D характеристик плана полета). «Полет по плану» позволяет получить некоторые показатели без запуска имитационных моделей, что, в свою очередь, значительно ускоряет процесс проведения исследований.

В другом случае, когда требуется получить показатели, связанные с точностью выполнения ВС маршрута полета, или повысить точность показателей, связанных с использованием воздушного пространства, используется метод имитационного моделирования. Тогда имитируется полет ВС по маршруту с учетом отклонений модели от заданной траектории, связанных с ошибками навигационных систем, ошибками самолетовождения [21]. Кроме моделирования самого полета и бортовых систем ВС на маршруте, производится имитация следующих процессов и систем:

- имитация действий диспетчера РДЦ по управлению воздушным движением в секторе;
- имитация взаимодействия диспетчера и экипажа ВС;
- имитация автоматизированных систем управления воздушным движением (АС УВД);
- имитация средств поддержки диспетчера для обеспечения безопасности и эффективности выполнения полетов.

В настоящее время моделирование полета ВС на маршруте в имитационных моделях включает в себя не только полет на эшелоне, но и этапы набора высоты, снижения, смены эшелона [22]. Используемые для имитации, в том числе и полета с переменным профилем, летно-технические характеристики ВС основаны на базе данных ЛТХ ВС (BADA -base of aircraft data). Точность данных BADA признана мировым сообществом достаточной для моделирования полета ВС на маршруте, включая этапы набора высоты и снижения [23].

Большое внимание на сегодняшний день уделяется точности моделирования траектории полета ВС на «стыке» с терминальной (аэродромной) зоной. Рост

интенсивности воздушного движения приводит к большой загруженности терминальных зон, районов аэродромов, а также самих аэродромов. Разрабатываемые средства поддержки диспетчера ориентированы на подход, при котором требуемые задержки ВС «выносятся» за пределы терминальной зоны на маршрут ОВД. Таким образом, на границе с терминальной зоной требуется точность моделирования полетов ВС, соизмеримая с точностью моделирования полетов в самой терминальной зоне.

Однако следует отметить особенности и сложности, которые обнаруживаются в средствах имитационного моделирования, связанные с имитацией управляемых полетов ВС на маршруте. Одной из таких задач является имитация действий диспетчера районного диспетчерского центра по управлению воздушным движением [24],[25]. Другая особенность связана с моделированием человеческого фактора уже на борту ВС.

б) Моделирование операций в терминальной зоне аэродрома

Имитация операций в терминальной зоне наиболее часто реализована в средствах имитационного моделирования. Изначально модели описывали терминальные области структурой графа (узлы и пути между ними), однако для внедрения новых технологий требуется новое представление воздушного пространства.

Если проводить аналогию с моделированием полетов ВС на маршруте, то можно сказать, что расчетное моделирование для имитации процессов в терминальной зоне применяется достаточно редко. Это связано с большим количеством вмешательств диспетчера при формировании очереди прибывающих воздушных судов: перед входом в терминальную зону диспетчер назначает экипажу ВС маршрут прибытия (STAR), который может отличаться от планового маршрута, или применяет уже в самой зоне «векторение» для обеспечения безопасных интервалов между ВС. В ходе выполнения команд диспетчера экипажем ВС 4D-траектория полета ВС претерпевает изменения и в итоге может значительно отличаться от исходной (плановой). Расчетное моделирование не позволяет адекватно смоделировать воздушную обстановку в терминальной зоне. Поэтому для оценки процессов в терминальной зоне находит свое применение имитационное моделирование.

Моделирование полетов ВС в терминальной зоне выполняется в соответствии с правилами полетов по соответствующим участкам маршрутов вылета и прибытия, захода на посадку. Данные по летно-техническим характеристикам ВС используются из базы данных BADA. Однако моделирование полетов ВС уже на этапе захода на посадку

требует более точных данных. В связи с этим ряд разработчиков средств имитационного моделирования создает модель полета ВС на основе обработки статистики радарных данных, собранной со средств объективного контроля.

Одной из основных моделей при имитации полетов в терминальной зоне является имитационная модель формирования очереди прибывающих и вылетающих ВС. Модель может имитировать работу как одного диспетчера, так и работу диспетчеров сразу всех секторов в терминальной зоне с учетом средств их поддержки. Главная задача этой модели состоит в формировании бесконфликтной очереди ВС с требуемыми интервалами горизонтального и вертикального эшелонирования путем применения мер регулирования. Моделируются такие операции, как: выдача ВС команды на занятие зоны ожидания, «векторение», изменение маршрута прибытия или вылета, применение новых технологий по управлению воздушным движением (Point Merge System, «тромбон») и другие [26,27]. Основной целью моделирования управляемых полетов в терминальной зоне является получение показателя «задержки», на основе которого рассчитывается пропускная способность и эффективность выполнения полетов [28].

Также при моделировании полетов ВС в терминальной зоне учитываются метеоусловия, выполнение операций сразу на нескольких аэродромах (аэроузел), взаимодействие с моделью движения ВС по поверхности аэродрома.

Стоит выделить следующие недостатки в существующих имитационных моделях терминальной зоны. Во-первых, возникает проблема при оценке показателя «временная загруженность диспетчера» для секторов подхода, круга: сложность УВД в секторах терминальной зоны не позволяет с требуемой точностью моделировать операции диспетчера. Другая проблема состоит в сложности моделирования «векторения» при невозможности применения штатных мер регулирования из-за загруженности воздушного пространства. Также стоит отметить сложность имитации построения очереди прибывающих ВС при моделировании аэроузла с равноприоритетными аэродромами, где конфликтуют потоки прибывающих и вылетающих с разных аэродромов ВС. На основании описанных недостатков для моделирования полетов в терминальной зоне особую важность приобретает валидация модели с использованием реальных данных.

- в) Моделирование движения воздушных судов и наземных транспортных средств по поверхности аэродрома

Моделирование аэродрома основано на имитации движения ВС по участкам пути в соответствии с линиями руления на поверхности аэродрома. Имитируется движение ВС по ВПП, рулежным дорожкам, перрону. На прилете выполняется моделирование от момента касания ВС ВПП до назначенного места стоянки а на вылете, наоборот, от места стоянки до точки отрыва от ВПП.

При моделировании аэродрома принято отдельно выделять систему ВПП (одна или несколько ВПП) и остальную часть поверхности аэродрома, которая включает в себя рулежные дорожки и перрон. В мировой практике для моделирования взлетов и посадок на ВПП используются как средства расчетного моделирования, так и имитационные модели. Данное направление - моделирование взлетно-посадочных операций на ВПП - является одним из самых развитых в мире [29-31]. Для расчетных и имитационных моделей используется информация о ВПП, разрешенных интервалах между взлетом и посадкой с учетом типажа ВС, расписании вылетов и прибытия ВС. Статистические данные используются в части получения показателей для расчетных моделей и в части валидации имитационных моделей. Результатом моделирования является показатель: «количество взлетно-посадочных операций», характеризующий пропускную способность аэродрома.

Для моделирования аэродрома с учетом движения ВС по рулежным дорожкам и перрону используются преимущественно имитационные модели [32]. Для обнаружения и разрешения потенциальных конфликтных ситуаций на поверхности аэродрома имитируется управление движением на поверхности аэродрома, которое может включать в себя как моделирование работы системы A-SMGCS, так и действия диспетчера с учетом работы системы. Моделируется движение и вспомогательной техники – наземных транспортных средств (НТС). Для имитации движения НТС создаются отдельные имитационные модели.

г) Совместное моделирование полетов и движения ВС по поверхности аэродрома

В настоящее время значительное внимание уделяется совместному моделированию полетов ВС на маршруте, в терминальной зоне, а также движения ВС по поверхности аэродром, так называемое «бесшовное» (комплексное) моделирование. Реализация такого моделирования позволит исследовать задачи совместного принятия решения, взаимодействия между диспетчерами УВД и планирования для повышения пропускной способности и эффективности выполнения полетов [33]. Другой задачей, которую

можно решать с использованием «бесшовного» (комплексного) моделирования, является оценка пропускной способности аэродрома с учетом ограничений, накладываемых «воздухом» и «землей». Результат такой оценки позволит находить компромиссные для аэродрома и служб УВД решения.

1.2.2. Общие принципы построения средств имитационного моделирования

Практика и теория исследований системы УВД и ОрВД на различных этапах ее функционирования показывает, что традиционным подходом обычно служит системный подход, использующий принципы агрегирования и декомпозиции, когда весь период функционирования системы УВД делится на этапы, процессы и т. п. Основой исследования системы УВД является моделирование ее процессов. Детализация параметров и характеристик процессов, степень полноты учета всех факторов, форма представления модели и другие моменты зависят от целей исследования или решаемой задачи.

В основу разделения системы УВД на подсистемы положен функциональный принцип, в соответствии с которым выделяются подсистемы: воздушные суда, система аэропортов и аэроузлов, воздушное пространство - промежуточные пункты маршрутов, трассы маршруты и др., диспетчерские службы аэродромов и трасс, наземные измерительные средства, метеослужба, космические и наземные компоненты систем связи, навигации.

Средства имитационного моделирования рассматриваются как инструментальные средства оценки технико-экономической эффективности системы УВД в целом или отдельных ее фрагментов, а также для проведения опережающего анализа при принятии различных технических и организационных решений, связанных с организацией и управлением воздушного движения.

К числу задач анализа системы ВД в различных условиях функционирования следует отнести следующие вопросы:

- анализ различных аспектов ВД на отдельных трассах или маршрутах, на определенном множестве трасс или маршрутов, в рамках региона;

- оценка качества, стоимости, эффективности полетов ВС определенного типа по заданным маршрутам;
- анализ фаз полета ВС в районе аэродромов при разрешении конфликтных ситуаций на трассах ВД;
- оценка функционирования аэропортов, подсистем связи, наземных средств и других элементов ВД;
- анализ последствий временного закрытия элементов ВП и аэродрома;
- изменение потоков ВД на отдельных направлениях, в районах ВД, аэроузлах (в частности, вызванных изменениями спроса на воздушное пространство);
- сравнительный анализ аспектов ВД в целом и его компонент с целью выработки рекомендаций по изменению структуры организации и управления ВД.

Часть этих задач анализа системы ВД может быть решена с помощью организации информационной системы, содержащей структурированную информацию о разных сторонах организации ВД. Поэтому в число задач, решаемых в процессе создания комплекса моделирования ВД, входит разработка и создание БД, содержащих информацию, организованную в соответствии со структурой ВД:

- элементов ВД: аэропортов, трасс, промежуточных пунктов маршрута, маршрутов, и т.д.;
- потоков ВД: регулярных расписаний, характеристик чартерных, специальных и прочих рейсов, характеристики авиаперевозчиков (компаний и т.д.);
- средств ВД (воздушных судов, наземных измерительных, управляющих, приемо-передающих и других средств);
- средств космического сегмента ВД;
- РЛ и РН средств, средств связи;
- географической информации (по странам, регионам, районам и секторам ответственности диспетчерской службы и т. д).

Современные информационные системы позволяют включать унифицированные и специально разработанные вычислительные процедуры обработки данных и использовать средства графического вывода информации. Процедуры обработки данных при реализации запросов к информационной системе могут представлять собой простейшие вычислительные алгоритмы - расчет интегральных характеристик - суммарных, средних значений, дисперсий, расчет времени полета t на заданное

расстояние D с заданной постоянной скоростью V ($t=D/V$), вычисление скорости ВС при полете на заданную дальность посредством интерполяции заданного массива данных зависимости скорости от дальности полета и др. Включение более сложных вычислительных алгоритмов в процедуры реализации запросов позволяет создать развитую информационно-справочную службу оценки характеристик и анализа ВД. Использование графических средств также может рассматриваться как для простого представления зависимостей физических параметров, хранящихся в БД, так и для более сложных алгоритмов, примером чего может служить вывод информации относительно ВД с использованием картографии.

Задача создания информационной системы разделена на следующие этапы:

- создание структуры БД компонент ВД (состав файлов, таблиц, их взаимосвязь, перечни параметров и их типов);
- создание программного обеспечения заполнения и коррекции - ведения БД;
- сбор информации и занесение ее в БД;
- разработка информационно-справочной системы по элементам ВД.

Другая часть задач анализа и проектирования ВД требует моделирования функционирования ВД и его компонент во времени - моделирования полетов ВС, обслуживания их в аэропортах, моделирования работы устройств связи, РЛ средств и т.д. Такие модели используют различный математический аппарат. Динамические модели автономного полета ВС, описываемого непрерывными процессами, дифференциальными уравнениями движения, основаны на алгоритмах численного решения дифференциальных и разностных уравнений. Эти модели могут использоваться для отображения динамической обстановки в секторе управления ВД, на трассах региональных систем ВД, для вычисления времени полета между отдельными точками маршрутов, для расчета профилей полета, оценки расхода топлива и стоимости полета, для моделирования процессов выполнения указаний диспетчеров ВД по обеспечению эшелонирования ВС, для формирования данных о полете ВС, передаваемых диспетчерами и т.д. Модели же диспетчеров, систем обслуживания ВС в аэропортах и в полете представляют собой существенно дискретно-событийные системы. Они могут применяться для оценки пропускной способности системы ВД, аэропортов, трасс и их участков, затрат на организацию ВД, анализа интенсивности воздушных потоков на участках трасс, степени загруженности элементов ВД, расчета

задержек по времени в системе, характеристик качества полетов ВС, трасс, маршрутов и др.

Для информационной поддержки имитационных моделей ВД, т.е. для хранения и формирования в необходимом формате данных для запуска моделей ВД, хранения и обработки результатов моделирования используются программные средства информационной системы. Анализ характеристик ВД, проводимый с помощью информационных и имитационных моделей объектов ВД, позволяет выработать рекомендации по изменению их структуры и параметров.

1.2.3 Анализ существующих средств имитационного моделирования

В Западной Европе и США ведется активная работа по созданию и исследованию процедур, методов, алгоритмов организации и управления воздушным пространством и воздушным движением. Эта работа организована как на государственном уровне (в качестве лидеров здесь можно назвать Францию, Испанию, США), так и на межгосударственном уровне. Разрабатываются концепции и планы (дорожные карты) по их реализации. В выполнении научно-исследовательских программ участвуют не только научно-исследовательские центры, институты и подразделения аэронавигационных служб, но и научно-исследовательские подразделения крупных фирм, а также многие университеты.

Аналогичная ситуация с разработкой и использованием средств имитационного моделирования процессов планирования и управления воздушным движением. В Западной Европе и США разработан ряд средств имитационного моделирования систем ОрВД. В настоящее время понятна необходимость координации работ по созданию и использованию таких средств. Среди ведущих средств имитационного моделирования можно выделить следующие: AwSim, TAAM, AirTOP, RAMS, SIMMOD PLUS, SIMMOD PRO, CAST, SAAM, NEVAC, TARGET и другие. Моделирование как полётов, так и наземного обслуживания воздушных судов, реализовано в наиболее передовых средствах: TAAM (США) производства Jeppesen и AirTOP производства TransoftSolutions (Бельгия).

1.2.4. Применение имитационного моделирования при решении задачи анализа эффективности использования воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома

Для решения задачи анализа эффективности использования воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома используются аналитические и имитационные модели. В то же время, анализ международного опыта показывает, что, как правило, исследуется только один или группа показателей в интересах только одного участника системы ОрВД.

В работе [34] представлено применение агентного моделирования для выявления и оценки критических с точки зрения безопасности ситуаций. В основу положена модель терминальной зоны аэроузла, где в качестве агентов принимаются элементы системы ОрВД (ВС, интерфейс кабины ВС, экипаж ВС, диспетчер УВД, АС УВД). Для описания поведения каждого агента применяются методы систем конечных автоматов. В другой работе [35] исследуется влияние перспективной системы ОрВД на риски возникновения авиационных инцидентов. Моделируются авиационные риски, в качестве методов используются деревья событий и отказов. Чтобы оценить «вклад» системы ОрВД в безопасность полётов, используется причинно-следственная модель, где оцениваются такие факторы, как: технические сбои систем, человеческий фактор и др. В качестве показателей выбраны: нарушения норм эшелонирования, опасные сближения, нарушения интервалов на ВПП и РД, попадания ВС в спутный вихревой след другого ВС.

Как правило, оценка эффективности использования ВП и инфраструктуры аэродрома проводятся в интересах только одного из участников системы ОрВД. Ряд работ посвящен проведению исследований в интересах пользователей воздушного пространства. В работе [36] проведены исследования различных техник формирования очереди последовательности воздушных судов на посадку на основе данных, полученных по результатам имитационного и полунатурного моделирования. Оценка проводилась по показателю «дополнительное время полёта» в зоне снижения и захода на посадку. Одним из основных показателей для пользователей ВП являются задержки. В работе [37] представлены исследования задержек в крупном аэропорте Нью-Йорк – ЛаГвардия. Исследования основаны на моделировании разных концепций по

управлению и организации воздушного движения, целью которых является повышение пропускной способности аэропорта. Другая группа показателей рассматривается в интересах операторов аэропортов. В работе [38] исследуются такие показатели, как: время руления и ожидание на месте стоянки. В основе работы лежит оптимизация операций прилета и вылета по критерию минимального времени в пути. Оценка проводится в условиях неопределенности выполнения расписания. Отдельно стоит отметить работы, связанные с моделированием новых концепций. Например, работы [39] посвящены моделированию концепции свободной маршрутизации. Зона свободной маршрутизации представляет собой ВП, в пределах которого пользователи могут свободно планировать траекторию полета между заранее определенными точками входа и выхода. В основе модели лежит построение оптимальной 4D траектории полёта. В работе [40] моделируются как построение траекторий полёта, так и управление воздушным движением, включая обнаружение и разрешение потенциальных конфликтных ситуаций в секторе УВД.

1.3. Постановка задачи поиска оптимальной структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома

1.3.1. Показатели эффективности использования воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома

В целях создания единой универсальной основы для оценки функционирования системы ОрВД ИКАО рекомендовала ключевые группы показателей эффективности. Эти же показатели приведены в Глобальной эксплуатационной концепции ОрВД [41]. В рамках подхода, основанного на характеристиках, ИКАО и другими организациями сообщества ОрВД определены эксплуатационные показатели функционирования системы ОрВД, основывающиеся на обработке постполетных фактических данных [42-44]. Вместе с тем, задача выбора варианта структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома, как элементов системы ОрВД, также должна основываться на своих соответствующих показателях, которые позволяют оценить эффективность

использования ВП и инфраструктуры аэродрома в перспективных условиях стремительно возрастающей интенсивности ВД. Следует отметить взаимозависимость и противоречивость ряда показателей, находящихся в разных группах. Повышение эффективности по одним показателям может приводить к снижению эффективности по другим показателям. Например, спрямление траекторий воздушных судов в диспетчерской зоне района аэродрома, с одной стороны, снижает затраты для пользователей ВП, с другой стороны, увеличивает нагрузку на диспетчера и уровень шума в районах плотной застройки. Таких примеров можно привести множество. Таким образом, в рамках задачи выбора варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома встает вопрос разработки показателей эффективности, алгоритмов их расчёта, а также сбалансированности значений показателей для всех рассматриваемых участников системы ОрВД.

Структуру ВП и инфраструктуру аэродрома как часть аэронавигационной системы можно определить рядом характеристик – показателей эффективности функционирования. Требуется задать вектор, состоящий из разных групп показателей эффективности.

Определим критерий эффективности следующим вектором:

$$W = \begin{pmatrix} W_a \\ W_b \\ W_{\text{ОрВД}} \\ W_{\text{ПВП}} \\ W_{\text{ПА}} \\ W_{\text{ср}} \end{pmatrix}, \quad (1.1)$$

где каждая группа показателей характеризуют разных заинтересованных сторон в системе ОрВД:

С точки зрения пользователей ВП определена следующая группа:

- показатели, которые характеризуют затраты эксплуатантов W_a , в том числе ресурсы пользователей при полете в воздухе и движении ВС по аэродрому.

Для служб, которые предоставляют аэронавигационное обслуживание, сформулированы две группы показателей:

- эффективность использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома для системы ОрВД $W_{\text{ОрВД}}$;

- пропускная способность воздушного пространства (ПВП) и сложность УВД в секторе $W_{\text{ПВП}}$.

Интересы авиационных властей отражают следующие группы показателей:

- безопасность выполнения полетов W_6 ;
- влияние окружающей среда $W_{\text{сп}}$;

Показатели для аэропортов определены в группе:

- пропускная способность аэродрома (ПА) $W_{\text{ПА}}$.

При выборе варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома каждую группу показателей требуется максимизировать или минимизировать. Например, издержки, вызванные отклонением ВС от оптимальной траектории, которые входят в группу показателей для пользователей ВП, должны быть минимизированы, как и показатели безопасности. И наоборот, пропускная способность аэродрома и пропускная способность ВП должны быть увеличены в наибольшей степени. Таким образом, значения показателей в каждой группе необходимо максимально увеличить или уменьшить:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_a \rightarrow \min, \\ W_6 \rightarrow \min, \\ W_{\text{орВД}} \rightarrow \min, \\ W_{\text{ПВП}} \rightarrow \max, \\ W_{\text{ПА}} \rightarrow \max, \\ W_{\text{сп}} \rightarrow \min. \end{array} \right. \quad (1.2)$$

Представим далее подробно группы показателей, в каждой из которой компонентами являются свои показатели эффективности.

Вектор W_a задается следующими показателями, имеющими определяющее значение для эксплуатантов:

$$W_a = (W_{\text{а.зад}}, W_{\text{а.топл.эф}}, W_{\text{а.налет}}, W_{\text{протяж.марш}}, W_{\text{ортодр}}, W_{\text{врем.рул}})^T, \text{ где} \quad (1.3)$$

$W_{\text{а.зад}}$ - задержки ВС в воздухе и на аэродроме,

$W_{\text{а.топл.эф}}$ - расход топлива при полете и движении ВС по аэродрому,

$W_{\text{а.налет}}$ - время полета ВС,

$W_{\text{протяж.марш}}$ - протяженность маршрута,

$W_{\text{ортодр}}$ - ортодромичность маршрутов,

$W_{\text{врем.рул}}$ - время руления ВС по поверхности аэродрома.

Вектор W_6 определяется следующим образом:

$$W_6 = (W_{\text{ПКС}}, W_{\text{инт.ВПП}}, W_{\text{ННЭ}}, W_{\text{риски}}, W_{\text{конфл.схем}})^T, \text{ где} \quad (1.4)$$

$W_{\text{ПКС}}$ – количество потенциальных конфликтных ситуаций,

$W_{\text{инт.ВПП}}$ – количество нарушений временных интервалов на ВПП,

$W_{\text{ННЭ}}$ – количество нарушений норм эшелонирования (ННЭ)

$W_{\text{риски}}$ - оценки рисков,

$W_{\text{конфл.схем}}$ - конфликтность схем маневрирования .

Вектор $W_{\text{ОрВД}}$ характеризует эффективность для системы ОрВД:

$$W_{\text{ОрВД}} = (W_{\text{загр.уч.ВТ}}, W_{\text{загр.точек.ВП}}, W_{\text{эш}}, W_{\text{исп.ЗО}}, W_{\text{МС}})^T, \text{ где} \quad (1.5)$$

$W_{\text{загр.уч.ВТ}}$ - неравномерность загруженности участков ВТ,

$W_{\text{загр.точек.ВП}}$ - неравномерность загруженности точек ВП,

$W_{\text{эш}}$ - использование ВС неэффективных эшелонов,

$W_{\text{исп.ЗО}}$ - применение зон ожидания (ЗО),

$W_{\text{МС}}$ - неэффективность использования мест стоянок (МС).

Вектор $W_{\text{ПВП}}$ определяется следующими показателями:

$$W_{\text{ПВП}} = (W_{\text{врем.загр.дисп}}, W_{\text{сек}})^T, \text{ где} \quad (1.6)$$

$W_{\text{врем.загр.дисп}}$ – равномерность временной загруженности диспетчера,

$W_{\text{сек}}$ - загрузка секторов без превышения нормативов пропускной способности (НПС) сектора.

Вектор $W_{\text{ПА}}$ определяется важными для аэропортов показателями:

$$W_{\text{ПА}} = (W_{\text{ВПО}}, W_{\text{пересеч}})^T, \text{ где} \quad (1.7)$$

$W_{\text{ВПО}}$ - количество взлетно-посадочных операций (ВПО),

$W_{\text{пересеч}}$ - количество аэродромных операций без пересечения ВПП.

Вектор W_{cp} - группа показателей, характеризующая влияние на окружающую среду:

$$W_{cp} = (W_{шум}, W_{CO_2})^T, \text{ где} \quad (1.8)$$

$W_{шум}$ - шумовые воздействия,

W_{CO_2} - выбросы вредных веществ.

1.3.2. Группы параметров, определяющие показатели эффективности

Очевидно, что 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:

$$W = W(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}), \quad (1.9)$$

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, характеризующие метеорологическую обстановку и ограничения использования ВП $\bar{\omega}$;
- технология работы диспетчера \bar{v} .

Так как показатель эффективности состоит из групп ключевых показателей, то функцию W можно записать так:

$$\mathbf{W} = W(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) = \begin{pmatrix} W_a(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \\ W_6(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \\ W_{\text{ОрВД}}(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \\ W_{\text{ПВП}}(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \\ W_{\text{ПА}}(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \\ W_{\text{ср}}(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \end{pmatrix}, \quad (1.10)$$

где показатели по каждой из шести групп $\mathbf{W} = (W_a, W_6, W_{\text{ОрВД}}, W_{\text{ПВП}}, W_{\text{ПА}}, W_{\text{ср}})^T$ рассчитываются на основе компьютерного математического моделирования исследуемых вариантов структуры ВП и инфраструктуры аэродрома.

1.3.3. Структура воздушного пространства и инфраструктура аэродрома

Структура ВП состоит из элементов воздушного пространства, предназначенных для осуществления деятельности по использованию ВП. На рисунке 1.1 представлен пример структуры ВП РФ.



Рисунок 1.1. Структура воздушного пространства РФ

Пусть каждый из исследуемых вариантов структуры \bar{s} ВП и инфраструктуры аэродрома определяется двумя векторами: $\{\bar{s}_{ВП}, \bar{s}_a\}$, где вектор $\bar{s}_{ВП}$ – структура ВП, \bar{s}_a – инфраструктура аэродрома. Определим $\bar{s}_{ВП}$ в виде вектора:

$$\bar{s}_{ВП} = (\bar{s}_{сек}, \bar{s}_{ВТ}, \bar{s}_{SID}, \bar{s}_{STAR}, \bar{s}_{app}), \quad (1.11)$$

где $\bar{s}_{сек}$ – структура секторов УВД, $\bar{s}_{ВТ}$ – 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), \bar{s}_{app} – маршруты захода на посадку (approach) моделируемого(ых) аэродрома(ов).

Структура секторов $\bar{s}_{сек}$ представляет собой вектор из секторов диспетчерского управления в рассматриваемой структуре ВП:

$$\bar{s}_{сек} = (s_{1сек}, s_{2сек}, \dots, s_{iсек}, \dots, s_{Nсек}), \quad (1.12)$$

где $\bar{s}_{сек} \in S_{ВП}$, $i = \overline{1, N_{сек}}$, $N_{сек}$ – количество секторов в структуре ВП, $S_{ВП}$ – исследуемое ВП.

Каждый сектор $s_{iсек}$ характеризуется набором элементов:

$$s_{iсек} = (s_{iсек.верт.гран}, s_{iсек.гориз.гран}, s_{iсек.норм}, s_{iсек.регл}, s_{iсек.хар}), \quad (1.13)$$

где $s_{iсек.верт.гран}$ – вертикальные границы сектора, $s_{iсек.гориз.гран}$ – горизонтальные границы сектора, $s_{iсек.норм}$ – НПС сектора, $s_{iсек.регл}$ – регламент работы сектора, $s_{iсек.хар}$ – характеристики работы сектора.

Сеть воздушных трасс $\bar{s}_{ВТ}$ характеризуется:

$$\bar{s}_{ВТ} = (s_{1ВТ}, s_{2ВТ}, \dots, s_{jВТ}, \dots, s_{NВТ}), \quad (1.14)$$

где $\bar{s}_{ВТ} \in S_{ВП}$, $j = \overline{1, N_{ВТ}}$, $N_{ВТ}$ – количество ВТ в структуре ВП.

Каждая j -я ВТ $s_{jВТ}$ характеризуется следующим набором элементов:

$$s_{jВТ} = (s_{jточки.ВП}, s_{jучастки.ВТ}, s_{jэш}, s_{jогр}, s_{jзо.ВВП}), \quad (1.15)$$

где $s_{jточки.ВП}$ – точки ВП, $s_{jучастки.ВТ}$ – участки ВТ, $s_{jэш}$ – разрешенный для полетов диапазон высот (эшелон), $s_{jогр}$ – ограничение на использование участков ВТ (по согласованию с органами УВД), $s_{jзо.ОВД}$ – ЗО на маршруте ОВД.

Маршруты вылета представляют собой вектор маршрутов \bar{s}_{SID} :

$$\bar{s}_{SID} = (s_{1SID}, s_{2SID}, \dots, s_{kSID}, \dots, s_{N_{SID}}), \quad (1.16)$$

где $\bar{s}_{SID} \in S_{BП}$, $k = \overline{1, N_{SID}}$, N_{SID} - количество маршрутов вылета моделируемого(ых) аэродрома(ов). s_{kSID} определяется вектором:

$$s_{kSID} = (s_{kSID WP}, s_{kSID route}, s_{kSID xap}), \quad (1.17)$$

в векторе $s_{kSID WP}$ - точки пути (way point - WP), $s_{kSID route}$ - участки маршрута вылета, $s_{kSID xap}$ - характеристики использования схем маневрирования (SID).

Маршруты прибытия \bar{s}_{STAR} характеризуются следующими элементами:

$$\bar{s}_{STAR} = (s_{1STAR}, s_{2STAR}, \dots, s_{lSTAR}, \dots, s_{N_{STAR}}), \quad \text{где} \quad (1.18)$$

$\bar{s}_{STAR} \in S_{BП}$, $l = \overline{1, N_{STAR}}$, N_{STAR} - количество маршрутов прибытия моделируемого(ых) аэродрома(ов). Каждый маршрут s_{lSTAR} характеризуется следующим набором элементов:

$$s_{lSTAR} = (s_{lSTAR WP}, s_{lSTAR route}, s_{lSTAR xap}, s_{lSTAR 3O}), \quad (1.19)$$

где $s_{lSTAR WP}$ - точки пути, которые состоят из контрольных или промежуточных точек района аэродрома, $s_{lSTAR route}$ - участки маршрута прибытия, $s_{lSTAR xap}$ - параметры, характеризующие использование маршрута при прилете ВС на аэродром, $s_{lSTAR 3O}$ - 3O на маршруте прибытия.

Маршруты захода на посадку представляют вектор \bar{s}_{app} :

$$\bar{s}_{app} = (s_{1app}, s_{2app}, \dots, s_{rapp}, \dots, s_{N_{app}}), \quad \text{где} \quad (1.20)$$

$\bar{s}_{app} \in S_{BП}$, $r = \overline{1, N_{app}}$, N_{app} - количество маршрутов захода на посадку, моделируемого(ых) аэродрома(ов). Схема захода на посадку $s_{r,app}$ определяется следующим вектором:

$$s_{r,app} = (s_{r,app WP}, s_{r,app route}, s_{r,app xap}), \quad (1.21)$$

где $s_{r,app WP}$ - точки пути, $s_{r,app route}$ - участки маршрута захода на посадку, $s_{r,app xap}$ - характеристики использования маршрута на этапе захода на посадку.

Инфраструктура аэродрома \bar{s}_a определяется следующим вектором:

$$\bar{s}_a = (\bar{s}_{BПП}, \bar{s}_{PД}, \bar{s}_{MC}), \quad (1.22)$$

где $\bar{s}_{BПП}$ - система ВПП, $\bar{s}_{PД}$ - рулежные дорожки (РД), \bar{s}_{MC} - места стоянок аэродрома.

Система ВПП $\bar{s}_{BПП}$ характеризуется следующими элементами:

$$\bar{s}_{BПП} = (s_{1BПП}, s_{2BПП}, \dots, s_{lBПП}, \dots, s_{N_{BПП}}), \quad (1.23)$$

где $\bar{s}_{\text{ВПП}} \in S_a$, $t = \overline{1, N_{\text{ВПП}}}$, $N_{\text{ВПП}}$ - количество взлетно-посадочных полос, S_a - моделируемый аэродром. Каждая ВПП $s_{t\text{ВПП}}$ характеризуется следующим набором элементов:

$$s_{t\text{ВПП}} = (s_{\text{типВПП}}, s_{\text{геом.разм.ВПП}}, s_{\text{хар.исп.ВПП}}), \quad (1.24)$$

где $s_{\text{тип.ВПП}}$ - тип покрытия ВПП (асфальтная, грунтовая и т.д.), $s_{\text{геом.разм.ВПП}}$ - координаты торцов и размеры взлетно-посадочной(ых) полос, $s_{\text{т.хар.исп.ВПП}}$ - характеристики использования ВПП.

Сеть РД $\bar{s}_{\text{РД}}$ определяется вектором:

$$\bar{s}_{\text{РД}} = (s_{1\text{РД}}, s_{2\text{РД}}, \dots, s_{p\text{РД}}, \dots, s_{N_{\text{РД}}}), \quad (1.25)$$

где $\bar{s}_{\text{РД}} \in S_a$, $p = \overline{1, N_{\text{РД}}}$, $N_{\text{РД}}$ - количество РД моделируемого(ых) аэродрома(ов). Рулежная дорожка $s_{p\text{РД}}$ характеризуется элементами:

$$s_{p\text{РД}} = (s_{\text{тип.РД}}, s_{\text{геом.разм.РД}}, s_{\text{рхар.исп.РД}}), \quad (1.26)$$

где $s_{\text{тип.РД}}$ - тип рулежной дорожки, $s_{\text{геом.разм.РД}}$ - геометрические размеры РД, $s_{\text{рхар.исп.РД}}$ - характеристики использования РД. МС $\bar{s}_{\text{МС}}$ определяются вектором:

$$\bar{s}_{\text{МС}} = (s_{1\text{МС}}, s_{2\text{МС}}, \dots, s_{q\text{МС}}, \dots, s_{N_{\text{МС}}}), \quad (1.27)$$

где $\bar{s}_{\text{МС}} \in S_a$, $q = \overline{1, N_{\text{МС}}}$, $N_{\text{МС}}$ - количество МС на моделируемом(ых) аэродроме(ах). Каждое МС $s_{q\text{МС}}$ характеризуется следующим набором элементов:

$$s_{q\text{МС}} = (s_{\text{обор.МС}}, s_{\text{тип.МС}}, s_{\text{исп.тип.ВС}}, s_{\text{сп.зан}}), \quad (1.28)$$

где $s_{\text{обор.МС}}$ - наличие оборудования (телетрапа) на МС, $s_{\text{тип.МС}}$ - тип места стоянки, $s_{\text{исп.тип.ВС}}$ - возможность использования МС различными типами ВС, $s_{\text{сп.зан}}$ - способ занятия МС (на собственных двигателях, буксировка).

1.3.4. Условия использования структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома

Решение задачи выбора рационального варианта инфраструктуры аэродрома и структуры ВП выполняется с учётом условий их использования, в том числе перспективных (прогнозных), которые определяются следующими векторами:

Полетные данные:

$$\bar{y} = (y_{\text{ЛТХ ВС}}, y_{\text{планы полетов}}), \quad (1.29)$$

где $y_{\text{ЛТХ ВС}}$ – ЛТХ моделируемых ВС ($y_{\text{ЛТХ ВС}} \in Y_{\text{ЛТХ ВС}}$, где $Y_{\text{ЛТХ ВС}}$ – множество ЛТХ ВС).

Моделируемый(ые) поток(и) ВД $y_{\text{планы полетов}}$: определяется множеством воздушных судов и их планами полетов ($y_{\text{планы полетов}} \in Y_{\text{планы полетов}}$, $Y_{\text{планы полетов}}$ – множество потоков ВД).

Условия выполнения полетов:

$$\bar{\omega} = (\omega_{\text{метео}}, \omega_{\text{ОИВП}}), \quad (1.30)$$

где $\omega_{\text{метео}}$ – моделируемые метеоусловия ($\omega_{\text{метео}} \in \Omega_{\text{метео}}$, где $\Omega_{\text{метео}}$ – множество метеоусловий), $\omega_{\text{ОИВП}}$ – моделируемые ограничения использования воздушного пространства (ОИВП) ($\omega_{\text{ОИВП}} \in \Omega_{\text{ОИВП}}$, где $\Omega_{\text{ОИВП}}$ – множество ОИВП).

Технология работы диспетчера:

$$\bar{v} = (v_{\text{команды}}, v_{\text{алгоритм}}), \quad (1.31)$$

где $v_{\text{команды}}$ – команды, которые диспетчер применяет при разрешении ПКС, $v_{\text{алгоритм}}$ – алгоритмы, характеризующие последовательность применения команд при разрешении ПКС.

Алгоритмы управления потоками ВС:

$$u = (u_{\text{упр.взд}}, u_{\text{упр.зем}}), \quad (1.32)$$

где $u_{\text{упр.взд}}$ – алгоритмы управления и средства поддержки диспетчера при управлении потоком ВД (“воздух”), $u_{\text{упр.зем}}$ – алгоритмы управления и средства поддержки диспетчера при управлении движением ВС по поверхности аэродрома (“земля”).

1.3.5. Система ограничений по показателям эффективности

В рассматриваемой задаче выбора структуры ВП и инфраструктуры аэродрома необходимо при её постановке учитывать ряд ограничений на целевые значения показателей, которым должен удовлетворять выбранный вариант структуры ВП и инфраструктуры аэродрома:

$$\bar{c} = (c_a, c_b, c_{ПВП}, c_{ПА}, c_{окр.ср}), \quad (1.33)$$

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

1.3.5.1. Ограничения по показателям эффективности для пользователей ВП

Ограничением для пользователей ВП при моделировании является средняя задержка, которая характеризуется вектором $\bar{c}_{ср.задер} = (\bar{c}_{задер.выл}, \bar{c}_{задер.прил})$, где $\bar{c}_{задер.выл}$ – вектор, состоящий из показателей средней задержки на вылете из моделируемого(ых) аэродрома(ов):

$$\bar{c}_{задер.выл} = (c_{задер.выл.1a}, c_{задер.выл.2a}, \dots, c_{задер.выл.ta}, \dots, c_{задер.выл.N_a}), \quad (1.34)$$

где $c_{задер.прил}$ – вектор, состоящий из показателей средней задержки на прилете на моделируемый(ые) аэродром(ы):

$$\bar{c}_{задер.прил} = (c_{задер.прил.1a}, c_{задер.прил.2a}, \dots, c_{задер.прил.ta}, \dots, c_{задер.прил.N_a}), \quad (1.35)$$

где $t = \overline{1, N_a}$, N_a – количество моделируемых аэродромов, $c_{задер.выл.ta}$ – средняя задержка на вылете из t -го аэродрома, $c_{задер.прил.ta}$ – средняя задержка на прилете на t -й аэродром.

Ограничения определяются системой неравенств:

$$\begin{cases} c_{задер.выл} = B_1(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \leq c_{задер.выл}^* \\ c_{задер.прил} = B_2(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \leq c_{задер.прил}^* \end{cases} \quad (1.36)$$

где $c_{задер.выл}^*$ – допустимая задержка на вылете $c_{задер.прил}^*$ – допустимая задержка на прилете.

В общем виде ограничения по задержкам можно представить как:

$$c_{ср.задер} = B(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \leq c_{задер}^*, \quad (1.37)$$

где $c_{\text{задер}}^*$ - допустимая задержка на вылете и прилете из/в моделируемый(ые) аэродром(ы).

1.3.5.2. Ограничения по показателям безопасности

По группе показателей безопасности выполнения полетов ограничения определяются значением c_6 . Данное значение представляет собой рассчитываемый по результатам моделирования уровень безопасности выполнения полетов и характеризуется неравенством:

$$c_6 = F(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \leq c_{\text{TLS}}^*, \quad (1.38)$$

где c_{TLS}^* - целевой уровень безопасности полетов (target level safety - TLS).

1.3.5.3. Ограничения по показателям ПВП

Ограничения, связанные с пропускной способностью ВП, характеризуются вектором $\bar{c}_{\text{ПВП}} = (\bar{c}_{\text{ПВП1}}, \bar{c}_{\text{ПВП2}})$, где $\bar{c}_{\text{ПВП1}}$ - вектор показателей интенсивности ВД в секторах диспетчерского управления:

$$\bar{c}_{\text{ПВП1}} = (c_{\text{загр.1сек}}, c_{\text{загр.2сек}}, \dots, c_{\text{загр.}i\text{сек}}, \dots, c_{\text{загр.}N\text{сек}}), \quad (1.39)$$

$c_{\text{ПВП2}}$ - вектор временной загрузки диспетчерских позиций:

$$\bar{c}_{\text{ПВП2}} = (c_{\text{врем.загр.1сек}}, c_{\text{врем.загр.2сек}}, \dots, c_{\text{врем.загр.}i\text{сек}}, \dots, c_{\text{врем.загр.}N\text{сек}}), \quad (1.40)$$

где $i = \overline{1, N_{\text{сек}}}$, $c_{\text{загр.}i\text{сек}}$ - интенсивность ВД в i -м секторе ОВД, $c_{\text{врем.загр.}i\text{сек}}$ - временная загрузка диспетчера в i -м секторе ОВД.

Ограничения по группе ПВП определяются системой неравенств:

$$\begin{cases} c_{\text{ПВП1}} = \Phi_1(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \leq c_{\text{НПС}}^*, \\ c_{\text{ПВП2}} = \Phi_2(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \leq c_{\text{КЗ}}^*, \end{cases} \quad (1.41)$$

где $c_{\text{НПС}}^*$ - заданные или рассчитанные НПС секторов, $c_{\text{КЗ}}^*$ - коэффициент допустимого значения временной загрузки диспетчера.

1.3.5.4. Ограничения по показателям ПА

По пропускной способности аэродрома ограничение определяется следующей величиной: $c_{ПА}$ - количество взлетно-посадочных операций и определяется вектором-строкой:

$$\bar{c}_{ПА} = (c_{ВПО1a}, c_{ВПО2a}, \dots, c_{ВПОra}, \dots, c_{ВПОNa}), \quad (1.42)$$

где $t = \overline{1, N_a}$, $c_{ВПОta}$ - количество взлетно-посадочных операций на t -м аэродроме.

По пропускной способности аэродрома ограничения определяются:

$$c_{ПА} = R(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \geq c_{ВПО}^*, \quad (1.43)$$

где $c_{ВПО}^*$ - заданное целевое количество ВПО, которое определено как минимально допустимое при совершенствовании инфраструктуры аэродрома.

1.3.5.5. Ограничения по показателям влияния на окружающую среду

Ограничением по данной группе показателей считается $c_{шум}$ - вычисляемый уровень воздействия шума в диспетчерской зоне района аэродрома:

$$\bar{c}_{шум} = (c_{шум1a}, c_{шум2a}, \dots, c_{шумra}, \dots, c_{шумNa}), \quad (1.44)$$

где $t = \overline{1, N_a}$, $c_{шумta}$ - уровень шума в районе t -го аэродрома:

Ограничение определяется как:

$$c_{шум} = U(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \leq c_{шум}^*, \quad (1.45)$$

где $c_{шум}^*$ - определенный для местности максимальный уровень шума, который регламентируются ГОСТами и нормативными документами [45]. Методику расчета могут определять как национальные документы, так и рекомендовать международные организации, например, ИКАО [46].

1.3.6. Математическая постановка задачи

Требуется решить задачу условной многомерной оптимизации, в рамках которой необходимо найти наилучшее значение (максимум или минимум) по каждой исследуемой группе показателей эффективности.

Задача формулируется следующим образом: при заданных алгоритмах управления потоками ВС и средствах поддержки диспетчера u найти лучший вариант структуры ВП и инфраструктуры аэродрома $\hat{s}^* = (\hat{s}_{ВП}, \hat{s}_a)$ среди альтернативных вариантов $s \in S$, при котором показатели обращаются в максимум/минимум, с учетом накладываемых ограничений:

$$\left\{ \begin{array}{l} W_a = W_1(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \rightarrow \min_s^*, \\ W_6 = W_2(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \rightarrow \min_s^*, \\ W_{\text{ОрВД}} = W_3(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \rightarrow \min_s^*, \\ W_{\text{ПВП}} = W_4(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \rightarrow \max_s^*, \\ W_{\text{ПА}} = W_5(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \rightarrow \max_s^*, \\ W_{\text{ср}} = W_6(\bar{s}, \bar{u} | \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \rightarrow \min_s^*, \\ c_a = B(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \leq c_{\text{задер}}^*, \\ c_6 = F(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \leq c_{\text{ТЛС}}^*, \\ c_{\text{ПВП1}} = \Phi_1(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \leq c_{\text{НПС}}^*, \\ c_{\text{ПВП2}} = \Phi_2(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \leq c_{\text{КЗ}}^*, \\ c_{\text{ПА}} = R(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \geq c_{\text{ВПО}}^*, \\ c_{\text{шум}} = U(\bar{s}, \bar{u}, \bar{y}, \bar{\omega}, \bar{v}) \leq c_{\text{шум}}^*, \end{array} \right. \quad (1.46)$$

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

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ОРВД И МЕТОД ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО ВАРИАНТА СТРУКТУРЫ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА И ИНФРАСТРУКТУРЫ АЭРОДРОМА

2.1. Математические модели и алгоритмы расчёта показателей эффективности системы ОрВД

Для решения задачи оценки структуры ВП и инфраструктуры аэродрома были созданы математические модели расчёта показателей эффективности [47,48]. Показатели вычисляются на основе результатов имитационного и расчётного моделирования.

2.1.1. Модели расчета показателей безопасности полетов W_6

Вектор, определяющий безопасность полетов, включает следующие показатели:

$$W_6 = (W_{\text{ПКС}}, W_{\text{ННЭ}}, W_{\text{инт.ВПП}}, W_{\text{конфл.схем}}, W_{\text{риски}})^T. \quad (2.1)$$

2.1.1.1. Количество ПКС $W_{\text{ПКС}}$

Потенциальная конфликтная ситуация – это ситуация, когда необходимо вмешательство диспетчера из-за прогноза возникновения конфликтной ситуации между воздушными судами.

Расчет показателя выполняется на основе построенных 4D-траекторий полета ВС, в том числе, на этапах взлёта, посадки, набора высоты, снижения и полёта по маршруту ОВД. Показатель определяется на основе расчетного (аналитического) моделирования.

Исходными данными для вычисления являются как исходные (до выполнения полёта), так и фактические планы полета.

Для любого рейса $f \in L$, где L – заданный поток ВС, который состоит из m рейсов, траектория воздушного судна задается как:

$$x^f = (x_1^f, \dots, x_i^f, \dots, x_n^f), \forall f \in L,$$

где n – количество точек траектории.

Для увеличения точности расчетов каждый участок маршрута интерполируется с заданным шагом Δt для определения текущего местоположения ВС, исходя из прогноза полета по построенной 4D-траектории. Положение ВС определяется следующими характеристиками:

$$x_i^f = (lat_i^f, long_i^f, alt_i^f, t_i^f),$$

где lat_i^f – широта ВС f в i -й точке траектории, $long_i^f$ – долгота ВС f в i -й точке траектории, alt_i^f – высота ВС f в i -й точке траектории, t_i^f – время нахождения ВС в i -й траектории.

Построение траектории основано на данных по скоростям, определенных в плане полета на участках маршрута ОВД, а также на основе данных по ЛТХ воздушных судов.

Вокруг каждого воздушного судна f определена зона безопасности, которая представляет собой цилиндр с радиусом $R_{без}$ и высотой $H_{без}$:

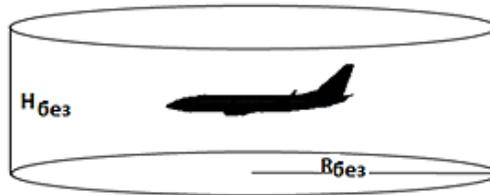


Рисунок 2.1. Зона безопасности воздушного судна

Определим ПКС между двумя любыми ВС в заданном потоке ВД. Для двух любых ВС $f, g \in L, f \neq g$, ПКС $w_{f,g}^{ПКС}$ в заданном потоке ВД определяется:

$$w_{f,g}^{ПКС} = \begin{cases} 1, (t_i^f = t_j^g) \wedge (D_{i,j}^{f,g} \leq 2R_{без}) \wedge (|alt_i^f - alt_j^g| < H_{без}), \\ 0 \text{ иначе,} \end{cases} \quad (2.2)$$

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 . Количество ПКС, таким образом, определяется как:

$$W_{\text{ПКС}} = \sum_{f,g} w_{f,g}^{\text{ПКС}}, \forall f, g \in L, f \neq g. \quad (2.3)$$

Между двумя ВС $f, g \in L$ ортодромия определяется как:

$$D_{i,j}^{f,g} = R_{\text{зем}}(\arccos[\sin(\text{lat}_i^f) \sin(\text{lat}_j^g) + \cos(\text{lat}_i^f) \cos(\text{lat}_j^g) \cos(\text{long}_j^g - \text{long}_i^f)]). \quad (2.4)$$

2.1.1.2 Нарушения норм эшелонирования $W_{\text{ННЭ}}$

ННЭ между двумя ВС происходит, когда нарушаются одновременно горизонтальные и вертикальные нормы эшелонирования. Таким образом, фиксируется уже случившийся конфликт между ВС.

Расчет нарушений норм эшелонирования $W_{\text{ННЭ}}$ производится в процессе имитационного моделирования потоков ВД как в верхнем, так и в нижнем воздушном пространстве на основе траекторий полетов воздушных судов. Маршруты полетов ВС актуализируются сообразно изменению воздушной обстановки и действий диспетчера по разрешению потенциальных конфликтных ситуаций.

Показатель рассчитывается на основе данных о местоположении ВС, т. е. на базе его вектора состояний. Обнаружение ННЭ производится с заданным шагом, настраиваемым исследователем, в процессе моделирования. Нарушения фиксируются, когда имитационная модель диспетчерского управления не позволяет разрешить все ПКС ввиду сложности воздушной обстановки. На рисунке 2.2 отображено нарушение горизонтальных и вертикальных норм эшелонирования между двумя ВС в процессе имитационного моделирования.

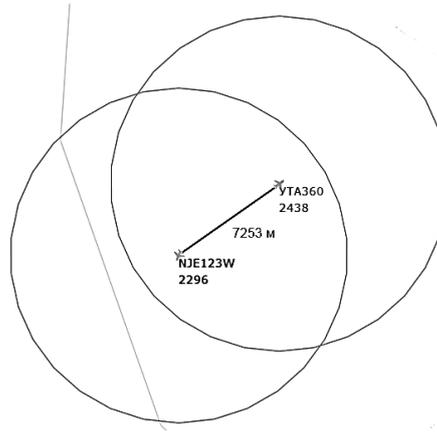


Рисунок 2.2. Пример ННЭ между двумя ВС

Вычисление показателя основано на определении одновременного нарушения как вертикальных, так и горизонтальных норм эшелонирования. Однако в отличие от показателя $W_{\text{ПКС}}$, где анализируются плановые данные, нарушения норм эшелонирования вычисляются по фактическим траекториям полета ВС, полученным в ходе моделирования. Тем самым, $W_{\text{ННЭ}}$ можно записать в виде следующего выражения: для двух любых ВС для двух $\forall f, g \in L, f \neq g$ в момент времени t в процессе работы алгоритма по обнаружению ННЭ:

$$w_{f,g}^{\text{ННЭ}} = \begin{cases} 1, (D_{i,j}^{f,g} \leq 2R_{\text{без}}) \wedge (|alt^f - alt^g| < H_{\text{без}}) \wedge (t \in [t_{\text{нач}}, t_{\text{кон}}]), \\ 0 \text{ иначе,} \end{cases} \quad \text{где} \quad (2.5)$$

$t_{\text{нач}}$ – время начала моделирования потока ВС,

$t_{\text{кон}}$ – время окончания моделирования.

Тогда $W_{\text{ННЭ}}$ – определяется следующим образом:

$$W_{\text{ННЭ}} = \sum_{f,g} w_{f,g}^{\text{ННЭ}}, \forall f, g \in L, f \neq g. \quad (2.6)$$

Данный показатель предназначен для оценки конфликтности потока ВД и сложности структуры ВП в условиях как существующих, так и прогнозных потоков ВД.

2.1.1.3 Количество нарушений временных интервалов на ВПП $W_{\text{инт.ВПП}}$

Показатель «Количество нарушений интервалов на ВПП» входит в группу по безопасности полётов. Расчёт производится по результатам имитационного

моделирования, когда прогнозируется/выявляется нарушение минимумов эшелонирования по причине турбулентности в следе. Исходными данными для показателя являются плановые и фактические временные характеристики взлёта и посадки воздушных судов. При этом временные характеристики могут быть результатом работы средства планирования потоков ВД как на уровне аэропорта (AMAN/DMAN), так и результатом работы централизованной системы планирования потоков ВД. Таким образом, рассчитывается разница между ожидаемыми/назначенными временами вылета и прилета ВС и сравнивается с минимальными допустимыми интервалами.

Пусть заданы поток вылетающих ВС $U \subset L$ и поток прибывающих ВС $V \subset L$. ВС $f \in U$ имеет время вылета $t_{\text{выл}}^f$, $t_{\text{выл}}^f \in [t_{\text{нач}}, t_{\text{кон}}]$, где $t_{\text{нач}}$ – время начала моделирования, $t_{\text{кон}}$ – время окончания моделирования. Время прилета $t_{\text{прил}}^g$ воздушного судна $g \in V$ находится в диапазоне $t_{\text{прил}}^g \in [t_{\text{нач}}, t_{\text{кон}}]$.

При расчете нарушений интервалов (минимумов эшелонирования) ВС делятся на категории турбулентности (в зависимости массы): легкие (L), средние (M), тяжелые (H) и супертяжелые (J). Определим матрицу для 4 категорий турбулентности (при увеличении категорий матрица может быть расширена). Определим матрицу $M_{4 \times 4}$ - минимальных интервалов между ВПО, где строки отождествляют четыре категории ВС, которое выполняют операцию взлет/посадка первым, столбцы – отождествляют, соответственно, категории второго ВС. Элементами $m_{p,q}$ - матрицы M - в общем виде являются минимальные допустимые временные интервалы между последовательно выполняющими операции взлет/посадка ВС с категориями турбулентности, которые соответствуют строке p и столбцу q (рисунок 2.3). В итоге, матрица M задает минимумы эшелонирования между воздушными судами на ВПП (системе ВПП).

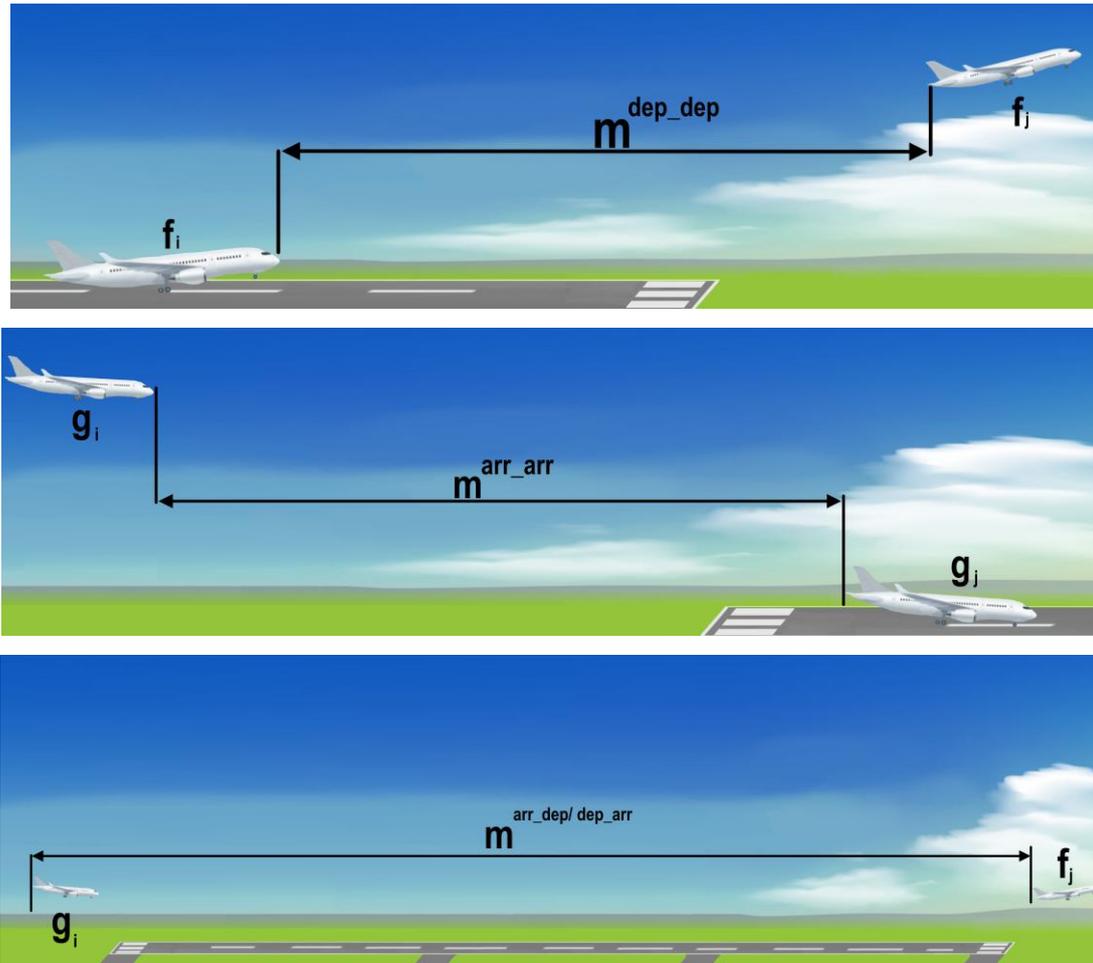


Рисунок 2.3. Временные интервалы (минимумы эшелонирования) на ВПП

Зададим 4 матрицы: $M_{arr.arr}, M_{dep.dep}, M_{arr.dep}, M_{dep.arr}$, где arr – прилетающие ВС, dep – вылетающие ВС. Компонентами матриц соответственно являются: $m_{p,q}^{arr.arr}, m_{p,q}^{dep.dep}, m_{p,q}^{arr.dep}, m_{p,q}^{dep.arr}$. Минимальные допустимые временные интервалы задаются между двумя прилетающими ВС $g_p^i, g_q^j \in V, i \neq j$, вылетающими ВС $f_p^i, f_q^j \in U, i \neq j$ или между прилетающим и вылетающим ВС соответственно.

В процессе моделирования операций взлет/посадка для двух $\forall f_i, f_j \in L, i \neq j$, выполняющих последовательно взлётно-посадочные операции, где f_i - ВС, которое выполняет взлет/посадку первым, f_j - ВС, которое соответственно выполняет операцию вторым, нарушение интервалов (минимумов эшелонирования) на ВПП (системе ВПП)

$w_{f,g}^{инт.ВПП}$ задается как:

$$w_{f,g}^{\text{инт.ВПП}} = \begin{cases} 1, (t_{\text{выл}}^{f_j, P} - t_{\text{выл}}^{f_i, Q} < m_{p,q}^{\text{dep.dep}}) \vee (t_{\text{прил}}^{g_j, P} - t_{\text{прил}}^{g_i, Q} < m_{p,q}^{\text{arr.arr}}) \vee \\ (t_{\text{выл}}^{g_j, P} - t_{\text{выл}}^{f_i, Q} < m_{p,q}^{\text{dep.arr}}) \vee (t_{\text{выл}}^{f_j, P} - t_{\text{прил}}^{g_i, Q} < m_{p,q}^{\text{arr.dep}}), f_i, f_j \in U, g_i, g_j \in V, \\ 0 \text{ иначе.} \end{cases} \quad (2.7)$$

Показатель «Количество нарушений временных интервалов на ВПП» запишем следующим образом:

$$W_{\text{инт.ВПП}} = \sum_{f,g} w_{f,g}^{\text{инт.ВПП}}, \forall f, g \in L, f \neq g. \quad (2.8)$$

2.1.1.4. Количество конфликтных схем маневрирования $W_{\text{конфл.схем}}$

Одним из условий проектирования новой структуры воздушного пространства при наличии расположенных на небольшом отдалении друг от друга нескольких аэродромов является обеспечение бесконфликтных прибывающих и вылетающих потоков ВД с целью снижения нагрузки на диспетчера. Однако при проектировании схем маневрирования может не обеспечиваться их самоэшелонирование (бесконфликтность) из-за невозможности учёта летно-технических характеристик всех воздушных судов на этапе разработки. Имитационное моделирование позволяет промоделировать поток ВД с учётом различных типов ВС и оценить структуру ВП по данному показателю.

Конфликтность схем фиксируется, когда определяется нарушение норм эшелонирования между ВС, выполняющими полет по схемам с учётом отклонений ВС в боковой плоскости и ограничений в вертикальной плоскости, в процессе моделирования. Показатель вычисляется на основе результатов имитационного моделирования в диспетчерской зоне района аэродрома. Пример конфликтных схем двух разных аэродромов представлен на рисунке 2.4.

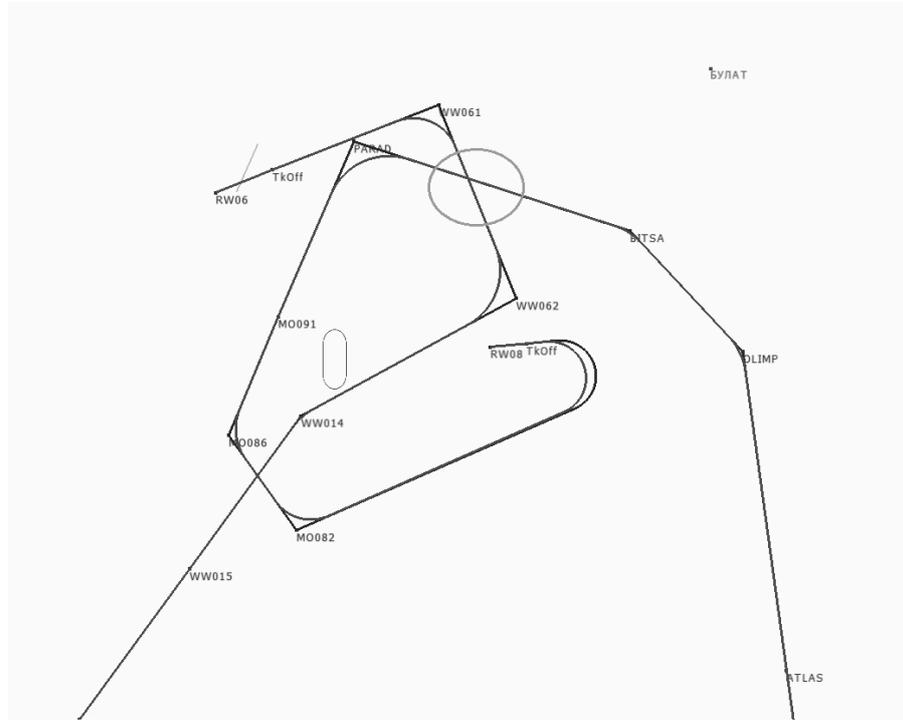


Рисунок 2.4. Конфликт на маршрутах вылета с разных аэродромов

Пусть $f_p^{i,k}$ – p -й рейс, который выполняет полет по i -му маршруту прибытия на k -й аэродром, $g_q^{j,l}$ – q -й рейс, который осуществляет полет по j -му маршруту вылета из l -го аэродрома. Тогда конфликт между схемами маневрирования запишем как:

$$W_{i,j,l,k}^{\text{конфл.схем}} = \begin{cases} 1, (w_{g_p^{i,k}, g_q^{j,l}}^{\text{инт.ВПП}} = 1, \forall g_p^{i,k}, g_q^{j,l}, p \neq q, i \neq j, l \neq k) \vee \\ \vee (w_{f_p^{i,k}, f_q^{j,l}}^{\text{инт.ВПП}} = 1, \forall f_p^{i,k}, f_q^{j,l}, p \neq q, i \neq j, l \neq k) \vee \\ \vee (w_{f_p^{i,k}, g_q^{j,l}}^{\text{инт.ВПП}} = 1, \forall f_p^{i,k}, g_q^{j,l}, l \neq k), \\ 0 \text{ иначе.} \end{cases} \quad (2.9)$$

Показатель $W_{\text{конфл.схем}}$ находится следующим образом:

$$W_{\text{конфл.схем}} = \sum_{i,j,l,k} w_{i,j,l,k}^{\text{конфл.схем}}. \quad (2.10)$$

2.1.1.5. Оценка рисков $W_{\text{риски}}$

Оценка рисков в области безопасности полетов в соответствии с документами ИКАО [49] заключается в определении частоты возникновения опасных событий (столкновений ВС, нарушений норм эшелонирования, опасных сближений) на час

полета. Для решения данной задачи используются различные методы и математические модели, а также компьютерное моделирование, включая аналитическое и имитационное моделирование. Исторически сложилось, что большее распространение получили аналитические модели. Однако в последнее время популярность приобретает применение имитационных моделей.

В комплексе имитационного моделирования реализованы две модели (аналитическая и имитационная) для оценки рисков. Описание методов и моделей в составе комплекса приведено в [50-53].

2.1.2 Модели расчета показателей эксплуатационной эффективности для пользователей ВП W_a

Группа показателей, которая характеризует эффективность для эксплуатантов (пользователей ВП):

$$W_a = (W_{a.зад}, W_{протяж.марш}, W_{a.налет}, W_{a.топл.эф}, W_{ортодр}, W_{врем.рул})^T. \quad (2.11)$$

2.1.2.1. Задержки $W_{a.зад}$

Задержки являются одним из основных показателей для пользователей ВП. Показатель характеризует не только экономическую эффективность, но и пунктуальность выполнения полетов, а также участвует в расчете других показателей эффективности и ПВП, и ПА [37,54].

Расчет показателя производится по результатам имитационного моделирования полетов воздушных судов в диспетчерской зоне района аэродрома (аэроузла). Задержки рассчитываются как разница между плановыми временами взлёта/посадки, определяемыми пользователями ВП совместно с системой планирования использования ВП и системой УВД и фактическими временами взлёта/посадки. Для получения фактических данных используется имитационная модель диспетчерского регулирования в диспетчерской зоне района аэродрома, включая построение бесконфликтной очереди

прибывающих и вылетающих ВС. Применяемые имитационной моделью меры регулирования приводят к изменению временных характеристик взлёта/посадки.

Для любого ВС $f \in L$, где f – прилетающее или вылетающее ВС, задержка $w^{\text{зад}}$ рассчитывается:

$$w^{\text{зад}} = \begin{cases} t_{\text{в_факт}}^f - t_{\text{в_план}}^f, t_{\text{п_факт}}^f - t_{\text{п_план}}^f > \varepsilon, \\ 0 & t_{\text{факт}}^f - t_{\text{план}}^f \leq \varepsilon, \end{cases} \quad (2.12)$$

где $t_{\text{п_план}}$ – плановое время прибытия, $t_{\text{п_факт}}$ – фактическое время прибытия, если ВС f прилетает и $t_{\text{в_план}}$ – плановое время вылета, $t_{\text{в_факт}}$ – фактическое время вылета, если ВС f вылетает, ε - погрешность расчета задержки.

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

$$W_{\text{а.зад}}^{\text{сред}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m w_i^{\text{зад}}, \quad (2.13)$$

$$W_{\text{а.зад}}^{\text{max}} = \max_i(w_i^{\text{зад}}), \quad (2.14)$$

где m – количество рейсов в моделируемом потоке ВС.

Расчет производится как для средней часовой задержки, так и для максимальной.

Пример применения меры регулирования «веер» приведен на рисунке 2.5. Траектории ВС (темным цветом) удлиняются для создания безопасных интервалов с ВС, следующими перед регулируемым ВС.

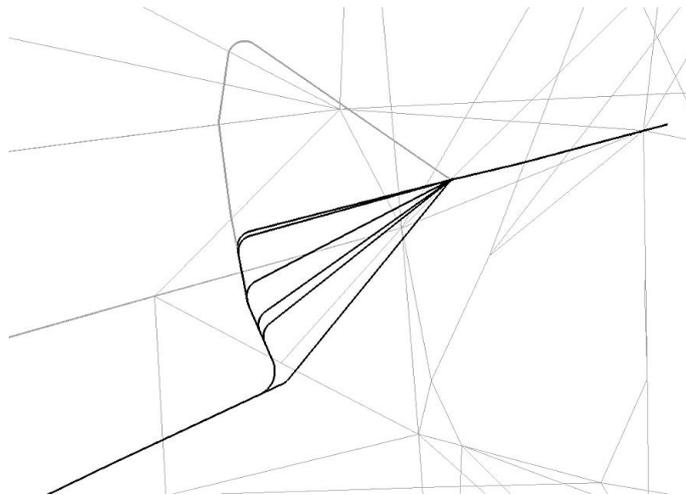


Рисунок 2.5. Пример удлинения траектории ВС на прилете

2.1.2.2 Протяженность маршрута $W_{\text{протяж.марш}}$

Показатель рассчитывает протяженность маршрута ВС.

Расчёт производится на основе результатов имитационного моделирования по фактической траектории ВС, характеризуя горизонтальную эффективность маршрута. Протяженность маршрута, полученная по результатам имитационного моделирования, дает возможность пользователям ВП учесть фактическую дальность полёта с учётом загруженности воздушного пространства и, как следствие, возможного удлинения траектории ВС.

Для любого ВС $f \in L$ протяженность в пределах моделируемой области $w_f^{\text{протяж}}$ определяется как:

$$w_f^{\text{протяж}} = l_{\text{end}}^f - l_{\text{begin}}^f, \quad (2.15)$$

где l_{begin} – протяженность маршрута в момент входа ВС в моделируемую область ВП, l_{end} – протяженность маршрута в момент выхода ВС из моделируемой области ВП.

Следует сказать, что для рейсов, вылетающих из аэродромов в пределах моделируемой области, $l_{\text{begin}} = 0$ для прилетающих рейсов l_{end} будет совпадать с фактической протяженностью, полученной по результатам моделирования.

Показатель «Протяженность маршрута» определяется как среднее значение на один рейс в пределах моделируемой области:

$$W_{\text{протяж.марш}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m w_{f_j}^{\text{протяж}}. \quad (2.16)$$

Расчет производится как одному рейсу, так и по всему потоку ВС.

2.1.2.3 Налет (продолжительность полета) $W_{\text{а.налет}}$

Налет вычисляется по результатам имитационного моделирования и является одним из показателей, характеризующих эффективность для эксплуатантов (пользователей ВП).

Показатель позволяет учесть как горизонтальную, так и вертикальную неэффективность маршрута на всех этапах полета. В имитационном моделировании заложена модель индекса эффективности, значение которого соответствует минимальному расходу топлива и максимальной дальности полёта.

Налет $w_f^{\text{налет}}$ для любого ВС $f \in L$ в пределах моделируемой области определяется как

$$w_f^{\text{налет}} = t_{\text{end}}^f - t_{\text{begin}}^f, \quad (2.17)$$

где t_{begin} - время влета в моделируемую область, t_{end} - время вылета из моделируемой области.

Налет по всем ВС вычисляется следующим образом:

$$W_{\text{а.налет}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m w_{f_j}^{\text{налет}}. \quad (2.18)$$

2.1.2.4. Расход топлива $W_{\text{а.топл.эф}}$

Расход топлива является показателем, характеризующим экономическую эффективность для пользователей ВП, в частности, топливную эффективность. Показатель определяется по результатам моделирования управляемых полетов воздушных судов в диспетчерской зоне района аэродрома и в верхнем воздушном пространстве. Расход топлива рассчитывается в соответствии с моделью BADA [55], в которой содержатся летно-технические характеристики по всем типам ВС гражданской авиации. Учитывается режим полёта, взлетный вес и другие характеристики.

Расчет выполняется по 4D-траектории полета воздушного судна с учетом изменения его веса в полете в ходе моделирования. Начальный взлетный вес задается исходя из критерия максимальной дальности полета, а также задаваемой загрузки и запаса топлива.

Для любого $f \in L$ расход топлива в пределах рассматриваемой области полета:

$$w_f^{\text{расход.топл}} = \sum_{i=1}^n \Delta w_i^f, \quad (2.19)$$

где Δw_i^f - расход топлива ВС на i -м участке 4D - траектории ВС, n - количество элементарных участков, которые задаются в соответствии с летно-техническими характеристиками ВС.

Показатель «Расход топлива» определяется средним значением на рейс:

$$W_{\text{а.топл.эф}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m w_{f_j}^{\text{расход.топл}} . \quad (2.20)$$

2.1.2.5. Ортодромичность маршрута $W_{\text{ортодр}}$

Показатель определяет горизонтальную неэффективность на маршруте и ориентирован на один из ключевых показателей Евроконтроля [56] и ИКАО [57] по оценке ключевых характеристик системы ОрВД.

Расчет показателя базируется на сравнительном анализе длины маршрута (планового или фактического) и ортодромии между точкой начала маршрута и конечной точкой маршрута. Показатель позволяет оценить вклад рассчитанной неэффективности маршрута в пределах исследуемой области относительно всей протяженности маршрута. Вычисление производится с использованием расчетного (аналитического) моделирования на базе планов полета. Анализируется только полёт по маршруту ОВД (верхнее воздушное пространство), где оценивается ортодромичность структуры ВП. На других этапах полёта (взлёт, посадка, снижение) большой вклад в неэффективность маршрута приносит диспетчерское регулирование.

На рисунке 2.6 приведена траектория воздушного судна, полученные по результатам моделирования и кратчайшее расстояние.



Рисунок 2.6. Ортодромичность маршрута. О – пункт отправления, D – пункт назначения

Показатель $W_{\text{ортодр}}$ рассчитывается для всего потока ВД для любой исследуемой области $j \in S_{\text{ВП}}$ и определяется в процентном отношении:

$$W_{\text{ортодр}} = \frac{\sum_f L_j^f - \sum_f H_j^f}{\sum_f H_j^f} \% = \left(\frac{\sum_f L_j^f}{\sum_f H_j^f} - 1 \right) \%, f \in L, \quad (2.21)$$

где L_j^f - фактическое расстояние по маршруту полета рейса f в исследуемой области j , H_j^f - достигнутое расстояние по маршруту полета рейса f в исследуемой области j .

Достигнутое расстояние H_j^f определяется как проекция моделируемой части маршрута на ортодромию (кратчайшее расстояние) маршрута и определяет «вклад» исследуемой части маршрута в общую протяженность маршрута.

2.1.2.6. Время руления ВС по поверхности аэродрома $W_{\text{врем.рул}}$

Время руления ВС по поверхности аэродрома рассчитывается с момента отправления ВС от места стоянки до исполнительного старта и, наоборот, от съезда с ВПП до места стоянки. Показатель позволяет оценить эффективность использования инфраструктуры аэродрома для эксплуатантов.

Расчет производится по результатам имитационного моделирования аэродромных операций, включая руление по поверхности аэродрома. Показатель включает в себя выполнение таких операций, как: время на запуск двигателей, продолжительность противообледенительной обработки, процесс буксировки и др. Также учитываются задержки при ожидании на месте стоянки и в процессе руления по поверхности аэродрома, возникающие в ходе моделирования в связи с интенсивным трафиком.

Время руления на аэродроме для любого ВС рассчитывается следующим образом:

$$W_f^{\text{руление}} = \begin{cases} t_{\text{АТОТ}} - t_{\text{АОБТ}}, \forall f \in U, \\ t_{\text{АИБТ}} - t_{\text{АЛДТ}}, \forall g \in V, \end{cases} \quad \text{где} \quad (2.22)$$

$t_{\text{АТОТ}}$ - фактическое время вылета (АТОТ - actual take-off time),

$t_{\text{АОБТ}}$ - фактическое время начала движения ВС от МС (АОБТ - actual off-blocks time),

t_{AIBT} - фактическое время занятия ВС МС (AIBT - actual in-blocks time),

t_{ALDT} - фактическое время прилета (ALDT - actual landing time).

Значение показателя по всем рейсам определяется:

$$W_{\text{врем.рул}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m w_{f_j}^{\text{руление}}. \quad (2.23)$$

В рамках проведения сравнительного анализа может рассчитываться как среднее, так и максимальное значение показателя. Максимальное значение показателя дает представление о «выбросах», причиной которых могут быть недостатки в организации и использовании инфраструктуры аэродрома. Отдельно анализируются прибывающие и вылетающие рейсы.

2.1.3. Модели расчета показателей эффективности для системы ОрВД $W_{\text{ОрВД}}$

Группа показателей, которая характеризует использование элементов структуры ВП, задается вектором:

$$W_{\text{ОрВД}} = (W_{\text{загр.уч.ВТ}}, W_{\text{загр.точек.ВП}}, W_{\text{эш}}, W_{\text{исп.30}}, W_{\text{МС}})^T. \quad (2.24)$$

2.1.3.1. Показатель неравномерности загруженности участков ВТ $W_{\text{загр.уч.ВТ}}$

Под загруженностью участка ВТ понимается интенсивность ВД на участке, выраженная в количестве воздушных судов, пролетающих через участок в единицу (интервал) времени. В основном, в качестве анализируемого интервала используется час [58].

Цель расчета показателя заключается в определении участков воздушных трасс с высокой интенсивностью воздушного движения и выявлении неравномерности загруженности сети воздушных трасс. Вычисление производится по результатам проведения расчетного (аналитического) моделирования. Исходными данными для расчёта являются потоки воздушного движения.

Загрузка любого i -го участка ВТ $s_{i,\text{участок.ВТ}} \in S_{\text{ВП}}$ любым рейсом f в интервале $[t_{\text{begin}}, t_{\text{end}})$:

$$w_{f, s_{i,\text{участок.ВТ}}}^{\text{загр.уч.ВТ}} = \begin{cases} 1, & s_{i,\text{участок.ВТ}}^f \in [t_{\text{begin}}, t_{\text{end}}), \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (2.25)$$

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 загрузки i -го участка ВТ на временном интервале для исследуемого потока ВД L определяется:

$$W_{\text{загр.уч.ВТ}}^i = \sum_{j=1}^m w_{f_j, s_{i,\text{участок.ВТ}}}^{\text{загр.уч.ВТ}}. \quad (2.26)$$

Загруженность участков воздушных трасс 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 загрузки участков ВТ рассчитывается как среднеквадратичное отклонение:

$$W_{\text{загр.уч.ВТ}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W_{\text{загр.уч.ВТ}}^i - M(W_{\text{загр.уч.ВТ}}))^2}{n}}, \quad (2.27)$$

где

$$M(W_{\text{загр.уч.ВТ}}) = \frac{\sum_{i=1}^n W_{\text{загр.уч.ВТ}}^i}{n}. \quad (2.28)$$

Дополнительно в целях анализа использования сети воздушных трасс вычисляются статистические характеристики загрузки участков ВТ, в том числе: математическое ожидание, квартили, медиана и другие. Временной интервал $[t_{\text{begin}}, t_{\text{end}})$ может варьироваться от нескольких минут до суток.

2.1.3.2. Показатель неравномерности загруженности точек ВП $W_{\text{загр.точек.ВП}}$

Под загруженностью точки воздушного пространства понимается интенсивность ВД, которая выражена в количестве ВС, пролетающих точку ВП в единицу (интервал) времени.

Показатель позволяет оценить неравномерность загруженности трассовой структуры в части точек ВП и предназначен для выявления точек повышенной сложности, где ввиду высокой интенсивности требуется дополнительное внимание диспетчера с целью контроля соблюдения безопасных интервалов между ВС.

Загрузка i -й точки ВП $s_{i,\text{точка.ВП}} \in S_{\text{ВП}}$ любым рейсом f в интервале $[t_{\text{begin}}, t_{\text{end}})$ определяется как

$$W_{f, s_{i,\text{точка.ВП}}}^{\text{загр.точка.ВП}} = \begin{cases} 1, & t_{s_{i,\text{точка.ВП}}}^f \in [t_{\text{begin}}, t_{\text{end}}), \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (2.29)$$

где $t_{s_{i,\text{точка.ВП}}}^f$ - время пролета точки $s_{i,\text{точка.ВП}}$, t_{begin} - начало интервала времени оценки, t_{end} - конец интервала времени оценки.

Показатель на интервале $[t_{\text{begin}}, t_{\text{end}})$ в i -й точки ВП для потока ВС L вычисляется:

$$W_{\text{загр.точка.ВП}}^i = \sum_{j=1}^m w_{f_j, s_{i,\text{точка.ВП}}}^{\text{загр.точка.ВП}}. \quad (2.30)$$

Загруженность по всем точкам ВП задается в виде вектора:

$$(W_{\text{загр.точка.ВП}}^1, \dots, W_{\text{загр.точка.ВП}}^i, \dots, W_{\text{загр.точка.ВП}}^n)^T,$$

где n - количество точек в структуре ВП.

Показатель неравномерности загруженности точек ВП рассчитывается как среднеквадратичное отклонение:

$$W_{\text{загр.точек.ВП}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W_{\text{загр.точка.ВП}}^i - M(W_{\text{загр.точка.ВП}}))^2}{n}}, \quad (2.31)$$

где

$$M(W_{\text{загр.точка.ВП}}) = \frac{\sum_{i=1}^n W_{\text{загр.точка.ВП}}^i}{n}. \quad (2.32)$$

Для проведения анализа рассчитываются статистические характеристики и проводится анализ с использованием диаграмм, построенных в комплексе имитационного моделирования.

2.1.3.3. Показатель использования ВС неэффективных эшелонов $W_{\text{эш}}$

Показатель предназначен для анализа использования воздушными судами эшелонов (высот) при выполнении полетов по маршруту ОВД.

Вычисление показателя производится на основе расчетного (аналитического) моделирования. Исходными данными являются планы полетов воздушных судов. Анализ показателя по фактическим полетным данным позволяет определить эффективность использования действующей структуры ВП. При исследовании перспективного варианта структуры ВП анализ прогнозных потоков ВД по данному показателю позволяет определить как эффективность, так и доступность структуры ВП для выполнения полётов в условиях заданных диапазонов эшелонов.

Каждый участок ВТ состоит из одного или нескольких диапазонов доступных для полета эшелонов с вертикальным разделением, равным 300 м (~1000 футов).

Использование любого i -го эшелона полета h_i любым рейсом $f \in L$ определяется:

$$w_f^{i\text{эш}} = \begin{cases} 1, & alt_k^f = h_i, \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (2.33)$$

где alt_k^f - высота (эшелон) полета ВС f на k -м участке маршрута.

Показатель использования ВС неэффективных эшелонов для i -го эшелона:

$$W_{\text{эш}}^i = \sum_{j=1}^m w_{f_j}^{i\text{эш}}. \quad (2.34)$$

Для всех эшелонов задается вектор-столбец:

$$(W_{\text{эш}}^1, \dots, W_{\text{эш}}^i, \dots, W_{\text{эш}}^n)^T,$$

где n – количество использованных эшелонов, $W_{\text{эш}}^i$ - количество использований i -го эшелона.

Определим показатель использования воздушными судами неэффективных эшелонов для каждого рейса:

$$W_{\text{эш}} = \frac{\sum_{i=1}^n \max(h_{\text{опт}} - h_i, 0) W_{\text{эш}}^i}{\sum_{i=1}^n W_{\text{эш}}^i}, \quad (2.35)$$

где $h_{\text{опт}}$ – оптимальный эшелон полета для исследуемого потока ВС.

2.1.3.4. Использование зон ожидания $W_{\text{исп.ЗО}}$

Показатель предназначен для анализа эффективности организации и использования зон ожидания в исследуемой структуре ВП.

Зоны ожидания используются в процессе имитационного моделирования управляемых полетов ВС как на маршруте ОВД, так и в диспетчерской зоне района аэродрома. Назначение ВС зон ожидания является одной из мер регулирования, применяемых в имитационной модели диспетчерского управления при создании потоков прибывающих ВС. Показатель позволяет оценить пропускную способность структуры ВП.

Показатель рассчитывается следующим образом:

$$W_{\text{исп.ЗО}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m w_{f_j}^{\text{исп.ЗО}}, \quad (2.36)$$

где $w_{f_j}^{\text{исп.ЗО}}$ - количество кругов в ЗО j -м ВС, $f \in L$.

Анализ выполняется как по всем зонам ожидания моделируемого аэродрома, так и отдельно по использованию каждой зоны.

2.1.3.5. Показатель неэффективности использования мест стоянок $W_{\text{МС}}$

Показатель позволяет оценить ресурсы моделируемого аэропорта в части использования мест стоянок.

Назначение мест стоянок является многофакторной задачей, где учитываются предпочтения пользователей ВП, операторов аэропортов, а также текущая загрузка и возможности аэропорта. Показатель рассчитывается в процессе имитационного

моделирования операций на поверхности аэродрома. Задачей показателя является оценка эффективности использования мест стоянок на аэродроме в условиях как существующего, так и прогнозного потока ВД.

Пусть k_i - количество занятых МС на аэродроме в i -й момент времени, $k_{\text{опт}}$ - оптимальное значение количества занятых МС, где могут располагаться ВС в соответствии с их типом и типом МС. Тогда показатель определяется:

$$W_{\text{МС}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (k_i - k_{\text{опт}})^2}{n}}, \quad (2.37)$$

где n - количество интервалов времени.

Анализ неэффективности использования МС следует проводить совместно с анализом показателей «время руления» и «задержки» на аэродроме.

2.1.4. Модели расчета показателей пропускной способности ВП $W_{\text{ПВП}}$

Группа показателей, которая характеризует пропускную способность ВП, задается вектором:

$$W_{\text{ПВП}} = (W_{\text{врем.загр.дисп}}, W_{\text{сек}})^T. \quad (2.38)$$

2.1.4.1. Показатель равномерности временной загрузки диспетчера $W_{\text{врем.загр.дисп}}$

Под временной загрузкой диспетчера понимается продолжительность по времени выполнения диспетчером операций по обеспечению контроля и управления ВД в его зоне ответственности.

Расчет показателя производится на основе как расчетного (аналитического) моделирования верхнего воздушного пространства, так и имитационного моделирования диспетчерского управления в районе аэродрома (аэроузла) [59].

Временная загруженность рассчитывается как сумма относительных временных затрат P_i на выполнение операций контроля и УВД диспетчером в единицу времени. Затраты P определяются вектором:

$$P = (P_1, \dots, P_8), \text{ где}$$

P_1 – затраты на принятие ВС на сопровождение в сектор;

P_2 – затраты на сопровождение ВС при смене эшелона;

P_3 – затраты на обнаружение и разрешение ПКС;

P_4 – затраты на передачу ВС в смежный сектор;

P_5 – затраты на назначение маршрута прибытия;

P_6 – затраты на команду по спрямлению ВС "Direct To";

P_7 – затраты на периодический анализ воздушной обстановки.

Затрата на выполнение k -й операции на интервале оценки $[t_{begin}, t_{end})$:

$$P_k = \begin{cases} \tau_k, t_{pk} \in [t_{begin}, t_{end}), \\ 0 \text{ иначе,} \end{cases} \quad (2.39)$$

где τ_k - заданная исследователем длительность выполнения операции.

Суммарные относительные затраты по i -й группе затрат:

$$P_i = \frac{1}{t_{инт}} \sum_k p_k^i, \quad (2.40)$$

где $t_{инт} = t_{end} - t_{begin}$ – продолжительность интервала оценки.

Временная загруженность j -го сектора на интервале оценки $[t_{begin}, t_{end})$:

$$W_{\text{врем.загр.дисп}}^j = \sum_{i=1}^8 P_i^j. \quad (2.41)$$

Тогда показатель равномерности временной загруженности диспетчера в исследуемом варианте структуры ВП по всем секторам диспетчерского управления вычисляется следующим образом:

$$W_{\text{врем.загр.дисп}} = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (W_{\text{врем.загр.дисп}}^j - M(W_{\text{врем.загр.дисп}}))^2}{n}}, \quad (2.42)$$

где n - количество интервалов оценки по всем секторам.

2.1.4.2. Показатель загрузки секторов без превышения НПС сектора $W_{\text{сек}}$

Под загрузкой сектора понимается интенсивность ВД в секторе, определяемая количеством входов ВС в зону ответственности диспетчера за единицу времени. Показатель рассчитывается как по результатам расчетного (аналитического) моделирования, когда расчёт происходит по исходным планам полета, так и по фактическим траекториям ВС, полученные по результатам имитационного моделирования.

Загрузка любого i -го сектора $s_{i,\text{сек}} \in S_{\text{ВП}}$ любым рейсом f в интервале $[t_{\text{begin}}, t_{\text{end}})$:

$$w_{f,s_{i,\text{сек}}}^{\text{сек}} = \begin{cases} 1, & t_{s_{i,\text{сек}}}^f [t_{\text{begin}}, t_{\text{end}}), \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (2.43)$$

где $t_{i,\text{сек}}^f$ - время взлета 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:

$$W_{\text{сек}}^i = \sum_{j=1}^m w_{f_j,s_{i,\text{сек}}}^{\text{сек}}. \quad (2.44)$$

Загрузка секторов задается вектором:

$$(W_{\text{сек}}^1, \dots, W_{\text{сек}}^i, \dots, W_{\text{сек}}^n)^T,$$

где n – количество секторов в структуре ВП.

Показатель загрузки секторов без превышения НПС рассчитывается как:

$$W_{\text{сек}} = \frac{n}{\sum_{i=1}^n (W_{\text{НПС}}^i - W_{\text{сек}}^i)}, \quad (2.45)$$

где $W_{\text{НПС}}^i$ - НПС i -го сектора. Норматив рассчитывается согласно [60].

Показатель рассчитывается для часовых и суточных значений каждого сектора.

2.1.5. Модели расчета показателей пропускной способности аэродрома $W_{\text{ПА}}$

Группа показателей, которая характеризующая ПА, задается вектором:

$$W_{ПА} = (W_{ВПО} \cdot W_{пересеч})^T. \quad (2.46)$$

2.1.5.1. Количество ВПО $W_{ВПО}$

Пропускная способность аэродрома задается количеством взлетно-посадочных операций в единицу времени.

Существует аналитическая методика расчета технической возможности аэродрома [61], утвержденная Министерством транспорта. Методика основана на базе показателей технических возможностей объектов аэропорта, включая состояние покрытия ВПП, среднесуточных объемов авиаперевозок, различных метеоусловий и т.д. В то же время, методика не учитывает ограничения, которые могут являться следствием предшествующих событий, загруженность диспетчера, влияние пропускной способности структуры воздушного пространства. В данной работе показатель «количество ВПО» основан на методике, реализованной в составе комплекса моделирования, и ориентированной на расчёт задержек по результатам имитационного моделирования и их сравнения с допустимым уровнем задержек как в воздухе, так и на земле.

Количество ВПО в i – й интервал времени:

$$W_{ВПО}^i = \sum_j w_{jВПО}^i, \quad (2.47)$$

где $w_{jВПО}^i$ - вылет или прилет j – го ВС в i – й интервал времени.

Далее происходит статистическая обработка полученных значений. На рисунке 2.7 представлен пример проведения статистической обработки путем построения аппроксимирующего полинома, где по оси абсцисс - интенсивности часовых значений ВПО, по оси ординат - задержки. Точки означают часовые значения количества ВПО на аэродроме по результатам моделирования и соответствующие им задержки. Часовые значения интенсивности ВД аппроксимируются полиномом 2-й степени методом МНК.

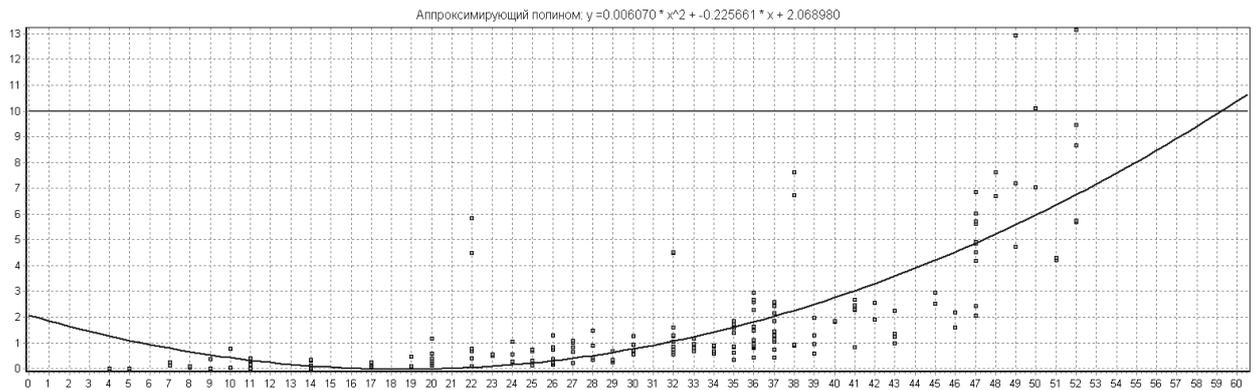


Рисунок 2.7. Количество ВПО

Расчет максимального количества взлетно-посадочных операций производится путем поиска пересечения кривой полинома и прямой допустимого уровня задержки, значение которой задается исследователем [62,63].

2.1.5.2. Количество аэродромных операций без пересечения ВПП $W_{\text{пересеч}}$

Пропускная способность аэродрома определяется не только количеством ВПО, но и количеством операций по пересечению ВПП при рулении ВС по площади маневрирования.

Снижение количества пересечений взлетно-посадочной полосы при рулении ВС позволяет повысить пропускную способность аэродрома за счет снижения времени занятости ВПП. Расчет производится по результатам моделирования аэродромных операций, включая взлет, посадку, руление по поверхности аэродрома.

Количество аэродромных операций без пересечения ВПП в i -й интервал времени:

$$W_{\text{пересеч}} = W_{\text{пересеч}}^{\text{const}} - \sum_j w_{\text{пересеч}}^j, \quad (2.48)$$

где $W_{\text{пересеч}}^{\text{const}}$ - заданный уровень максимального допустимого количества пересечения

ВПП в интервал времени, $w_{\text{пересеч}}^j$ - пересечение ВПП j -м ВС в i -й интервал времени.

2.1.6. Модели расчета показателей влияния на окружающую среду $W_{\text{ср}}$

Вектор показателей, характеризующих влияние на окружающую среду:

$$W_{\text{ср}} = (W_{\text{шум}}, W_{\text{CO}_2})^T. \quad (2.49)$$

2.1.6.1. Шумовые воздействия $W_{\text{шум}}$

Показатель позволяет оценить шумовые воздействия в диспетчерской зоне района аэродрома. Рассчитывается индекс шума на поверхности земли в разное время суток.

Нахождение жилых массивов в непосредственной близости к аэропортам с высокой интенсивностью полетов приводит к возникновению проблем, связанных с шумовым загрязнением и как следствие жалобами жителей на аэропорты и провайдера аэронавигационного обслуживания. Показатель основан на обработке траекторий полета, полученных по результатам моделирования полетов ВС в диспетчерской зоне района аэродрома. Расчет выполняется в соответствии с методическими материалами [46,64]. Для оценки строятся контуры шума вокруг аэродрома. Учитывается траектория полета ВС и его характеристики, включая расположение и режим мощности двигателей и пр.

Эквивалентный взвешенный уровень шума в точке определяется как:

$$W_{\text{шум}} = 10 \log \left(\frac{1}{T_0} \sum_{i=1}^N 10^{\frac{L_{E,i} + \Delta_i}{10}} \right), \quad (2.50)$$

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.

Уровень шума единичного воздействия:

$$L_{E,i} = L_{E,\infty}(P, d) + \Delta_V + \Delta_I(\phi) - \Lambda(\beta, l) + \Delta_F, \quad (2.51)$$

где $L_{E,\infty}(P,d)$ – базовые уровни шума на основе данных по характеристикам ВС, где P – режим мощности, d – кратчайшее расстояние от точки наблюдения до участка траектории ВС, $\Delta_V, \Delta_I(\phi), \Delta(\beta,l), \Delta_F$ – корректировки значений.

Пример визуализации тепловой карты аэродрома Шереметьево приведен на рисунке 2.8. Разными цветами отображены соответствующие уровни шума.

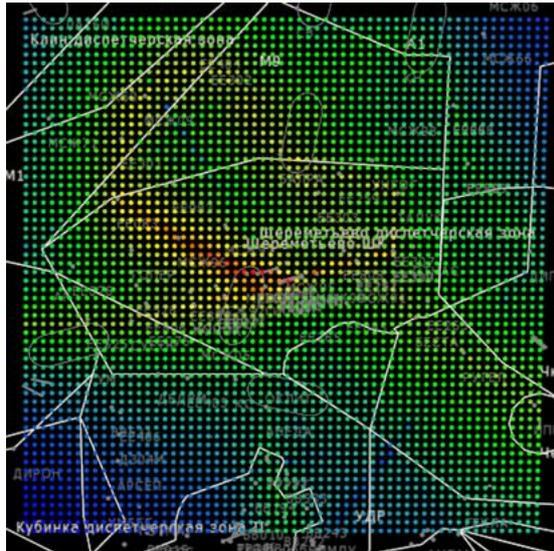


Рисунок 2.8. Визуализация уровней шумовых воздействий

2.1.6.2. Выбросы вредных веществ W_{CO_2}

Расчет выполняется на основе полученных по результатам моделирования данных по расходу топлива в пределах моделируемого воздушного пространства. Определяется масса выбросов вредных веществ CO_2 .

В перечень определенных ИКАО загрязняющих атмосферу веществ входят: оксиды азота, дым, окись углерода, несгоревшие углеводороды, а также парниковые газы: метан, двуокись углерода и др. Однако наибольший «вклад» в загрязнение окружающей среды вносит двуокись углерода (CO_2)

Расчет выполняется по данным, которые являются результатами моделирования управляемых полетов ВС в диспетчерской зоне района аэродрома, согласно [65]. Масса выбросов CO_2 i -го ВС рассчитывается как:

$$M_{\text{CO}_2}^i = 3.12M_T^i, \quad (2.52)$$

где M_T^i - масса израсходованного топлива i -м ВС.

Показатель по всем ВС определяется следующим образом:

$$W_{\text{CO}_2} = \sum_i M_{\text{CO}_2}^i. \quad (2.53)$$

2.2. Метод решения многокритериальной задачи выбора наилучшего варианта структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома

Данная задача 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.

Пусть задано дискретное множество $S = \{\bar{s}_1, \bar{s}_2, \dots, \bar{s}_j, \dots, \bar{s}_M\}$ спроектированных альтернативных вариантов структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, удовлетворяющих ограничениям, заданным далее, где $\bar{s}_j = (\bar{s}_{\text{ВП}_j}, \bar{s}_{\text{а}_j})$, M - число разработанных специалистами по организации ВП вариантов структуры ВП и инфраструктуры аэродрома. Каждый вариант $\bar{s} \in S$ характеризуется большим количеством компонентов (сеть ВТ, секторы диспетчерского управления, маршруты вылета, прибытия, захода на посадку и т.д.) и оценивается по показателям, которые могут противоречить друг другу. Таким образом, многокритериальная задача оптимизации сводится к задаче сравнения вариантов между собой и выбора наилучшего варианта по заданным частным критериям.

Данная задача сводится к решению одной или последовательности однокритериальных задач. Традиционными методами здесь выступают метод свертки критериев, оптимизация главного локального критерия, метод последовательных уступок. Метод свертки критериев применять в данном случае не представляется возможным из-за субъективности назначения заинтересованными сторонами параметров (коэффициентов) свертки. Метод главного критерия также не приемлем ввиду сложности выбора из всех показателей эффективности одного единственного

критерия и назначения ограничений на другие показатели эффективности, требуемые к выполнению. Наиболее предпочтительным является использование метода последовательных уступок.

Таким образом, второй способ 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 показатели 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, то предлагается упорядочить:

- блоки матрицы (1.1) по важности блока:

$$(W_6, W_a, W_{ПВП}, W_{ПА}, W_{ОрВД}, W_{ср})^T;$$

- критерии каждого блока по важности, например, для первого блока, содержащего пять критериев: $W_6 = (W_{риски}, W_{ННЭ}, W_{ПКС}, W_{конфл.схем}, W_{инт.ВПП})^T$, для второго блока, содержащего шесть критериев: $W_a = (W_{а.топл.эф}, W_{а.налет}, W_{протяж.марш}, W_{ортодр}, W_{а.зад}, W_{врем.рул})^T$, и так далее по остальным блокам.

Далее представлен алгоритм решения задачи с приоритетами, определенными по группам показателей.

Шаг 1. На первом этапе решается задача выбора наилучшего решения из дискретного множества альтернативных вариантов $S = \{\bar{s}_1, \bar{s}_2, \dots, \bar{s}_j, \dots, \bar{s}_M\}$ для наиболее важной группы показателей по безопасности выполнения полетов W_6 (первый блок):

Шаг 1.1. Среди возможных вариантов выбрать вариант (варианты) в результате решения однокритериальной задачи

$$W_{риски}(\bar{s}) \rightarrow \min,$$

где $\bar{s} \in S$. Обозначим через $W_{риски}^{\min}$ полученное минимальное значение наиболее важного критерия первой группы (оценка рисков).

Шаг 1.2. Назначить уступку $\bar{\Delta}_{\text{риски}} > 0$ по критерию $W_{\text{риски}}(\bar{s})$ и решить задачу однокритериальной минимизации

$$W_{\text{ННЭ}}(\bar{s}) \rightarrow \min$$

при условии

$$\begin{cases} W_{\text{риски}}(\bar{s}) \leq W_{\text{риски}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{риски}}, \\ \bar{s} \in S. \end{cases} \quad (2.54)$$

Определить подмножество допустимых вариантов S и минимальное значение второго по важности критерия $W_{\text{ННЭ}}^{\min}$.

Шаг 1.3. Назначить уступку $\bar{\Delta}_{\text{ННЭ}} > 0$ по критерию $W_{\text{ННЭ}}(\bar{s})$ и решить задачу однокритериальной минимизации:

$$W_{\text{ПКС}}(\bar{s}) \rightarrow \min$$

при условии:

$$\begin{cases} W_{\text{риски}}(\bar{s}) \leq W_{\text{риски}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{риски}}, \\ W_{\text{ННЭ}}(\bar{s}) \leq W_{\text{ННЭ}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{ННЭ}}, \\ \bar{s} \in S. \end{cases} \quad (2.55)$$

В результате найти подмножество допустимых вариантов S и минимальное значение третьего по важности критерия $W_{\text{ПКС}}^{\min}$ (количество ПКС).

Шаг 1.4. Назначить уступку $\bar{\Delta}_{\text{ПКС}} > 0$ по критерию $W_{\text{ПКС}}(\bar{s})$ и решить задачу однокритериальной минимизации:

$$W_{\text{конфл.схем}}(\bar{s}) \rightarrow \min$$

при условии

$$\begin{cases} W_{\text{риски}}(\bar{s}) \leq W_{\text{риски}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{риски}}, \\ W_{\text{ННЭ}}(\bar{s}) \leq W_{\text{ННЭ}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{ННЭ}}, \\ W_{\text{ПКС}}(\bar{s}) \leq W_{\text{ПКС}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{ПКС}}, \\ \bar{s} \in S. \end{cases} \quad (2.56)$$

В результате найти подмножество допустимых вариантов S и минимальное значение третьего по важности критерия $W_{\text{конфл.схем}}^{\min}$ (конфликтность схем маневрирования).

Шаг 1.5. Назначить уступку $\bar{\Delta}_{\text{конфл.схем}} > 0$ по критерию $W_{\text{конфл.схем}}(\bar{s})$ и решить задачу однокритериальной минимизации:

$$W_{\text{инт.ВПП}}(\bar{s}) \rightarrow \min$$

при условии

$$\begin{cases} W_{\text{риски}}(\bar{s}) \leq W_{\text{риски}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{риски}}, \\ W_{\text{ННЭ}}(\bar{s}) \leq W_{\text{ННЭ}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{ННЭ}}, \\ W_{\text{ПКС}}(\bar{s}) \leq W_{\text{ПКС}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{ПКС}}, \\ W_{\text{инт.ВПП}}(\bar{s}) \leq W_{\text{инт.ВПП}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{инт.ВПП}}, \\ \bar{s} \in S. \end{cases} \quad (2.57)$$

В результате найти подмножество допустимых вариантов S и минимальное значение третьего по важности критерия $W_{\text{инт.ВПП}}^{\min}$ (нарушений временных интервалов на ВПП).

Назначить уступку $\bar{\Delta}_{\text{инт.ВПП}} > 0$ и сформировать вектор найденных при решении подзадач минимальных значений критериев $W_6^{\min} = (W_{\text{риски}}^{\min}, W_{\text{ННЭ}}^{\min}, W_{\text{ПКС}}^{\min}, W_{\text{конфл.схем}}^{\min}, W_{\text{инт.ВПП}}^{\min})^T$ и вектор уступок $\bar{\Delta}_6 = (\bar{\Delta}_{\text{риски}}, \bar{\Delta}_{\text{ННЭ}}, \bar{\Delta}_{\text{ПКС}}, \bar{\Delta}_{\text{конфл.схем}}, \bar{\Delta}_{\text{инт.ВПП}})^T$.

Шаг 2. Рассматривается следующая по приоритету группа показателей для эксплуатантов ВП W_a (авиакомпаний). Приоритетный ряд в данной группе:

$$W_a = (W_{\text{а.топл.эф}}, W_{\text{а.налет}}, W_{\text{протяж.марш}}, W_{\text{ортодр}}, W_{\text{а.зад}}, W_{\text{врем.рул}})^T.$$

Аналогично процедуре, описанной на шаге 1, решается задача

$$W_a(\bar{s}) \rightarrow \min$$

при условии

$$W_6(\bar{s}) \leq W_6^{\min} + \bar{\Delta}_6, \bar{s} \in S. \quad (2.58)$$

Знак неравенства в (2.58) здесь и далее понимается по координатно.

В результате для группы показателей для эксплуатантов ВП формируется вектор уступок $\bar{\Delta}_a > 0$. По второй группе показателей дополнительные ограничения на выбор альтернативных решений, для которых оценка не должна превышать $W_a^{\min} + \bar{\Delta}_a$, накладываются на следующем шаге.

Шаг 3. Анализируется группа показателей по ПВП $W_{\text{ПВП}}$. Приоритетный ряд в данной группе: $W_{\text{ПВП}} = (W_{\text{сек}}, W_{\text{врем.загр.дисп}})^T$.

Аналогично шагам 1 и 2 решается задача максимизации по группе показателей по ПВП: $W_{\text{ПВП}} \rightarrow \max$. При этом задается последовательность задач однокритериальной максимизации критерия $W_{\text{ПВП}}^{(i)}(\bar{s})$, $i=1, 2, 3$, при условиях

$$\begin{cases} W_{\text{б}}(\bar{s}) \leq W_{\text{б}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{б}}, \\ W_{\text{а}}(\bar{s}) \leq W_{\text{а}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{а}}, \\ \bar{s} \in S, \end{cases} \quad (2.59)$$

к которым последовательно добавляются ограничения вида $W_{\text{ПВП}}^{(i-1)}(\bar{s}) \geq W_{\text{ПВП}}^{(i-1)\max} - \bar{\Delta}_{\text{ПВП}}^{(i-1)}$.

В результате вводится уступка $\bar{\Delta}_{\text{ПВП}} > 0$, а оценка альтернативных решений по данной группе показателей на следующем шаге не должна быть меньше $W_{\text{ПВП}}^{\max} - \bar{\Delta}_{\text{ПВП}}$.

Шаг 4. Рассматривается группа показателей ПА $W_{\text{ПА}}$. Приоритетный ряд в данной группе: $W_{\text{ПА}} = (W_{\text{ВПО}}, W_{\text{пересеч}})^T$. Решается следующая задача: $W_{\text{ПА}} \rightarrow \max$. Аналогично шагу 3 вводится уступка $\bar{\Delta}_{\text{ПА}} > 0$, а оценка по группе показателей на следующем шаге не должна быть меньше $W_{\text{ПА}}^{\max} - \bar{\Delta}_{\text{ПА}}$. При этом при выборе должны учитываться ограничения:

$$\begin{cases} W_{\text{б}}(\bar{s}) \leq W_{\text{б}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{б}}, \\ W_{\text{а}}(\bar{s}) \leq W_{\text{а}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{а}}, \\ W_{\text{ПВП}}(\bar{s}) \geq W_{\text{ПВП}}^{\max} + \bar{\Delta}_{\text{ПВП}}, \\ \bar{s} \in S. \end{cases} \quad (2.60)$$

Шаг 5. Приводятся уже менее приоритетные группы показателей. Альтернативные варианты оцениваются по группе показателей влияния на окружающую среду $W_{\text{ср}}$: $W_{\text{ср}} \rightarrow \min$. Приоритетный ряд в данной группе: $W_{\text{ср}} = (W_{\text{шум}}, W_{\text{CO}_2})^T$. Формируется уступка $\bar{\Delta}_{\text{ср}} > 0$, оценка на следующем шаге не должна превышать $W_{\text{ср}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{ср}}$. При этом учитываются ограничения:

$$\begin{cases} W_{\bar{6}}(\bar{s}) \leq W_{\bar{6}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\bar{6}}, \\ W_{\bar{a}}(\bar{s}) \leq W_{\bar{a}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\bar{a}}, \\ W_{\text{ПВП}}(\bar{s}) \geq W_{\text{ПВП}}^{\max} + \bar{\Delta}_{\text{ПВП}}, \\ W_{\text{ПА}}(\bar{s}) \geq W_{\text{ПА}}^{\max} + \bar{\Delta}_{\text{ПА}}, \\ \bar{s} \in S. \end{cases} \quad (2.61)$$

Шаг 6. Последняя по приоритету группа показателей – эффективность для системы ОрВД $W_{\text{ОрВД}}$. Приоритетный ряд в данной группе:

$W_{\text{ОрВД}} = (W_{\text{загр.уч.ВГ}}, W_{\text{загр.точек.ВП}}, W_{\text{эш}}, W_{\text{исп.ЗО}}, W_{\text{МС}})^T$. На данном этапе выбирается уже единственное решение:

$$W_{\text{ОрВД}} \rightarrow \min.$$

При этом по последней группе показателей должны учитываться следующие ограничения:

$$\begin{cases} W_{\bar{6}}(\bar{s}) \leq W_{\bar{6}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\bar{6}}, \\ W_{\bar{a}}(\bar{s}) \leq W_{\bar{a}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\bar{a}}, \\ W_{\text{ПВП}}(\bar{s}) \geq W_{\text{ПВП}}^{\max} + \bar{\Delta}_{\text{ПВП}}, \\ W_{\text{ПА}}(\bar{s}) \geq W_{\text{ПА}}^{\max} + \bar{\Delta}_{\text{ПА}}, \\ W_{\text{ср}}(\bar{s}) \leq W_{\text{ср}}^{\min} + \bar{\Delta}_{\text{ср}}, \\ \bar{s} \in S. \end{cases} \quad (2.62)$$

ГЛАВА 3. КОМПЛЕКС ПРОГРАММ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ

В предыдущей главе были рассмотрены математические модели системы показателей эффективности использования воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома, которые рассчитываются с использованием результатов имитационного и расчётного моделирования. В этой главе будут рассмотрены состав программного комплекса, в котором реализованы расчётные и имитационные модели, а также ключевые решения. Определены архитектура и схема взаимодействия основных моделей комплекса программ, а также алгоритмы разработанных моделей.

3.1. Структура и состав программного комплекса КИМ ОрВД

КИМ ОрВД, в первую очередь, был разработан в интересах национального провайдера аэронавигационных услуг ФГУП «Госкорпорация по ОрВД». Однако его применение можно рассматривать шире, чем область интересов только провайдера. Кроме провайдеров аэронавигационных услуг, в состав заинтересованных в применении комплекса участников ОрВД входят: авиакомпании, представители аэродромов, органы авиационных властей, научно-исследовательские институты.

Комплекс имитационного моделирования системы организации воздушного движения (КИМ ОрВД) – программный комплекс для поддержки принятия решений экспертами системы ОрВД [66-73].

Комплекс позволяет проводить сквозное моделирование «от перрона до перрона» (рисунок 3.1).

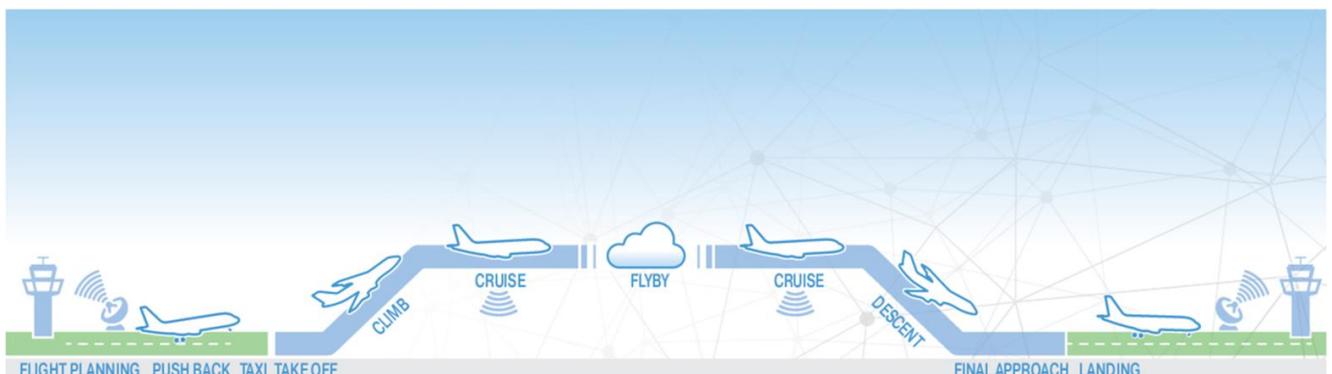


Рисунок 3.1. Моделирование от «перрона до перрона»

В программном комплексе реализовано моделирование управляемых полётов воздушных судов и их движение по поверхности аэродрома, включая моделирование аэродромных операций, действий диспетчера по управлению движением (Рисунок 3.1). В составе комплекса разработаны алгоритмы обнаружения и разрешения потенциальных конфликтных ситуаций, процедуры построения очереди на предварительном старте, создана подмодель формирования расстановки воздушных судов с учетом различных условий по разным критериям. Создана модель управления очередью ВС на прибытие и вылет в АДЦ. Моделируются операции диспетчера РДЦ и АДЦ по обнаружению и разрешению потенциальных конфликтных ситуаций, в модели вырабатываются требуемые задержки для создания эшелонированного потока ВС. Кроме действий диспетчера, в модели реализованы средства поддержки диспетчера (AMAN), функции системы АС УВД по прогнозированию траектории полета ВС и обнаружения потенциальных конфликтных ситуаций. В комплексе обеспечено взаимодействие моделей при сквозном моделировании «воздуха» и «земли», таким образом, происходит бесшовное моделирование движения на всех этапах выполнения полета. В модернизированной версии комплекса моделируется движение ВС от места стоянки по перрону, рулежным дорожкам, ВПП, ожидание на предварительном и исполнительном старте, разгон по ВПП, отрыв от ВПП, взлет, набор высоты, крейсерский этап полета, снижение, посадка, касание ВПП, торможение на ВПП, съезд на рулежную дорожку, руление по рулежным дорожкам и перрону до места стоянки.

Комплекс состоит из следующих программных средств:

- Программное средство «Импортирование данных из ЦБД»;
- Программное средство «Исследование ОрВД»;
- Программное средство «Имитация полетов ВС»;
- Программное средство «Имитационная математическая модель оценки безопасности полетов».

1) ПС «Импортирование данных из ЦБД» - программное средство предназначено для импортирования и обработки информации из различных источников и форматов данных в центральный банк данных (ЦБД) КИМ ОрВД. Импортирование происходит в автоматическом режиме (рисунок 3.2).

- 2) ПС «Исследование ОрВД» - программное средство предназначено для автоматизированного формирования и подготовки моделируемого варианта данных, включая поток ВД, структуру ВП и системы ОрВД, условий выполнения полетов (метео, пропускные способности секторов, ограничения по использованию воздушного пространства (ИВП), техническое обеспечение системы), также выполнения расчетного моделирования по оценке использования воздушного пространства и эффективности системы (рисунок 3.3).
- 3) ПС «Имитация полетов ВС» - программное средство предназначено для оценки предложений по организации воздушного пространства и реконфигурации маршрутов с учетом внедрения перспективных методов навигации, основанных на характеристиках, при обслуживании воздушного движения на трассах, в зонах подхода и аэродрома. Программное средство основано на имитационном моделировании (рисунок 3.4).
- 4) ПС «Имитационная математическая модель оценки безопасности полетов» - программное средство предназначено для проведения исследований, поддерживающих оценку безопасности полетов в заданных условиях (рисунок 3.5).



Рисунок 3.2. ПС «Импортирование данных из ЦБД»

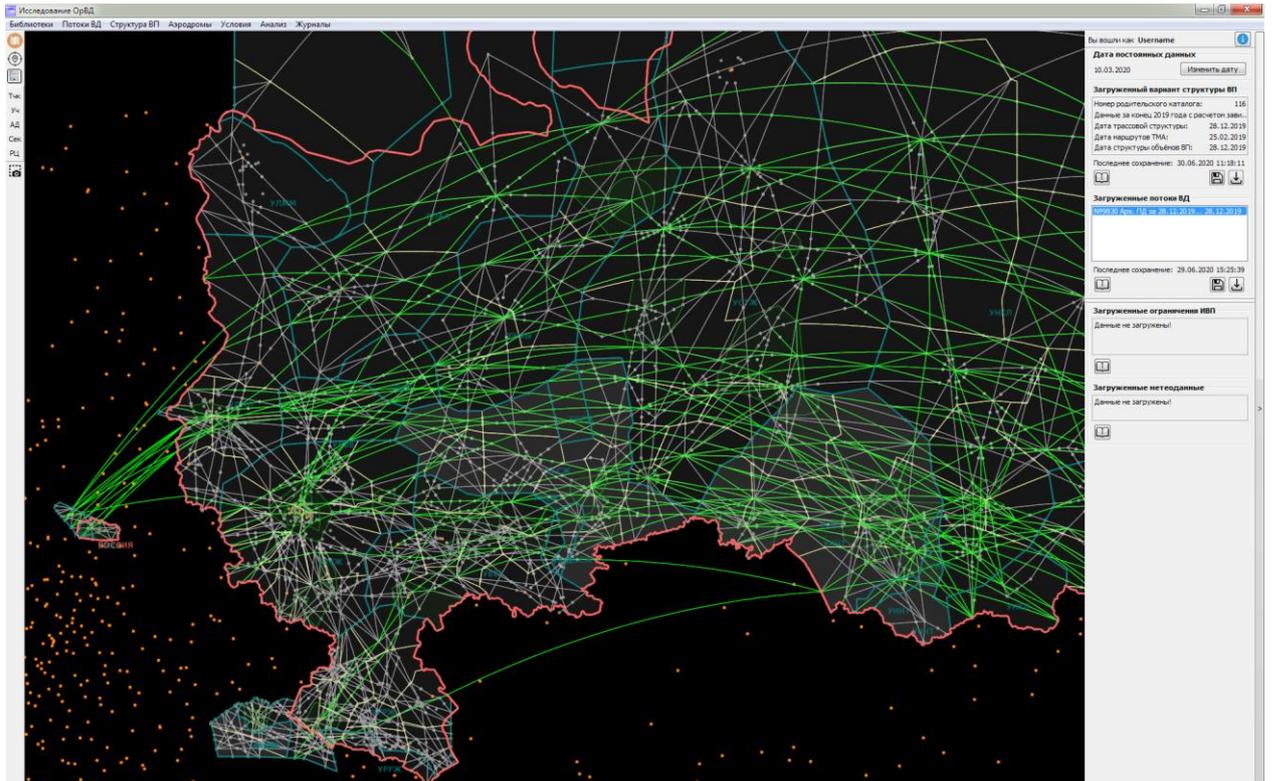


Рисунок 3.3. ПС «Исследование ОрВД»

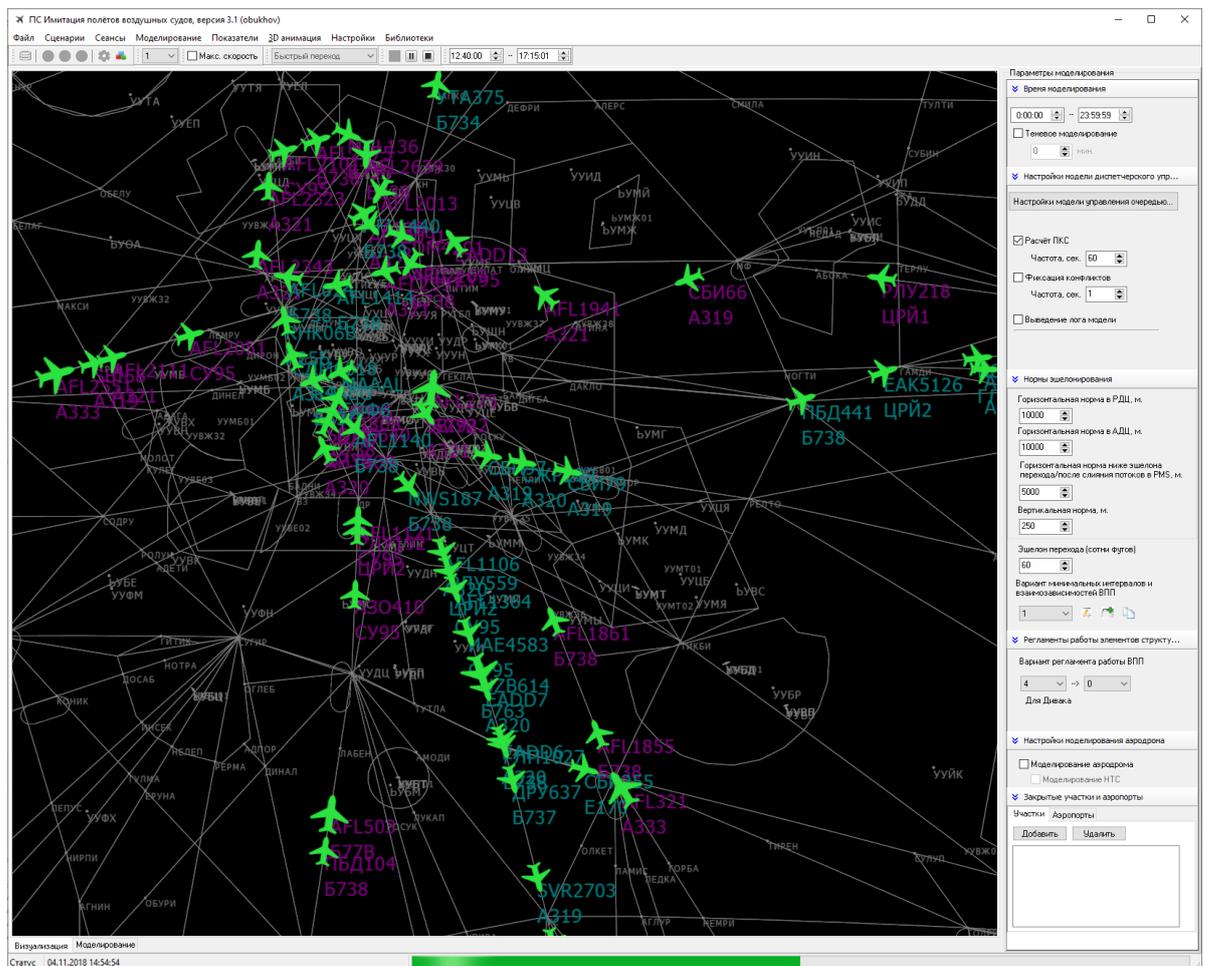


Рисунок 3.4. ПС «Имитация полетов ВС»

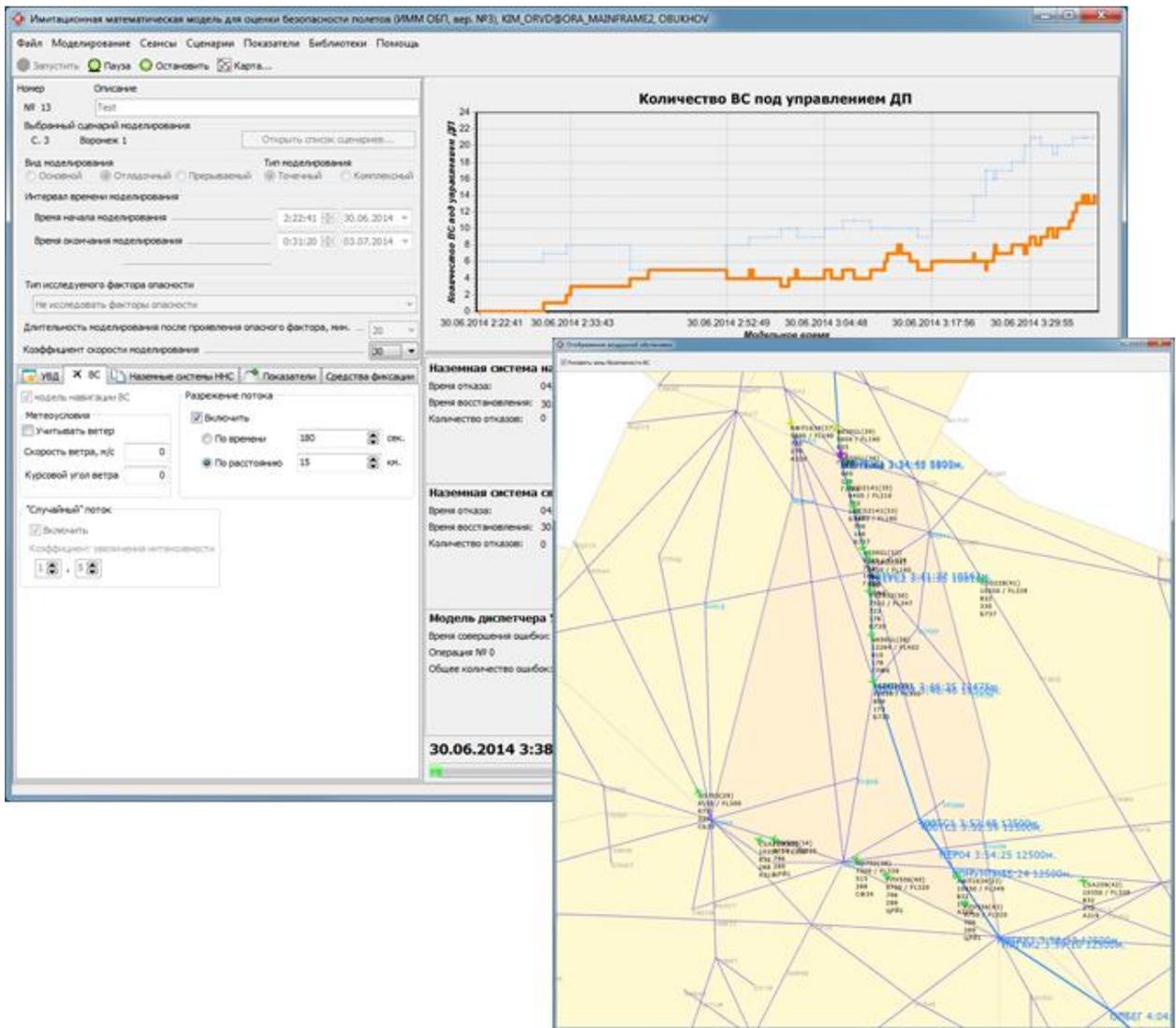


Рисунок 3.5. ПС «Имитационная математическая модель оценки безопасности полетов»

На рисунке 3.6 представлена структурная схема КИМ ОрВД.

Каждое программное средство отвечает за определенный этап при проведении исследований:

- ПС «Импортирование данных из ЦБД» отвечает за автоматическое импортирование аэронавигационных, полетных, метеоданных, справочных данных, данных по летно-техническим характеристикам, данных по ограничениям использования воздушного пространства. Данные импортируются из общепризнанных мировых форматов, а также форматов, используемых Заказчиком во внутренних процессах. С использованием данного средства данные из различных источников поступают в БД КИМ ОрВД.



Рисунок 3.6. Структурная схема КИМ ОрВД

- PC «Исследование ОрВД» отвечает за подготовку данных для проведения расчетного и имитационного моделирования с использованием автоматизированных средств, редактирование имеющихся в библиотеках данных, проведение расчетного моделирования, анализ результатов.
- PC «Имитация полетов ВС» отвечает за имитационное моделирование управляемых полетов и движения ВС по поверхности аэродрома, а также расчет показателей и анализ результатов.
- PC «Имитационная математическая модель оценки безопасности полетов» отвечает за имитационное моделирование управляемых полетов в верхнем воздушном пространстве, а также оценку показателей безопасности выполнения полетов.

3.2. Архитектура и схема взаимодействия моделей

Комплекс основан на принципах построения, которые позволяют гибко конфигурировать инструмент под исследовательские задачи, а также обладает функциональными возможностями по проведению комплексных исследований на основе имитационного моделирования «от перрона до перрона». В комплекс заложены следующие принципы и функциональные возможности:

- Сквозное моделирование «от перрона-до-перрона»;
- Импортирование данных из различных источников и форматов;
- Моделирование новых концепций и технологий;
- Возможность расширения списка показателей;
- Применение СУБД Oracle для всей базы данных КИМ ОрВД;

- Ориентированность на потребности, возникающие в процессах системы ОрВД;
- Разделение этапов подготовки данных, проведения моделирования и анализа результатов;
- Единый формат полетных и аэронавигационных данных для всех компонент комплекса;
- Повышение точности моделирования;
- Унификация средств визуализации процессов подготовки данных и моделирования в составе комплекса.

Архитектура комплекса реализована на модульной платформе, что позволяет использовать только те модели, которые необходимы для конкретных исследований. На рисунке 3.7 представлена схема взаимодействия и информационные связи моделей.

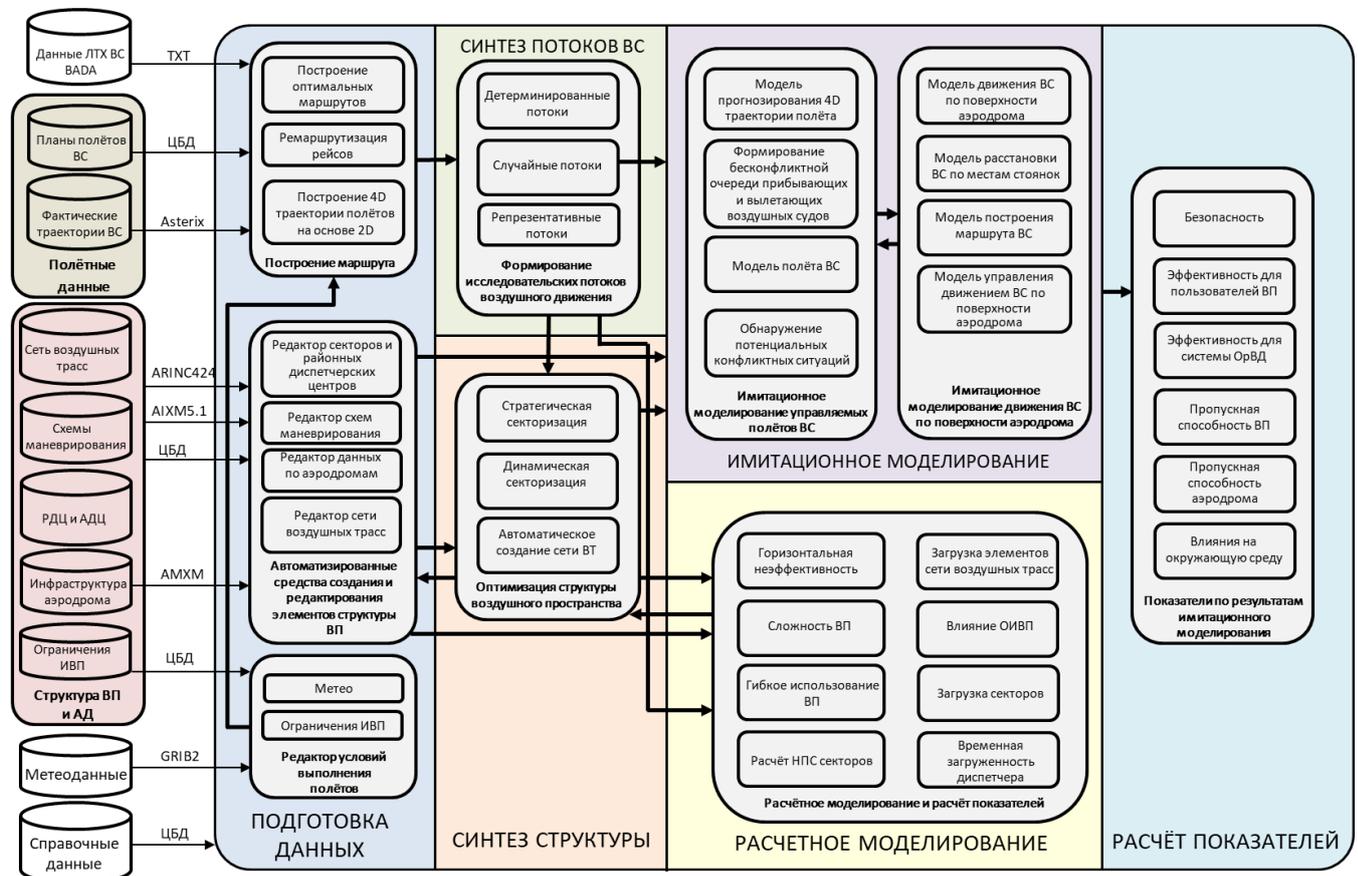


Рисунок 3.7. Архитектура и схема взаимодействия моделей.

Модели можно разделить на следующие группы по функциональному назначению: подготовка данных, синтез структуры ВП и потоков ВС, имитационное и расчётное моделирование, расчёт показателей. Каждая группа состоит из ряда моделей. Использование тех или иных моделей зависит от целей проведения исследований. Результаты моделирования, полученные в блоках «Имитационное моделирование» и

«Расчетное моделирование», используются для расчета показателей эффективности (блок «Расчёт показателей»), математические модели и алгоритмы которых приведены в главе 2.

В качестве исходных данных в комплексе используются: полётные данные, данные по структуре воздушного пространства и инфраструктуре аэродрома, данные по условиям выполнения полётов, метеоданные, справочные данные и данные по летно-техническим характеристикам воздушных судов. Данные импортируются в определенном формате в БД КИМ ОрВД. Полётные данные импортируются из ЦБД Госкорпорации по ОрВД в библиотеку потоков ВД.

Для организации и хранения полетной информации было создано две функции: библиотека потоков ВД (для организации работы с библиотечными вариантами полетных данных) и управление потоками (для организации работы с загруженными в оперативные данные потоками ВД). Полётные данные включают в себя:

- «Данные со списком вариантов суточных планов»;
- «Данные с разложением планов полетов в библиотеке планов полетов»;
- «Данные о рейсах планов полетов в библиотеке планов полетов».

В составе БД КИМ ОрВД реализованы организация и хранение информации по структуре ВП (библиотека структуры ВП). Функция предоставляет возможность взаимодействия с базой данных БД КИМ ОрВД и организует работу с загруженной пользовательской структурой ВП для работы в ПС «Исследование ОрВД».

Входными данными для функции организации и хранения информации по структуре ВП является информация:

- Каталог аэронавигационных данных - данные со списком вариантов структуры ВП в библиотеке структуры;
- Данные по секторам ОВД (общая информация о секторах, данные о зоне УВД, параметры границ зон, точки границ зон УВД, диапазон времен работы сектора, диапазон дат работы сектора, данные о пропускной способности, данные о количестве элементарных объемов, данные об исключении объемов других секторов);
- Данные по РЦ (общая информация о РЦ, данные о зоне УВД, параметры границ зон, точки границ зон УВД);
- Данные по воздушным трассам;

- Данные по участкам воздушных трасс (данные по участкам ВП, данные по принадлежности участков ВП воздушным трассам, правила эшелонирования участков);
- Данные по точкам ВП (перечень точек ВП, изменения кодов и параметров точек ВП);
- Данные с крейсерскими эшелонами;
- Данные по маршрутам вылета, прибытия, захода на посадку (общая информация, разложение маршрутов, опорные точки).

Выходными данными являются массивы с информацией по РЦ, секторам, участкам, точкам ВТ, а также таблицы БД КИМ ОрВД:

- Каталог аэронавигационных данных - данные со списком вариантов структуры ВП в библиотеке структуры;
- Данные по секторам ОВД (общая информация о секторах, данные о зоне УВД, параметры границ зон, точки границ зон УВД, диапазон времен работы сектора, диапазон дат работы сектора, данные о пропускной способности, данные о количестве элементарных объемов, данные об исключении объемов других секторов);
- Данные по РЦ (общая информация о РЦ, данные о зоне УВД, параметры границ зон, точки границ зон УВД);
- Данные по воздушным трассам;
- Данные по участкам воздушных трасс (данные по участкам ВП, данные по принадлежности участков ВП воздушным трассам, правила эшелонирования участков);
- Данные по точкам ВП (перечень точек ВП, изменения кодов и параметров точек ВП);
- Данные с крейсерскими эшелонами;
- Данные по маршрутам вылета, прибытия, захода на посадку (общая информация, разложение маршрутов, опорные точки).

Для подготовки данных в составе комплекса реализованы редакторы, которые позволяют корректировать или заводить данные автоматизированным способом с использованием человеко-машинного интерфейса [74].

Другой важной составляющей является возможность синтеза потоков ВС и структуры ВП. В части формирования потоков ВД реализованы следующие возможности:

- формирование случайного потока ВД, основанного на характеристиках набора суточных планов, сформированных исследователем. Примером использования этой функции служит синтез случайных потоков для проведения прогнозных исследований при разработке варианта новой структуры ВП. В частности, могут быть сформированы случайные потоки ВД с изменившейся интенсивностью полетов на ближайшие плановые периоды 5-10-15 лет. Получив данные об интенсивностях и видах предполагаемых полетов, можно определить потребности в организации и видах обслуживания воздушного движения;
- формирование детерминированных потоков ВД, соответствующих различным критериям и выполняющих ограничения использования воздушного пространства, вытекающие из соответствующего сценария;
- формирование репрезентативного потока ВС в районе ОВД, гарантированно включающего все наиболее проблемные варианты часовых входных потоков и, в то же время гораздо, менее объемного, чем полные исходные полетные данные. Репрезентативные потоки ВС применяются при решении различных исследовательских задач, например, следующих: полномасштабные прогнозные исследования ИВП региона; исследования по прогнозной оценке эффективности трассовой структуры ВП; исследования по оценке эффективности мер регулирования потоков ВС; деление ВП региона на сектора диспетчерского управления (задача секторизации).

На основе анализа исследуемого варианта структуры воздушного пространства может быть выполнен его синтез с использованием потоков воздушного движения. Такими инструментами являются:

- стратегическая секторизация ВП районного центра ОВД (РЦ) – оптимальное деление зоны ответственности РЦ на элементарные сектора диспетчерского управления с учетом существующей трассовой структуры, интенсивности и структуры потоков ВД. Оптимальность понимается с точки зрения минимума количества секторов, выполнения нормативов загрузки и равномерного распределения загрузки между диспетчерами РЦ. Под элементарным сектором

понимается стабильный во времени объем ВП в определенные временные интервалы может полностью соответствовать объему ВП, обслуживаемому с одного диспетчерского пункта, а в другие временные интервалы – объединяться в один сектор управления с другими элементарными секторами.

- динамическая секторизация - формирует оптимальный график работы секторов диспетчерского управления РЦ в течение суток, отвечающий на суточные колебания интенсивности ВД;
- автоматическое создание сети воздушных трасс - формирует варианты возможной сети воздушных трасс для районного центра на основе полетных данных.

На следующем этапе производится расчётное или имитационное моделирование на основе подготовленных вариантов аэронавигационных и полётных данных. Описание основных расчётных и имитационных моделей представлено в п.3.3 и 3.4.

3.3. Расчётное моделирование верхнего воздушного пространства

Расчетное моделирование в составе комплекса обеспечивает автоматическое вычисление показателей и нормативов по ИВП на основе полетных данных и данных о структуре ВП. Все показатели рассчитываются на основе импортированных или подготовленных с использованием автоматизированных средств и записанных в БД КИМ ОрВД данных. Расчет показателей и нормативов по ИВП осуществляется для целых суток, соответствующих заданной дате. При этом дата полетных данных и данных по структуре ВП должны быть согласованы между собой.

Единицей времени (интервалом, на которые делится все модельное время) для расчета показателей загруженности элементов структуры ВП считается 1 час.

ИВД в секторах ОВД

Интенсивность воздушного движения (ИВД) в секторе ОВД (РЦ) (или загрузка сектора) рассчитывается как количество ВС, вошедших в сектор (в РЦ) в единицу времени. Расчет интенсивности воздушного движения в секторе ОВД требует предварительного расчета попаданий координат точек участков маршрута для рассчитываемых планов полетов в объемы секторов ОВД. Точность расчета

ограничивается длиной участков маршрута рассчитываемых планов полетов. По результатам расчета вход ВС в сектор осуществляется в начале участка маршрута.

ИВД в точках ВП, на участках ВТ

Для расчета показателя «ИВД на участках ВТ» анализируется фактическое разложение планов полетов, полученное в результате моделирования. В результате анализа определяются участки ВТ, на которые входят ВС в рассчитываемые интервалы времени, и для каждого интервала суммируется количество пролетов для каждого участка ВТ. Время входа на участок ВТ считается время пролета первой точки участка.

Перегрузка секторов ОВД

При расчете показателей перегрузки сектор ОВД считается перегруженным, если количество рейсов, вошедших в сектор в рассматриваемый час, превышает заданный норматив пропускной способности сектора (максимальное допустимое количество входов ВС в сектор в час). Значение максимальной перегрузки сектора рассчитывается как максимальное по всем перегруженным часам количество ВС, которые участвуют в превышении норматива пропускной способности сектора.

Статистические характеристики загрузки секторов ОВД

При моделировании потоков ВД количественные показатели загрузки секторов дополняются их статистическими характеристиками (максимальное/минимальное значение, математическое ожидание, дисперсия).

Моделирование ИВП проводится для заданного потока ВД и заданной структуры ВП в заданных условиях выполнения полетов в течение одних суток. Для каждого сектора рассчитываются почасовые характеристики загрузки секторов в течение этих суток – интенсивность входного потока в сектор. Дополнительно к этим количественным показателям загрузки секторов рассчитываются следующие статистические показатели:

- почасовые значения, интегральные для всех часов суток: максимальное V_{max} , минимальное C_{min} , среднее часовое значение D_{avg} , дисперсия F_{dsp} для каждого сектора;
- почасовые значения для каждого часа, интегральные по всем загруженным секторам:
 - максимальная почасовая загрузка G_{max} среди всех загруженных секторов УВД РЦ для каждого часа суток;

- минимальная почасовая загрузка X_{\min} среди всех загруженных секторов УВД РЦ для каждого часа суток;
- средняя почасовая загрузка Y_{avg} среди всех загруженных секторов УВД РЦ для каждого часа суток;
- дисперсия Z_{dsp} почасовой загрузки среди всех загруженных секторов УВД РЦ для каждого часа суток;
- интегральные значения для всех секторов:
 - максимальная почасовая загрузка P_{max} среди всех загруженных секторов УВД РЦ и всех часов суток;
 - минимальная почасовая загрузка Q_{\min} среди всех загруженных секторов УВД РЦ и всех часов суток;
 - средняя почасовая загрузка R_{avg} среди всех загруженных секторов УВД РЦ и всех часов суток.

Распределение ВС по эшелонам

Для каждого рассматриваемого рейса определяются участки плана полета, на которых выполнялся горизонтальный полет без изменения вертикального профиля и эшелон, соответствующий данному участку. Количество использований каждого эшелона суммируется по всем рейсам.

Расчет ПКС

Алгоритм расчета ПКС производится в секторах РДЦ и АДЦ. При этом глубина прогноза ПКС при расчетном моделировании соответствует всей глубине рассматриваемых планов полетов. Подробнее алгоритм расчета ПКС описан в п.3.6.3.

Временная загруженность диспетчера

Временная загруженность диспетчера вычисляется как сумма относительных (в час) временных затрат при выполнении операции по обеспечению контроля и управления воздушным движением.

относительная временная загруженность диспетчера в единицу времени на протяжении всего периода моделирования для каждого сектора;

- суммарные относительные временные затраты диспетчера на осуществление каждой операции в единицу времени на протяжении всего сеанса моделирования (при расчете для одного сектора);

- превышения заданного уровня допустимой временной загрузки диспетчера (при расчете для одного сектора).

Количество ВС одновременно под управлением диспетчера

Количество ВС одновременно под управлением диспетчера рассчитывается как суммарное количество ВС, находящихся в секторе ОВД в одну секунду времени. При расчете показателя «Временная загрузка диспетчера» для каждого сектора на выходе пользователю рассчитываются:

Среднее время пребывания ВС в секторе ОВД

Показатель рассчитывается как сумма длительности пребывания каждого ВС в секторе, поделенная на количество ВС.

Норматив пропускной способности секторов

Нормативом пропускной способности сектора диспетчерского управления называется максимально допустимая часовая интенсивность воздушного движения для каждого сектора с учетом заданных параметров (количество диспетчеров, оборудование) и рассчитывается в соответствии с [60].

3.4. Имитационное моделирование управляемых полётов воздушных судов в диспетчерской зоне района аэродрома (аэроузла)

Приводится краткое описание основных имитационных моделей, используемых для оценки эффективности использования воздушного пространства и реализованных в составе ПС «Имитация полётов ВС» [75].

3.4.1. Модель прогнозирования 4D траектории полета

Модель 4D траектории полёта ВС представляет собой последовательность элементарных участков маршрута, однозначно определённых по географическим координатам и высоте над уровнем моря, описывающих ортодромию или дугу окружности на сфере [76]. Для каждой точки траектории определено время её прохождения. Кроме этого, в структуре данных 4D траектории содержится

дополнительная информация, необходимая для моделирования полёта ВС и моделирования работы диспетчера, а так же информация о принадлежности участков траектории элементам структуры ВП.

Основным применением 4D траектории является горизонтальное и вертикальное наведение модели ВС, задание скорости полёта на каждом элементарном участке. 4D траектории используются в модели диспетчерского управления для предсказания положения ВС в пространстве, анализа воздушной обстановки, обнаружения потенциальных конфликтных ситуаций и выработки мер по разрешению конфликтов. На основе 4D траекторий производится предполётное планирование и создаются модельные потоки ВС с различными свойствами и характеристиками. После завершения моделирования проводится анализ фактических 4D траекторий и расчёт различных показателей моделирования.

Точное построение и прогнозирование траектории позволяет рассчитывать различные характеристики по результатам имитационного моделирования.

Модель построения 4D траектории учитывает различные исходные данные и ограничения. Для каждого воздушного судна строится уникальная траектория. Она складывается из летно-технических характеристик воздушного судна и ограничений структуры воздушного пространства.

Исходными данными для модели построения 4D траекторий являются:

- структура воздушного пространства: точки и участки воздушных трасс, стандартные маршруты вылета (SID), стандартные маршруты прибытия (STAR), маршруты захода на посадку (Approach);
- план полёта конкретного рейса (2D маршрут): последовательность участков воздушных трасс, а так же выбранные для этого рейса SID, STAR и Approach;
- тип ВС и данные об ЛТХ ВС;
- загрузка (взлетный вес) воздушного судна.

Модель использует маршруты SID, STAR и Approach, которые могут быть представлены, например, в формате ARINC 424. В модели используются данные о ЛТХ ВС из BADA [55] – базы данных с ЛТХ ВС, созданной Евроконтролем.

К числу основных особенностей задачи построения 4D траекторий относятся:

- построение «сквозной» траектории от момента взлета до момента посадки (касание ВПП), включая такие этапы полёта как: взлет, набор высоты, крейсерский

этап полёта, снижение, посадка, при моделировании движения на поверхности аэродрома добавляются этапы руления от стоянки до ВПП и от ВПП до стоянки;

- учёт ЛТХ конкретного типа ВС при расчёте таких параметров полёта как: приборная скорость (CAS), вертикальные скорости набора/снижения (ROCD), крейсерский эшелон полёта, расход топлива;

- учёт изменения массы ВС в результате расходования топлива, влияние изменения массы на ЛТХ;

- учёт ограничений структуры ВП: высотные ограничения на маршрутах SID, STAR, Approach, на воздушных трассах; скоростные ограничения на SID, STAR и Approach;

- построение траектории полёта по различным типам участков, определенных в стандарте ARINC 424;

- динамическое перестроение траектории в процессе моделирования;

- перестроение траектории согласно командам модели диспетчера УВД.

Критерием эффективности при построении 4D траектории является, в основном, стоимостной критерий, то есть расход топлива. При планировании и выполнении полёта авиакомпания стремятся к выполнению эффективной 4D траектории. Влияние дополнительных факторов, таких как ограничения структуры ВП, воздушная обстановка, действия диспетчера УВД по изменению траектории полёта, может снижать эффективность 4D траектории. В алгоритме построения используются две вспомогательные процедуры:

- формирование двумерного маршрута методом поиска кратчайшего пути на графе;

- формирование четырехмерной траектории на основе двумерного маршрута.

Алгоритм основан на методе решения, предложенном Дейкстра, и предназначен для поиска кратчайшего пути между заданной вершиной графа и всеми другими вершинами (либо между двумя заданными вершинами).

3.4.2. Модель полета ВС

Модель воздушной обстановки (ВО) предназначена для использования в динамических моделях управляемых полетов, она используется для расчета всех групп показателей, в том числе: показателей безопасности и эффективности системы ОрВД. Модель воздушного судна (ВС) описывает выполнение полета одного конкретного воздушного судна. Под моделью ВО подразумевается совокупность моделей ВС для заданного сценария моделирования.

Модель ВО представляет собой описание во временной области процессов управляемого полета множества самолетов в структурированном воздушном пространстве. Цель управления состоит в выполнении каждым ВС безопасного полета в соответствии с выбранным по сценарию планом.

Модели ВО и ВС могут работать как в комплексе с моделью диспетчерского управления, имитирующей анализ воздушной обстановки и выработку команд регулирования, так и автономно, в соответствии с поданным планом или даже командой. В КИМ ОрВД реализована модель движения материальной точки, реализующая 4D траекторию. Источником данных по летно-техническим характеристикам является база данных самолетов BADA, поддерживаемая и разработанная Евроконтролем. На рисунке 3.8 представлена схема модели полета ВС и её место в имитационной модели.

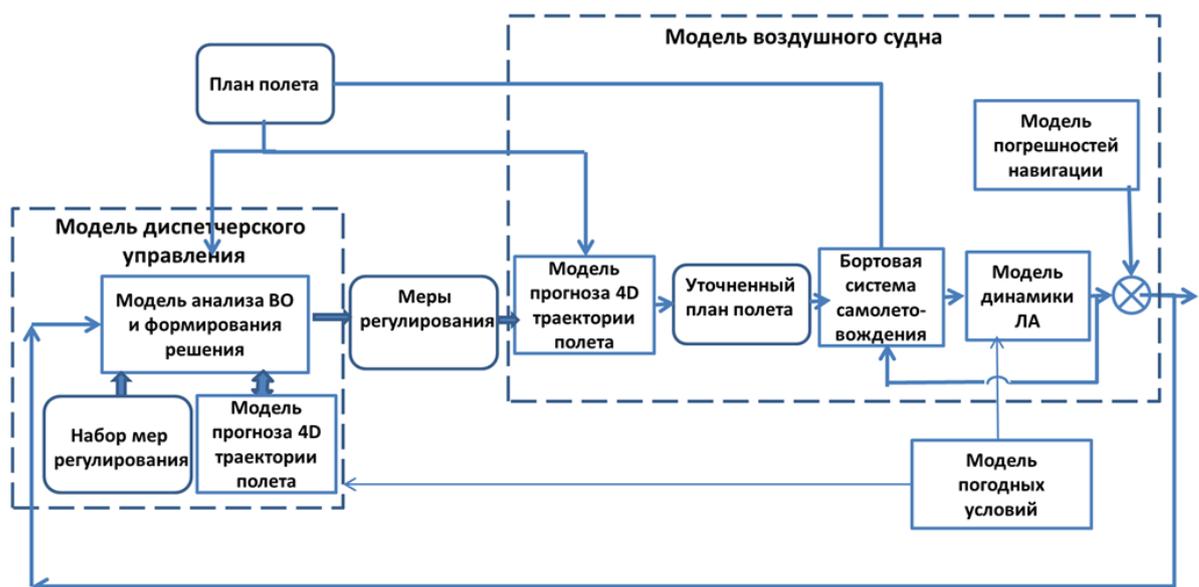


Рисунок 3.8. Схема модели ВС и её место в модели системы УВД

Модель динамики ЛА разбита на два блока: система стабилизации и кинематика движения ВС. Динамика воздушной обстановки имитируется циклическим процессом численного интегрирования дифференциальных уравнений, описывающих изменение во времени текущего состояния ВС. Численное интегрирование производится методом Эйлера первого порядка.

3.4.3. Имитационная модель диспетчерского управления

Имитационная модель диспетчерского управления отражает основные операции и действия диспетчерской позиции в процессе сопровождения полета ВС. В соответствии с декомпозицией деятельности человека-оператора в сложной социотехнической системе, в контуре обработки информации человеком, для имитации выделены следующие элементы:

- сбор информации, необходимой для получения обзора ситуации в ВД – данных систем наблюдения, донесений экипажей ВС, информации о планах полетов и др.;
- прогнозирование ситуации, обнаружение возможных проблем, потенциальных конфликтных ситуаций в воздухе и на земле;
- коммуникация – обмен сообщениями с экипажами ВС и другими диспетчерами;
- планирование решения проблем – расстановка приоритетов, выбор операции;
- собственно, решение возникающей проблемы в рамках выбранной операции – принятие решения, например, по разрешению ПКС;
- исполнительное действие – сообщение информации и команд экипажам ВС;
- контролирование правил и выполнение корректирующих действий при несоблюдении;
- взаимодействие с другими частями системы УВД;
- мониторинг «технической» части – контроль правильности работы систем поддержки и соответствующие действия.

В число принципов имитационного моделирования работы диспетчерской позиции входят:

- учет времени, затрачиваемого на выполнение операций;
- учет характеристик окружения – погоды, структуры ВП, различных условий;

- учет работы в условиях погрешностей и отказов технических систем;
- учет ошибок, нарушений, погрешностей, упущений человека-оператора;
- зависимость вероятностей ошибки от задачи и ее параметров (например, от времени, оставшегося до прогнозируемой ПКС), а также от состояния имитатора диспетчерской позиции (например, времени работы в условиях перегрузки);
- вариабельность длительности операций, точности и прочих параметров подсистем, что обуславливает стохастический характер моделирования и использование метода Монте-Карло.

Данная модель используется для расчета показателей безопасности. в составе ПС «Имитационная математическая модель оценки безопасности полетов» [52]. На рисунке 3.9 изображена схема имитационной модели диспетчерского обслуживания.



Рисунок 3.9. Схема имитационной модели диспетчерского обслуживания

Работа диспетчерской позиции представляется набором операций, каждая операция – набором действий, а также имитируется как последовательное выполнение операций со всеми сопровождаемыми им ВС, по которым выполняются условия выполнения этих операций (очередь операций).

Диспетчерская позиция в имитационной модели выполняет все штатные операции по сопровождению пролета ВС через сектор УВД РЦ (рис.3), включая обнаружение и разрешение ПКС и анализ воздушной обстановки.

3.4.4. Модель обнаружения потенциальных конфликтных ситуаций

Модели обнаружения ПКС в процессе имитационного моделирования используются как в имитационной модели диспетчера при регулировании потока ВС в процессе моделирования, так и при расчётном моделировании для оценки конфликтности структуры воздушного пространства. Обнаружение потенциальных конфликтных ситуаций может быть среднесрочным (Medium Term Conflict Detection, MTCD) и краткосрочным (Short Term Conflict Alert, STCA). Помимо горизонта прогнозирования эти модели различаются принципами обнаружения потенциальных конфликтных ситуаций и гипотезами об имеющейся информации о движении ВС. MTCD основывается на планах полёта ВС (4D траектории), в то время как при прогнозировании конфликтных ситуаций в STCA известны только текущее положение и характеристики движения ВС (курс, вертикальная и горизонтальная скорости). По этим данным в STCA строятся прогнозные векторы для каждого ВС, на основе которых и выносятся предупреждение о потенциальной конфликтной ситуации. Это позволяет обнаруживать и разрешать конфликтные ситуации в случаях моделирования отклонения ВС от плана полёта или моделировании отказа систем наблюдения. Алгоритм обнаружения потенциальных конфликтных ситуаций представлен в п.3.6.3.

3.4.5. Модель построения бесконфликтной очереди на прилет/вылет

Модель построения бесконфликтных очередей ВС на прилет и вылет используется при моделировании полетов ВС в районах аэродромов и аэроузлов при слиянии потоков ВС, прибывающих на моделируемые аэродромы с различных направлений, а также потоков, вылетающих с моделируемых аэродромов в одном направлении.

Модель предназначена для создания бесконфликтных потоков ВС в пределах моделируемого воздушного пространства с учетом норм эшелонирования и доступных мер регулирования, определяемых структурой воздушного пространства и технологией работы диспетчера. Таким образом, модель сочетает в себе функции диспетчеров по

обнаружению и разрешению конфликтов между воздушными судами и функции систем AMAN и DMAN по формированию очередей и потоков на посадку и вылет.

Пример назначения задержек путем изменения траекторий воздушных судов показан на рисунке 3.10. Желтым цветом отображены траектории воздушных судов, голубым цветом маршруты прибытия и маршруты захода на посадку. В п. 3.6.2 представлен алгоритм построения бесконфликтной очереди на прилет/вылет.

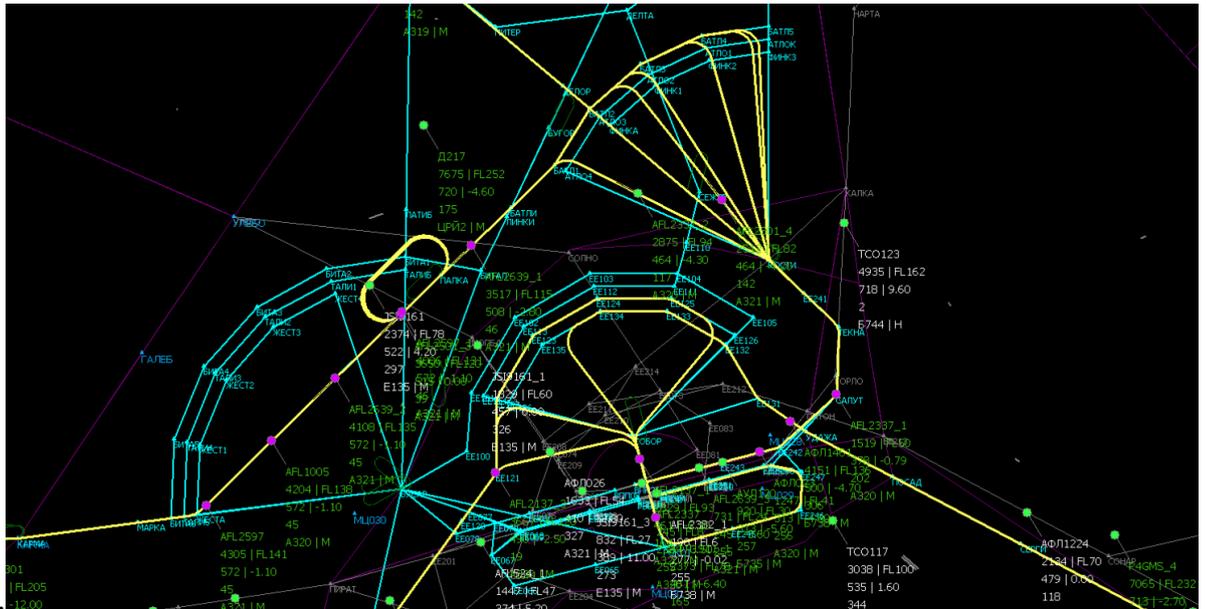


Рисунок 3.10. Траектории воздушных судов с назначенными мерами регулирования

3.5. Имитационное моделирование движения воздушных судов по поверхности аэродрома

3.5.1. Управление движением воздушных судов по поверхности аэродрома

Модель предназначена для имитации движения ВС на поверхности аэродрома под управлением диспетчерских служб аэродрома [77]. Пример моделирования аэродрома приведен на рисунке 3.11.

В модели выполняются штатные операции по управлению движением на поверхности аэродрома, а также осуществляется управление процессом моделирования аэродрома, а именно:

- подготовка и хранение данных по аэродрому, используемых в процессе моделирования;
- инициализация подконтрольных моделей при начале моделирования;
- вызов подконтрольных ей моделей (модели движения ВС, модели обнаружения ПКС, модели регулирования, модели построения маршрутов на аэродроме) на каждом такте моделирования;
- назначение команды на начало движения для модели ВС согласно плану;
- управление перестроением маршрута руления в случае необходимости (например, смены планового маршрута SID/STAR);
- актуализация план по результатам работы подконтрольных моделей.



Рисунок 3.11. Пример моделирования аэродрома Внуково

На рисунке 3.12 представлена блок-схема процесса моделирования аэродрома:



Рисунок 3.12. Блок-схема моделирования аэродрома

- Модель обрабатывает ВС, осуществившие посадку в данный такт, севшие ВС инициализируются в модели движения ВС по поверхности аэродрома. ВС инициализируется в точке касания ВПП.
- Модель проверяет расписание вылетов, если модельное время достигло времени освобождения рейсом стоянки, соответствующей модели ВС даётся команда начать руление.
- Вызывается функция расчета положения ВС модели движения ВС по поверхности для каждого ВС на аэродроме.
- Если результатом предыдущего шага стал взлёт каких-либо ВС, информация о взлёте передаётся на модель движения ВС в воздухе.
- Вызываются модели обнаружения ПКС на поверхности аэродрома и регулирования движения ВС (разрешения конфликтов).
- Если в результате работы модели регулирования поменялся план (например, была назначена задержка), модель актуализирует планы отрегулированных рейсом, доступные всем моделям, а также сообщает об изменениях имитационной модели полета ВС в воздухе и модели управления очередью на прибытие и вылет в АДЦ.
- Если возникла необходимость перестроения маршрута руления (в случае смены назначенной рейсу ВПП, в случае изменения посадочных характеристик (скорости), в результате работы модели регулирования на аэродроме), модель

вызывает модель построения маршрута на аэродроме с новыми параметрами, полученный маршрут сохраняется в плане полёта. Обновлённый план передаётся модели ВС в воздухе и модели регулирования в воздухе.

3.5.2. Модель движения воздушных судов по поверхности аэродрома

Модель имитирует движение ВС по поверхности моделируемых в рамках сеанса аэродромов.

При моделировании движения ВС используются следующие принципы:

- ВС рассматривается как материальная точка;
- имитируется движение центра масс ВС;
- имитируется равномерное и равноускоренное движение ВС. Равноускоренное (равнозамедленное) движение моделируется только при взлёте (разгон по ВПП) и посадке (торможение после касания ВПП). На всех остальных участках аэродромного маршрута ВС движется с постоянной скоростью. Смена скорости при переходе на участок, скорость на котором отличается от предыдущего, происходит мгновенно;
- модель имитирует руления ВС на тяге собственных двигателей и под действием буксировщика;
- модель имитирует следующие этапы движения ВС:
 - движение от точки касания ВПП до места стоянки для прилетающих ВС;
 - движение от места стоянки до точки отрыва от ВПП для вылетающих ВС;
 - движение с одного места стоянки на другое при выполнении буксировки.
- модель движется строго по заданному маршруту руления с указанными в нём параметрами скорости и ускорения. Соответственно, регулирование движением ВС осуществляется только через маршрут руления;
- технологические остановки (запуск двигателя, остановка перед выездом на ВПП, занятие исполнительного старта) моделируются временной задержкой.

3.5.3. Модель обнаружения потенциальных конфликтных ситуаций на поверхности аэродрома

Модель обнаруживает ближайшую по времени потенциальную конфликтную ситуацию между ВС на поверхности аэродрома на заданную глубину исходя из фактических данных о рейсах и фактических планов полётов, актуализированных в процессе моделирования. Модель обнаруживает ПКС следующих типов:

- «Пересечение ВПП» – ситуация, при которой одно из ВС совершает разбег или взлёт, либо торможение или посадку на ВПП, находясь при этом на расстоянии не более заданного от торца ВПП, а второе ВС пересекает ту же самую ВПП;
- «Нарушение норм на ВПП» – нарушение временных интервалов между вылетами, прилётами или прилётами и вылетами, совершаемыми с одной или зависимых ВПП;
- «Конфликт на исполнительном старте» – ситуация, при которой два ВС одновременно занимают исполнительный старт;
- «Конфликт на предварительном старте» – ситуация, при которой два ВС одновременно занимают один и тот же предварительный старт;
- «Догон на РД» – попадание одного из ВС в зону безопасности другого на участках маршрутов по поверхности аэродрома в зоне перрона и на РД, при котором один ВС догоняет другое;
- «Пересечение на РД» – попадание одного из ВС в зону безопасности другого на пересекающихся участках маршрутов ВС в зоне перрона и на РД;
- «Встречный курс на РД» – попадание одного из ВС в зону безопасности другого на участках маршрутов ВС по поверхности аэродрома в зоне перрона и на РД, при движении по которым рассматриваемые ВС движутся навстречу друг другу.

На рисунке 3.13 представлена визуализация потенциальной конфликтной ситуации в имитационной модели.



Рисунок 3.13. Конфликт типа «Пересечение на рулежной дорожке»

3.5.4. Модель регулирования движения ВС на поверхности аэродрома, включая ВПП.

Модель регулирования движения ВС на поверхности аэродрома обеспечивает бесконфликтное движение подаваемых на вход ВС по поверхности аэродрома, если это возможно, с учётом заданных пользователем параметров регулирования, норм эшелонирования и интервалов на ВПП. Регулирование происходит на всех этапах движения ВС по поверхности аэродрома: для прилетающих рейсов – от момента касания до места стоянки, для вылетающих – от места стоянки до момента начала разбега с исполнительного старта. Работа модели зависит от горизонтов регулирования. Как правило, горизонт регулирования для прилетающих рейсов больше, чем для вылетающих. Это делается для того, чтобы регулировать вылетающие рейсы относительно прилетающих. Кроме того, горизонт регулирования на поверхности аэродрома для прилетающих рейсов целесообразно делать меньше аналогичного в воздухе для уменьшения количества перерегулирования и уменьшения задержек. Последовательность действий модели регулирования состоит из следующих операций:

- Поиск ПКС;
- Выбор задерживаемого ВС;
- Определение места и величины задержки;

- Изменение плана движения ВС по поверхности аэродрома;
- Перерегулирование.

3.6. Алгоритмы и ключевые решения для обеспечения проведения моделирования

3.6.1. Алгоритм формирования случайных потоков ВС

При проведении исследований перспективных вариантов структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома требуется исследовать потоки прогнозной интенсивности или с измененным распределением рейсов по направлениям. Для задач, связанных с оценкой пропускной способности аэродромов, требуются потоки с определенным количеством взлетно-посадочных операций в час. Кроме того, в ряде исследований требуется обработка большого объема статистики, что не может быть сделано на основе фактических данных ввиду отсутствия требуемого объема. Таким образом, требуется модель, позволяющая в кратчайшее время формировать прогнозные потоки ВД, где будут задаваться параметры, позволяющие варьировать структуру и интенсивность потоков воздушного движения. В диссертационной работе представлена модель формирования случайных потоков ВД, предназначенных для проведения исследований по оценке эффективности использования воздушного пространства [78-80].

Модель формирования случайных потоков ВД включает три этапа: подготовка данных, создание множества рейсов для нового формируемого потока ВД, назначение времени входа рейсам.

Подготовка данных

Первым этапом является подготовка данных на основе потоков воздушного движения и расчет целевых значений интенсивностей I^{aim} , $\{I_h^{aim}\}_{h=0,23}$, $\{I_a^{F_a,aim}\}_{a \in A}$,

$$\{I_h^{F_a,aim}\}_{\substack{a \in A \\ h=0,23}}.$$

На данном этапе решается задача расчёта целевой интенсивности потока ВД, а также заданных в соответствии с параметрами подпотоков ВД. Для этого исходный

поток последовательно делится на пять уровней:

- 1) Сам суточный поток.
- 2) Суточный поток делится на подпотоки, порождаемые всеми возможными точками входа, $\{F_p\}_{p \in P}$.
- 3) Полученные подпотоки делятся на подпотоки, порождаемые линиями, $\{F_{pl}\}_{p \in P, l \in L}$.
- 4) Полученные подпотоки делятся на подпотоки, порождаемые типами ВС, $\{F_{plv}\}_{p \in P, l \in L, v \in V}$.
- 5) Полученные подпотоки делятся на подпотоки, порождаемые маршрутами полетов, $\{F_{plvm}\}_{p \in P, l \in L, v \in V, m \in M}$.

Изменение интенсивности воздушного движения производится по нисходящей в соответствии с описанными выше уровнями в той последовательности, в которой они представлены выше. Тем не менее, при изменении интенсивности может возникнуть проблема, связанная с нецелочисленными значениями коэффициента, например, если требуется увеличивать интенсивность не в 2 или 3 раза, а в 1.2, 1.3 раза. Данная проблема усугубляется на пятом уровне $I^{F_{plvm}}$, когда суточное значение интенсивности может достигать единиц рейсов. Это может привести к недостижению целевой интенсивности ВД.

Таким образом, был разработан алгоритм, в основе которого лежит последовательное округление от верхнего уровня к нижнему, где прирост или уменьшение интенсивности распределяется последовательно на каждом уровне равномерно по всем подпотокам этого уровня с контролем общей целевой интенсивности.

Этап формирования набора рейсов

Второй этап заключается в процедуре создания мультимножества рейсов $(F)_r$.

На рисунке 3.14 изображен алгоритм создания мультимножества рейсов на основе исходного потока F^0 . Слева на рисунке изображена последовательность формирования рейсов, справа розыгрыш элементов множества. Происходит розыгрыш элементов множества (рейсов) с использованием равномерного распределения на всех уровнях подпотоков ВС.

В процессе розыгрыша выбранные рейсы учитываются при последующем выборе и

уже не будут добавлены к мультимножеству рейсов.

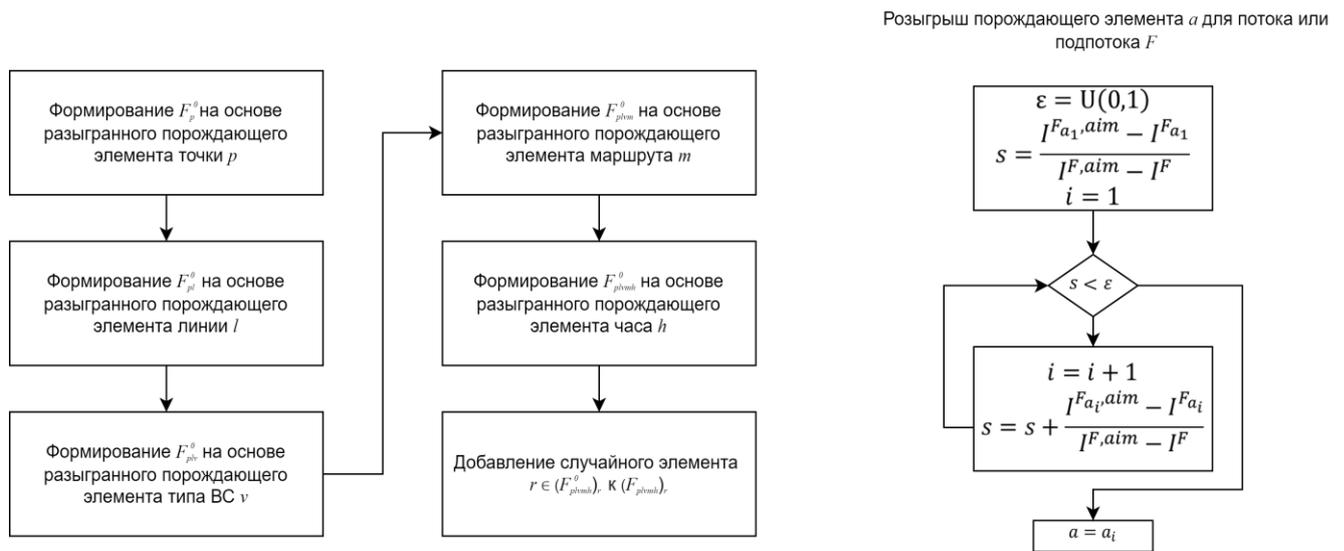


Рисунок 3.14. Алгоритм этапа создания мультимножества рейсов

Назначение времен входа

На данном этапе происходит назначение времени входа каждому рейсу из сформированного на предыдущем этапе мультимножестве рейсов. Таким образом, формируется пара $(r, t)_{r \in (F)_r}$ и добавляется к случайному потоку F .

Пусть для каждого рейса r существует множество допустимых для входа интервалов $\{T_i^s\}$, которое определяется свободными временными интервалами с учётом минимальных допустимых интервалов между рейсами, которым уже были назначены времена входа T_r .

На рисунке 3.15 представлен алгоритм формирования допустимых временных интервалов и назначения каждому рейсу времени входа. Если в процессе поиска свободных для входа интервалов не находится таких, то в ходе алгоритма происходит проверка на возможность сдвига времен входа рейсов, которым уже были назначены времена. При отсутствии возможности сдвига, рейс удаляется из множества $(F)_r$.

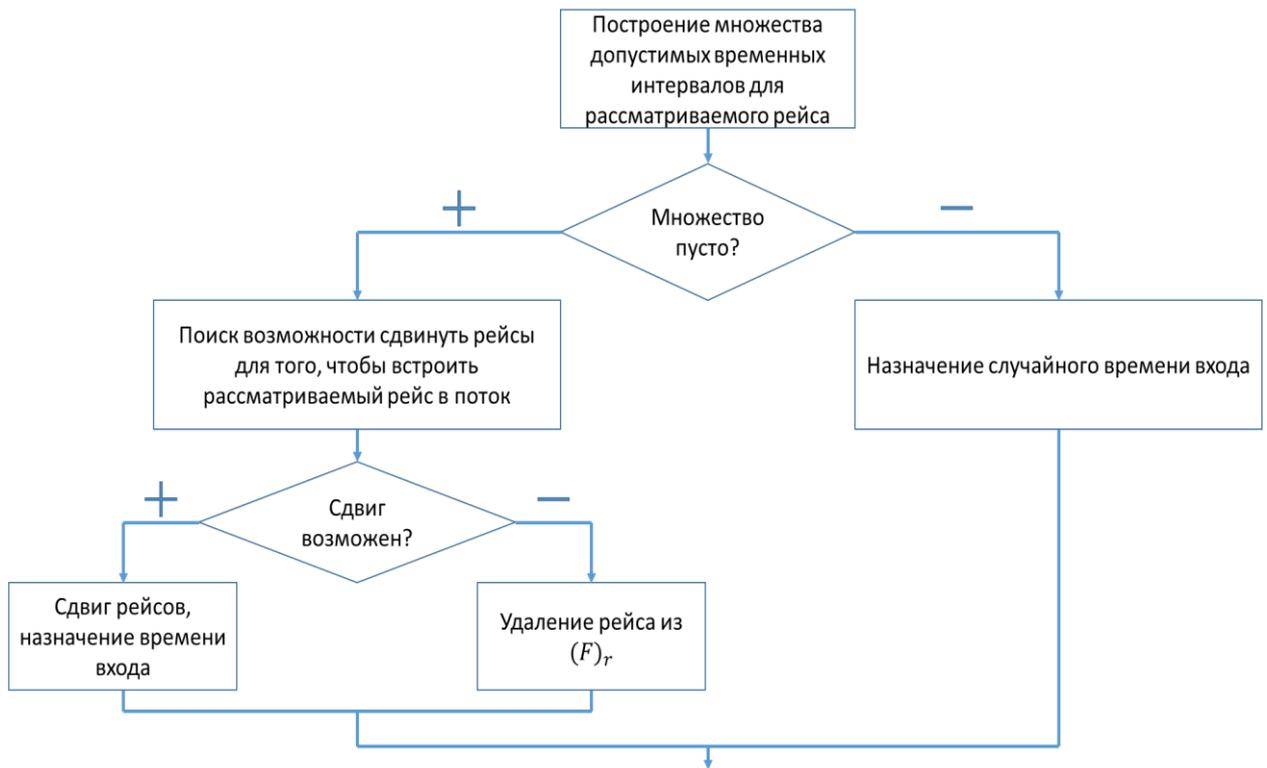


Рисунок 3.15. Алгоритм формирования множества интервалов и назначения времени входа для рейса

Такой подход позволяет при высоких требуемых интенсивностях совершить максимально возможное количество входов в случае высоких требуемых интенсивностей.

Для вычисления времени входа была выбрана случайная величина, определяемая бета-распределением. Бета-распределение является частным случаем распределения Пирсона, а именно распределением Пирсона I типа.

Плотность вероятности распределения:

$$f_x(x) = \frac{x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)}, \text{ где} \quad (3.1)$$

- $\alpha > 0, \beta > 0$ - произвольные фиксированные параметры;

- $B(\alpha, \beta) = \int_0^1 x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1} dx$ - бета-функция.

Данное распределение подходит для задачи по двум причинам:

1). Является двухпараметрическим, что позволяет в зависимости от целевой структуры потока варьировать плотность вероятности.

2). Случайные величины, получаемые с использованием данного распределения,

распределяются на отрезке $[0;1]$. При назначении времени входа отрезком будет являться нормированное значение времени входа рейса в моделируемое воздушное пространство.

На рисунке 3.16 представлены примеры вида плотности вероятности с разными параметрами.

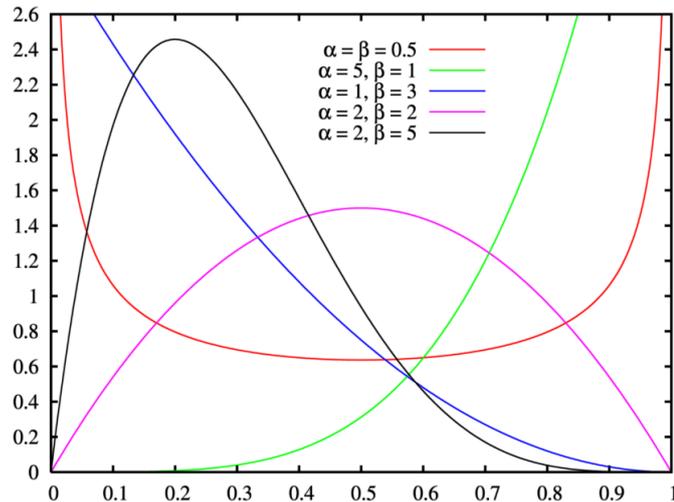


Рисунок 3.16. Плотности вероятности бета-распределения

В условиях данной задачи наиболее подходящими будут значения параметров $\alpha > 1, \beta > 1$, при которых график плотности вероятности будет иметь унимодальный вид. Модой этого распределения для каждого рейса будем считать нормированное время входа рассматриваемого рейса в исходном потоке. Действительно, если целью является создание случайного потока, приближенного к исходному, закон, согласно которому исходное время входа является наиболее вероятным, подходит для решения данной задачи.

3.6.2. Алгоритм формирования бесконфликтной очереди

Для обнаружения и разрешения ПКС в составе комплекса реализована модель, имитирующая работу автоматизированной системы управления воздушным движением (АС УВД), а также действия диспетчера по разрешению ПКС и контролю воздушной обстановки (модель диспетчера) [81]. Задачи модели состоят в следующем:

- обнаружение ПКС;
- разрешение ПКС путем назначения мер регулирования;

- формирование бесконфликтной очереди на прибытие и вылет.

В процессе моделирования на основе команд от модели диспетчера, с использованием данных по летно-техническим характеристикам ВС прогнозируются бесконфликтные 4D траектории ВС. Бесконфликтные потоки ВД формируются с целью расчета задержек и других показателей эффективности для пользователей ВП в условиях реалистичной воздушной обстановки.

Полученные в результате моделирования данные, включая фактические планы полетов для промоделированных рейсов, трековые данные, данные о конфликтах, данные о примененных мерах регулирования и др., записываются в базу данных и используются при расчете показателей.

Большое значение в проведении исследований имеет модель построения бесконфликтных очередей ВС на прибытие и вылет в аэропорты аэроузла. Данная модель напрямую влияет на результаты моделирования и получаемые при этом показатели для пользователей ВП, так как именно в ней рассчитываются задержки ВС и корректируется время взлетов/посадок.

Алгоритм формирования бесконфликтной очереди на прибытие и вылет

При моделировании ВД в районе аэроузла большое значение имеет способ бесконфликтного слияния потоков ВД и формирования очередей из прибывающих и вылетающих потоков ВС. В мировой литературе предложено большое количество разнообразных методов и подходов, некоторые из которых представлены в [82-87]. Выбранные для моделирования алгоритмы наряду с предлагаемыми концепциями структуры ВП, непосредственно влияют на рассчитываемые показатели, например, задержки ВС при прибытии и вылете.

В рамках оценки новых концепций структуры ВП модель выполняет следующие функции:

- разрешение ПКС на этапе полета ВС по стандартным маршрутам прибытия (STAR) и вылета (SID);
- управление ВС на трассовой части маршрута для формирования бесконфликтных потоков при заходе на STAR;
- разрешение ПКС на ВПП моделируемых аэродромов;
- формирование очередности заходов на посадку и вылетов ВС для моделируемых аэродромов;

- фиксация загруженности элементов структуры ВП и операций диспетчера, связанных с регулированием.

Информация о прибывающих или вылетающих из аэроузла ВС поступает в модель формирования бесконфликтной очереди при попадании ВС в горизонт регулирования, то есть при выполнении некоторого заданного набора условий. При входе ВС в горизонт регулирования модель формирования бесконфликтной очереди обнаруживает и разрешает все ПКС с его участием вплоть до посадки или выхода ВС на трассовую часть маршрута, строит бесконфликтную траекторию с учетом мер регулирования, а также определяет его место в очереди вылетов и прибытия.

Для вылетающих ВС используется временной горизонт регулирования: ВС регулируются за определенный промежуток времени (например, 20 минут) до момента вылета, который задается исследователем и является единым для всех моделируемых аэродромов. Для прибывающих ВС предусмотрено два варианта задания горизонта регулирования: по входу в моделируемое ВП или по времени, когда ВС регулируются за определенный промежуток времени до момента посадки. Для формирования бесконфликтных потоков при заходе на STAR предусмотрено использование дополнительного горизонта регулирования на трассовой части полета, при входе в который разрешаются ПКС до точки схода с трассы. ВС регулируются за определенный промежуток времени до момента пролета точки схода с трассы.

Выбор горизонтов регулирования определяет приоритетность прибытия и вылетов. При разрешении ПКС на ВПП и в воздухе приоритет имеет ВС, раньше попавшее в горизонт регулирования. Таким образом, при обнаружении ПКС между двумя прибывающими или двумя вылетающими ВС приоритет будет иметь то, чье время прибытия/вылета меньше, то есть модель работает по принципу «первый пришел – первый обслужен» (First Come – First Served, FCFS). То же правило будет выполняться между прибывающими и вылетающими ВС при выборе одинаковых временных горизонтов для прибывающих и вылетающих потоков, однако исследователь может задать временные горизонты таким образом, чтобы их разность заведомо обеспечивала приоритет прибывающих ВС над вылетающими или наоборот. В таком случае принцип FCFS нарушается.

Для разрешения ПКС и формирования очередности взлетов и посадок модель применяет меры регулирования, доступность которых определяется структурой ВП. Среди моделируемых мер регулирования:

- задержка вылета;
- смена маршрутов SID и STAR;
- регулирование на «веере» (Point Merge System) [88-89];
- регулирование на «тромбоне»;
- отправка в зону ожидания;
- изменение горизонтальной скорости полета ВС.

В результате работы модели формирования бесконфликтной очереди для регулируемого рейса перестраивается 4D траектория выбранного для регулирования ВС. Для построения бесконфликтной 4D траектории модель может выбрать одну или комбинацию нескольких мер регулирования. При выборе мер регулирования модель руководствуется возможностью разрешения ПКС с их помощью, а также правилами приоритетности мер и критерием оптимальности, приведенными далее.

В процессе моделирования формирование бесконфликтной очереди происходит в динамическом режиме, модель выполняет операции с заданной периодичностью (например, раз в минуту).

Пусть в момент времени t_{cur} выполняется очередной цикл операций модели. Сначала выполняется поиск ВС, вновь поступивших в горизонт регулирования. Если такие ВС существуют, то они сортируются по времени прибытия/вылета, и к ним по очереди применяются процедуры по формированию бесконфликтных траекторий. При этом для разрешения ПКС с участием рассматриваемого ВС к нему применяются меры регулирования, строится новая оптимальная 4D траектория и определяется его время прибытия/вылета. При разрешении ПКС с уже отрегулированными ВС, чье время входа в горизонт регулирования меньше ($t < t_{cur}$), всегда задерживается рассматриваемое (вновь поступившее в горизонт) ВС. После построения новой бесконфликтной оптимальной 4D траектории ВС считается отрегулированным, а все ПКС с его участием, возникающие в дальнейшем (при $t > t_{cur}$), будут разрешаться путем задержки вновь поступивших в горизонт регулирования ВС.

Алгоритм построения оптимальной бесконфликтной 4D траектории для каждого

отдельного ВС приведен на рисунке 3.17. Для рассматриваемого ВС определяется множество доступных маршрутов STAR или SID, по каждому из которых строится бесконфликтная траектория.

Построение бесконфликтной траектории представляет собой итерационный процесс, на каждой итерации которого для ВС определяются ПКС, требуемая минимальная задержка для их разрешения и необходимые меры регулирования. После этого строится новая 4D траектория с учетом примененных мер регулирования, и заново определяются ПКС. Если после очередной итерации не обнаруживаются новые ПКС, т.е. построенная 4D траектория становится бесконфликтной, то процесс завершается. Иначе требуемые задержки и меры регулирования определяются заново. Если при этом для очередной траектории накапливается задержка, большая, чем для ранее построенных бесконфликтных траекторий по другим маршрутам, то данная траектория и соответствующий маршрут исключаются из рассмотрения.

После построения бесконфликтных траекторий по всем доступным для ВС маршрутам в качестве результата работы алгоритма выбирается траектория, которой соответствует наименьшая задержка.

Критерием оптимальности в предложенном алгоритме является время задержки ВС при прибытии или вылете. В качестве оптимальной бесконфликтной 4D траектории выбирается та, на которой задержка минимальна. Пусть всего построено Ntr возможных бесконфликтных траекторий, в рассматриваемой структуре ВП доступно $Nreg$ мер регулирования, а задержка на траектории с номером i после применения меры с номером j обозначается как Δt_j^i , тогда выбор оптимальной траектории Tr^* осуществляется согласно выражению:

$$Tr^* = \arg \min_{i=1, \dots, Ntr} \sum_{j=1}^{Nreg} \Delta t_j^i \quad (3.2)$$



Рисунок 3.17. Алгоритм построения оптимальной бесконфликтной 4D траектории

Для разрешения ПКС и выбора мер регулирования выполняются следующие правила:

- 1) если с участием регулируемого ВС обнаружено несколько ПКС, то сначала разрешается ПКС, расположенная ближе к регулируемому ВС;
- 2) если для разрешения ПКС доступно несколько мер регулирования, то сначала выбирается та мера, чье место применения ближе к месту ПКС;
- 3) если для разрешения ПКС недостаточно применения одной меры регулирования, то применяется комбинация нескольких мер;
- 4) если к прибывающему ВС применяется некоторая мера регулирования, то, во избежание лишних задержек, пересматриваются все меры регулирования, примененные к ВС на предыдущих итерациях ниже по траектории движения;
- 5) задержка в зоне ожидания применяется только в том случае, когда другие меры регулирования на STAR не способны разрешить ПКС и обеспечить безопасные интервалы движения ВС;
- 6) изменение скорости применяется к прибывающим ВС в двух случаях: для разрешения ПКС в первой точке STAR и если все остальные меры регулирования, включая отправку в зону ожидания, не способны разрешить ПКС. Регулирование скоростью применяется только на трассовом участке маршрута ВС, так как при

движении по участкам маршрутов STAR/SID требуется соблюдение скоростных ограничений, налагаемых структурой ВП.

3.6.3. Алгоритм обнаружения потенциальных конфликтных ситуаций

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.

Модель среднесрочного обнаружения потенциальных конфликтных ситуаций прогнозирует конфликтные ситуации между ВС в терминальной зоне аэроузла (районе аэродрома) и на маршруте ОВД следующих типов (рисунок 3.18):

- С1 – пересечение двух ВС с нулевой вертикальной скоростью (с постоянной высотой);
- С2 – пересечение двух ВС, одно из которых имеет ненулевую вертикальную скорость, в то время как другое сохраняет высоту;
- С3 – пересечение двух ВС, имеющих ненулевые вертикальные скорости;
- С4 – догон одного ВС другим, при этом оба ВС имеют нулевую вертикальную скорость;
- С5 – догон одного ВС другим, при этом одно из ВС имеет ненулевую вертикальную скорость, а второе сохраняет высоту;
- С6 – догон одного ВС другим, при этом оба ВС имеют ненулевые вертикальные скорости;
- С7 – конфликтная ситуация между двумя ВС, двигающимися встречными курсами и имеющими нулевые вертикальные скорости;
- С8 – конфликтная ситуация между двумя ВС, двигающимися встречными курсами, при этом одно из ВС имеет ненулевую вертикальную скорость, а второе сохраняет высоту;

- С9 – конфликтная ситуация между двумя ВС, двигающимися встречными курсами с ненулевыми вертикальными скоростями.

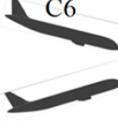
	На одном эшелоне	Один изменяет эшелон	Оба изменяют эшелоны
Пересечение	C1 	C2 	C3 
Догон	C4 	C5 	C6 
Встречный курс	C7 	C8 	C9 

Рисунок 3.18. Типы ПКС

Кроме того, при нарушении норм временных интервалов на ВПП приняты ещё три типа конфликтов:

- С10 – нарушение временных интервалов на ВПП между двумя вылетающими рейсами;
- С11 – нарушение временных интервалов на ВПП между прилетающим и вылетающим рейсами;
- С12 – нарушение временных интервалов на ВПП между двумя прилетающими рейсами.

Модель прогнозирует конфликтные ситуации между ВС, находящимися на маршруте ОВД и в терминальной зоне, а также обнаруживает потенциальные нарушения норм временных интервалов между воздушными судами на ВПП. Прогноз работает на заданную глубину исходя из фактических данных о рейсах и фактических планов полётов, актуализированных в процессе моделирования. Модель позволяет обнаруживать конфликтные ситуации, как между всеми ВС, так и для заданного ВС со всеми остальными.

Алгоритм прогноза

В основе работы модели лежит представление о зоне безопасности ВС, как об имеющей форму «шайбы» - цилиндр с диаметром, соответствующим норме горизонтального эшелонирования, и высотой, соответствующей норме вертикального

эшелонирования. ПКС обнаруживается при прогнозировании попадания в эту зону другого ВС (рисунок 3.19).

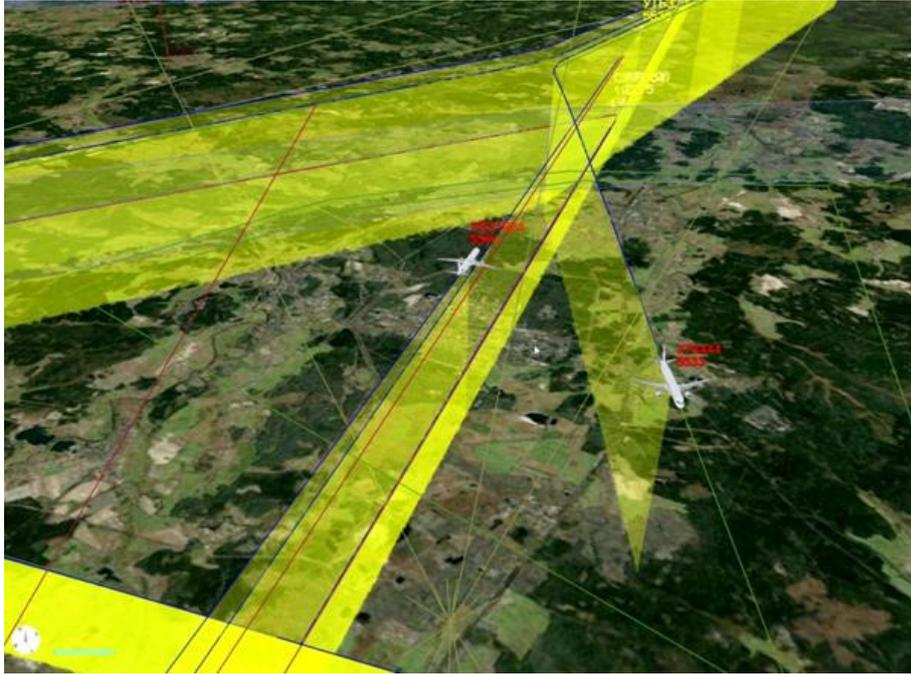


Рисунок 3.19. Обнаружение ННЭ

На рисунке 3.20 изображена блок-схема алгоритма поиска ПКС для потока ВС.

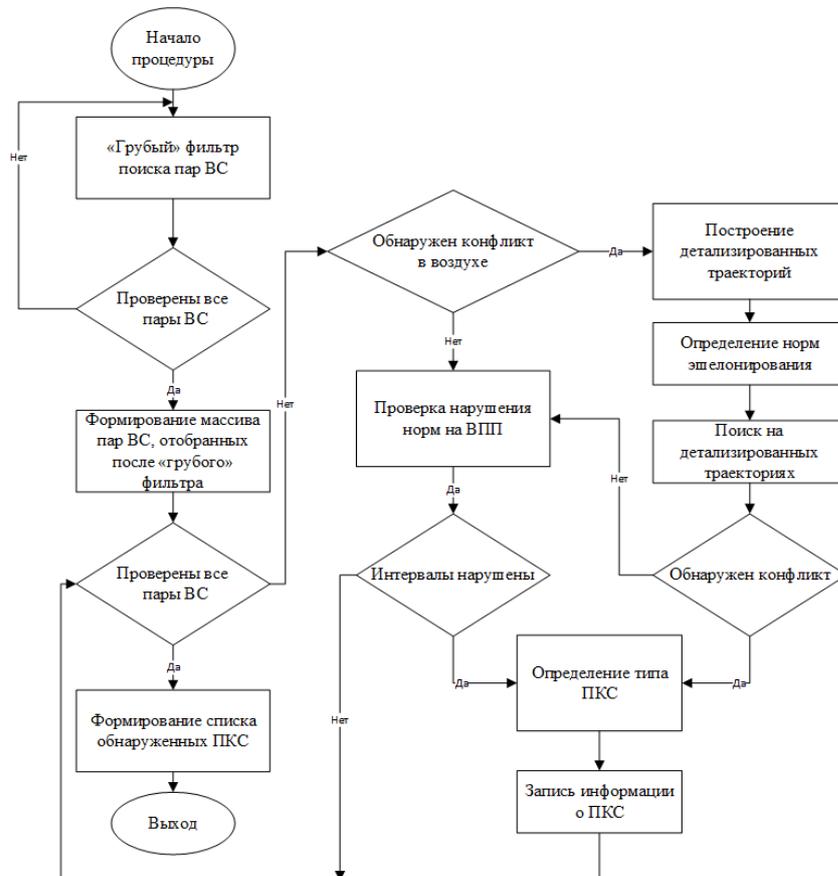


Рисунок 3.20. Блок-схема алгоритма поиска конфликтных ситуаций

Сначала ведётся «грубый поиск» - маршруты пар рейсов рассматриваются без детализации траектории по плановым участкам. При рассмотрении маршрутов каждой пары рейсов обнаруживаются участки, на которых ВС будут находиться одновременно. Для этих участков определяются действующие на них нормы эшелонирования и выбирается максимальная из них. В случае, когда длина рассматриваемого участка маршрута одного из ВС больше, чем действующая норма безопасности, происходит детализация траекторий - участок делится на части, соответствующие этой норме. Это делается для того, чтобы не пропустить ПКС между ВС, двигающимися по разным участкам, не имеющим общих точек, либо пересекающимися вдали от точек начала и конца участков. После этого полученные участки проверяются на конфликтность – разность высот в точках начала участков сравнивается с нормой по высоте с заданным коэффициентом надбавки (если он задается в модели управления очередью на прибытие и вылет в АДЦ), расстояние между точками начала участков с горизонтальной нормой эшелонирования. При нарушении этих норм информация о конфликтных рейсах записывается в массив. Алгоритм «грубой проверки» изображён на рисунке 3.21

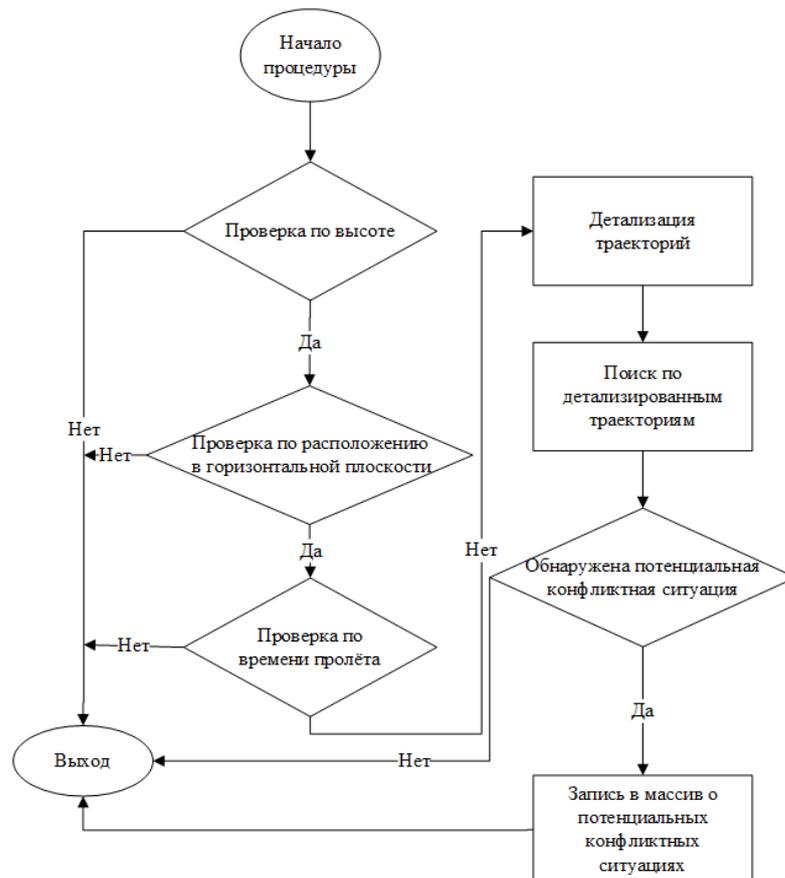


Рисунок 3.21. Алгоритм «грубой проверки» - начальный шаг алгоритма поиска потенциальных конфликтных ситуаций

Если для рассматриваемой пары рейсов не было выявлено ПКС в воздушной части маршрута, производится проверка нарушения норм временных интервалов на ВПП. Для этого для текущей ситуации (прилёт-прилёт, вылет-прилёт, прилёт-вылет, вылет-вылет) выбираются нормы безопасности из заданного массива норм. Выбранная норма соответствует весовым категориям рассматриваемых ВС, ВПП вылета или прилёта. Если ВС производят посадку или взлёт с независимых ВПП, то норма назначается отрицательной и проверка на нарушение норм прекращается. В противном случае времена посадки или взлёта сравниваются с нормой безопасности. В случае нарушения информация о найденной ПКС записывается в выходной массив ПКС (типы С10 – С12).

На следующем этапе найденные в ходе «грубой» проверки пары рейсов рассматриваются более подробно. Для каждого ВС строится подробная детализация его маршрута с заданным шагом по времени. Для каждого участка такой траектории вычисляются координаты начала участка, прогнозируемое время пролёта начала участка, прогнозная высота пролёта точек начала участка, вертикальная и горизонтальная скорости, курсовые углы. Кроме того заполняются необходимые признаки: признак вертикального профиля, типы участков. Для рассчитанных траекторий запускается процедура обнаружения ПКС между двумя рейсами. Для этого аналогично «грубой» проверке происходит проверка участков на конфликтность. Однако здесь проверка происходит по более точным нормам без добавочного коэффициента. Для найденных конфликтов производится определение типа ПКС (С1 – С9) согласно признаку вертикального профиля и курсовым углам ВС:

- при разнице между курсами $0 < d\xi < \frac{\pi}{4}$ или $\frac{7\pi}{4} < d\xi < 2\pi$ прогнозируется конфликтная ситуация типа «Догон» (С4 – С6);
- при $\frac{3\pi}{4} < d\xi < \frac{5\pi}{4}$ – прогнозируется конфликтная ситуация типа «Встречный курс» (С7 – С9);
- в остальных случаях – прогнозируется конфликтная ситуация типа «Пересечение» (С1 – С3).

Кроме того, производится поиск момента окончания конфликтной ситуации. Если при детализированном рассмотрении траекторий ВС не было найдено ПКС,

производится проверка на нарушение временных интервалов на ВПП аналогично описанной выше.

В завершении работы модели массив с найденными ПКС сортируется по времени начала конфликта.

3.6.4. Алгоритм расстановки ВС по местам стоянок

Пропускная способность аэродрома определяется множеством факторов, в том числе, рациональным использованием имеющихся ресурсов. Примером таких ресурсов являются места стоянок. Так как в крупных аэропортах число ВС, ежедневно требующих размещения на местах стоянок, может достигать несколько сотен, рациональное их использование является сложной оптимизационной задачей.

При размещении ВС на местах стоянок необходимо учитывать как физические ограничения (размеры ВС, связанность стоянок), так и предпочтения аэропортовых служб. Кроме того, полученное расписание должно иметь заданный запас прочности, чтобы незначительные нарушения полётного плана не вызывали конфликты на местах стоянок.

Имеется аэродром, задан набор мест стоянок воздушных судов. Каждая стоянка характеризуется координатами, наличием/отсутствием телетрапа, возможностью размещать определённые типы ВС. Заданы правила взаимозависимости мест стоянок (некоторые стоянки не могут быть заняты одновременно, на некоторые стоянки можно проехать только через другие и т.д.). Дано расписание прилётов и вылетов на фиксированный промежуток времени. Для каждого рейса в расписании известны: авиакомпания, регистрационный номер борта, тип ВС, аэропорты и плановые времена вылета и прилёта. Авиакомпании имеют предпочтения в назначении стоянок принадлежащим им ВС. Часть стоянок обслуживает только ВС определённых авиакомпаний.

Пояснение понятия предпочтений на примере аэродрома Шереметьево приведено на рисунке 3.22. На схеме аэродрома терминал D принадлежит авиакомпании, соответственно, рейсы этой авиакомпании должны в первую очередь назначаться на места стоянок терминала D. В случае, когда мест стоянок терминала D не хватает,

возможно назначение рейсов на близкие стоянки терминалов E и F. При этом назначение на места стоянок терминала С нежелательно, но возможно при очень большой загруженности. Соответственно выбираются предпочтения.

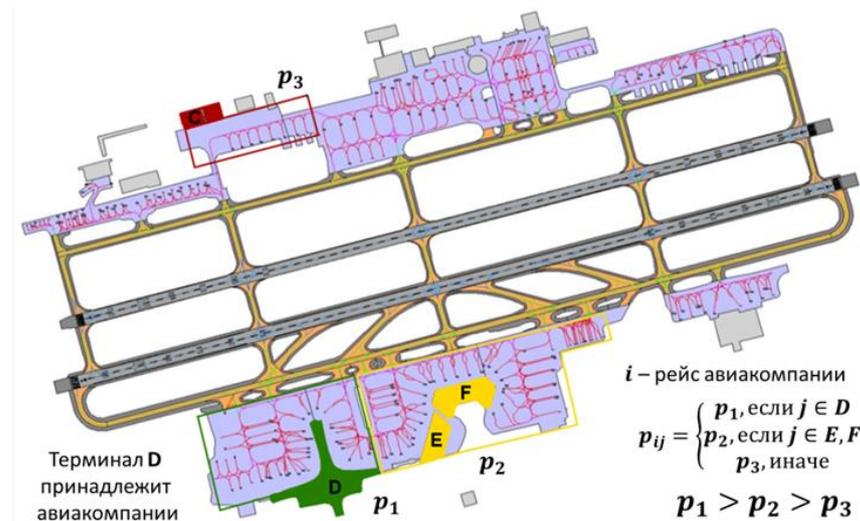


Рисунок 3.22. Пример предпочтений p_1, p_2, p_3 для аэродрома Шереметьево

Необходимо назначить всем рейсам, если это возможно, места стоянок таким образом, чтобы максимально удовлетворить запросам авиакомпаний и служб аэропорта. При этом решение должно быть нечувствительным к небольшим изменениям расписания рейсов. Допустимое значение изменения времени вылета или посадки, не влияющего на распределение стоянок, задаётся как параметр. Также должны выполняться следующие условия: 1) на одной стоянке не могут одновременно находиться более одного ВС; 2) соблюдения правил взаимозависимости стоянок.

Входной информацией для алгоритма расстановки воздушных судов по местам стоянок являются следующие данные:

1) Перечень доступных мест стоянок рассматриваемого аэродрома, характеризующихся принадлежностью определённому перрону, типом стоянки (контактная/удалённая), категориями обслуживаемых судов;

2) Перечень рейсов, характеризующихся временами занятия и освобождения стоянки, категорией, принадлежностью авиакомпании.

3) Набор приоритетов, заданных числовыми значениями выигрыша от назначения различных типов рейсов на различные типы стоянок (например, контактные или удалённые).

4) Параметры работы алгоритма: начальное значение температуры T_0 , параметр гибкости расписания t_0 , балансирующий коэффициент α , число повторяющихся итераций end_num .

Критерием оптимальности расстановки воздушных судов по местам стоянок является удовлетворение заданным приоритетам, а также запас прочности расписания, выраженного во временных промежутках между освобождением и занятием каждой стоянки.

Выходом алгоритма расстановки воздушных судов по местам стоянок является соответствие мест стоянок и назначенных на них рейсов, а также расписание занятости мест стоянок.

Задача назначения стоянок является NP-полной задачей с дискретным пространством решений. Для таких задач высокую эффективность показали стохастические алгоритмы локального поиска.

Основой алгоритма расстановки ВС по местам стоянок служит метаэвристический метод имитации отжига. Этот метод использует упорядоченный случайный поиск по аналогии с образованием в веществе при охлаждении кристаллической структуры с минимальной энергией. Основным преимуществом этого метода является свойство избегать закливания в локальных оптимумах и продолжать поиск глобального оптимума. Кроме того, этот метод легко адаптировать под конкретную задачу. Идеей алгоритма имитации отжига является использование убывающей функции температуры. При этом на каждой итерации алгоритма происходит генерация нового состояния из окрестности текущего решения. Переход в это состояние осуществляется с вероятностью $p(\Delta Q, T)$, где ΔQ – выигрыш от перехода в новое состояние, а T – значение функции температуры. Для адаптации метода к конкретной задаче необходимо определить следующие параметры:

- 1) исходное решение, которое впоследствии будет улучшаться;
- 2) функцию убывания температуры $T = T(k)$, где k – номер итерации, и начальное значение T_0 ;
- 3) функцию изменения состояния $G(x, T)$ (или порождающее семейство вероятностных распределений $\mathcal{G}(x, T)$), x – текущее состояние;
- 4) функцию вероятности перехода в новое состояние;
- 5) критерий остановки.

В качестве исходного решения берётся случайное допустимое состояние.

Функция убывания температуры имеет большое влияние на скорость и точность работы алгоритма. Существует возможность выбора из двух функций: геометрическая прогрессия $T(k) = T_0 * \beta^k$ или модель отжига Коши: $T(k) = \frac{T_0}{k}$. При этом T_0 было выбрано равным штрафу за неназначение или за нарушение ограничений P , что позволяет переходить на начальных этапах работы алгоритма в существенно худшие состояния. Переход осуществляется с вероятностью:

$$p(\Delta Q, T) = \exp\left(\frac{\Delta Q}{T}\right) \quad (3.3) \text{ При таком значении}$$

вероятности гарантируется переход в лучшее состояние.

Для генерации нового состояния также возможен выбор из двух вариантов: 1) новое состояние находится как наилучшее из проколотой окрестности текущего решения, 2) новое состояние генерируется случайно из проколотой окрестности текущего решения. Алгоритм заканчивает свою работу в следующих случаях:

- 1) $T < \varepsilon$, при этом найдено допустимое решение;
- 2) найденное лучшее решение не менялось уже в течение *end_num* итераций.

3.6.5. Алгоритм построения маршрутов руления ВС по поверхности аэродрома

Маршруты движения ВС на аэродроме представлены тремя типами:

- маршрут руления на вылет от места стоянки до исполнительного старта и далее до точки отрыва от ВПП;
- маршрут руления после посадки от точки касания ВПП до места стоянки;
- маршрут буксировки от одного МС до другого.

Маршрут должен учитывать ограничения, наложенные на маршрутную сеть аэродрома.

Общая схема построения маршрута следующая:

- оптимизационным алгоритмом строится оптимальный 2D маршрут между заданными начальной и конечной точками;
- добавляются участки на ВПП, если таковые предусмотрены;

- заполняется скорость на участках и рассчитывается время прохождения каждой точки.

Параметрами для построения маршрута на аэродроме являются:

- тип маршрута (прилет, вылет, буксировка);
- начальная точка маршрута - точка касания для прилета, точка стоянки для вылета и буксировки, для прилета в точке касания задаётся посадочная скорость;
- конечная точка маршрута - точка отрыва для вылета, точка стоянки для прилета и буксировки, для вылета в точке отрыва задана взлётная скорость;
- промежуточные точки, через которые должен пройти маршрут.

Участки движения по ВПП рассчитываются:

- После работы оптимизационного алгоритма для маршрута на вылет. Исходная заданная точка отрыва точка противоположного торца ВПП, поэтому положение точки отрыва пересчитывается. Рассчитывается необходимая длина разбега для набора заданной взлётной скорости, на оси ВПП определяется точка отрыва.
- До работы оптимизационного алгоритма для маршрута после посадки. Рассчитывается дистанция торможения от заданной посадочной скорости до скорости руления, на оси ВПП определяется точка торможения. Затем определяется ближайшая точка съезда с ВПП.

Минимизируемым критерием для оптимизационного алгоритма является общая протяженность маршрута. При этом необходимо учитывать, что маршрут может содержать промежуточные, обязательные для прохождения, точки. Каждый участок маршрута может характеризоваться некоторой ценой, а поиск оптимального решения сводится к поиску набора участков, отвечающего ряду ограничений.

Принимаются следующие ограничения:

- движение на каждом участке должно происходить в разрешенном направлении;
- маршрут движения ВС не должен проходить по осевой линии своей или соседних ВПП;
- маршрут не должен содержать острых углов;
- количество поворотов при движении должно быть минимальным (это позволяет уменьшить количество проездов по стоянкам ВС, и как следствие количество конфликтных ситуаций);

- маршрут не должен проходить через закрытые для движения объекты инфраструктуры аэродрома.

По своей постановке задача построения двухмерного маршрута сводится к задаче поиска оптимального пути μ на ориентированном графе $G(V, E)$, где $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ – множество вершин (точек), $E = (e_1, e_2, \dots, e_m)$ – множество дуг (линий), соединяющих эти вершины, путь (или ориентированный маршрут) μ – последовательность дуг, в которой конечная вершина каждой дуги является начальной вершиной следующей. Дугам графа могут быть сопоставлены определенные числа c_{ij} , называемые длиной (ценой) дуги (v_i, v_j) . Совокупность цен дуг, соединяющих вершины, может быть представлена в виде матрицы весов (матрицы соответствия) $C = (c_{ij})$, либо в виде массива, что удобнее для разреженных графов, как в нашем случае.

Пусть A – начальная вершина искомого маршрута, B – конечная вершина, v_i – текущая вершина (рассматриваемая на данном шаге алгоритма).

Алгоритм A^* в отличие от алгоритма Дейкстры исключает из рассмотрения длинные пути и за счет этого работает значительно быстрее. В нем используется эвристическая функция (обозначенная $f(v_i)$), учитывающая как пройденное расстояние ($g(v_i)$), так и оценку расстояния, которое еще только предстоит пройти ($h(v_i)$). Функция $f(v_i)$ считается по формуле:

$$f(v_i) = g(v_i) + h(v_i); \quad (3.4)$$

Пройденное расстояние $g(v_i)$ считается как сумма длин пройденных дуг. Функция $h(v_i)$ в свою очередь должна быть эвристической оценкой пути от текущей вершины до конечной точки маршрута.

Общий вид алгоритма представлен на рисунке 3.23.

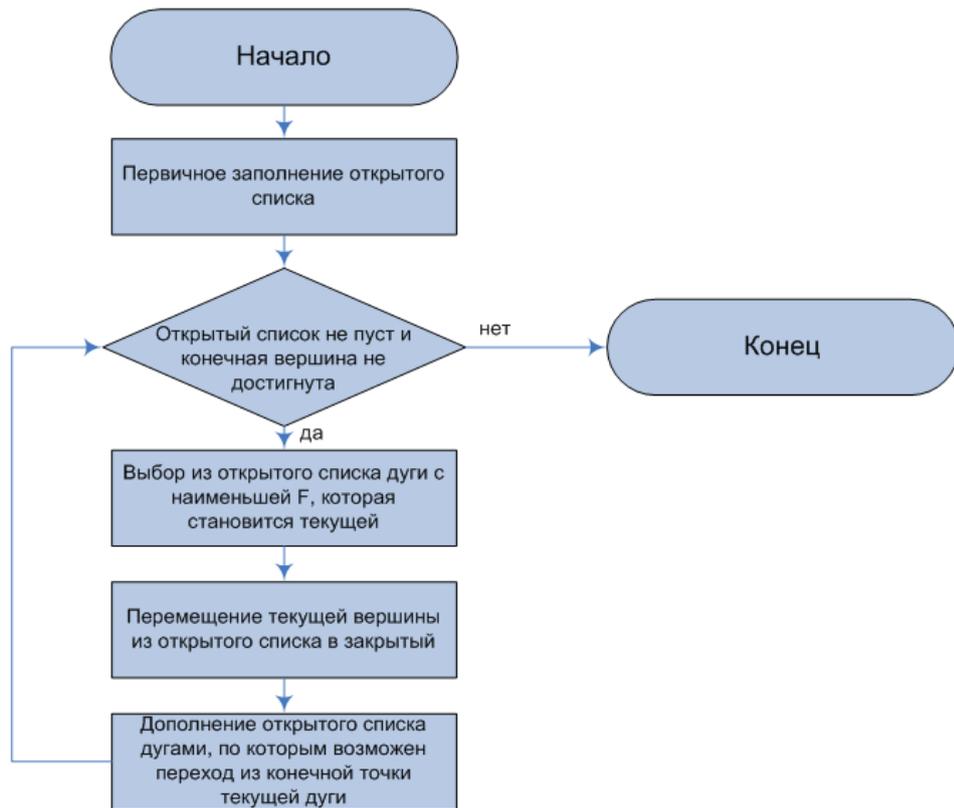


Рисунок 3.23. Блок-схема алгоритма A*

ГЛАВА 4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО АНАЛИЗУ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА И ИНФРАСТРУКТУРЫ АЭРОДРОМА И ПРИМЕР ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ВОЗДУШНОГО ПРОСТРАНСТВА И ИНФРАСТРУКТУРЫ АЭРОДРОМА

4.1. Общая схема проведения исследований

Исследования основываются на сравнении действующего варианта и одного или нескольких вариантов измененной (модернизированной) структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома [90-97]. Исследования состоят из пяти этапов: анализ требований и формирование задания на проведение исследований, подготовка данных, моделирование, обработка, анализ результатов, формирование выводов и рекомендаций. Общая схема проведения исследований изображена на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1. Общая схема проведения исследований

Этап 1. Анализ требований и формирование задания на проведение исследований

На данном этапе формируются цели проведения исследований, которые должны включать либо качественное, либо количественное выражение ожидаемого эффекта.

Основные цели могут быть дополнены объяснением причин изменения структуры воздушного пространства, что даст возможность исследователю обратить внимание на «узкие места» в структуре воздушного пространства, либо в инфраструктуре аэродрома. На основе сформированных целей исследователь должен определить перечень исходных данных, необходимых для проведения моделирования, включая структуру воздушного пространства, потоки воздушного движения и т.д. Кроме исходных данных определяются ограничения и допущения при проведении исследований. Формируется общая схема действий выполнения исследований, а также перечень моделей, необходимых для проведения исследований. Если в рамках исследований необходимо моделировать новые технологии, концепции в новой структуре воздушного пространства, что, в свою очередь, не обеспечивает инструмент проведения исследований, то формируется задание на проведение доработки инструмента. Сроки доработки учитываются в рамках общих сроков проведения исследований.

В зависимости от задачи выбирается метод проведения исследований. Если задача заключается в оценке достижения заданных количественных или качественных характеристик новой структуры воздушного пространства, то выбирается «абсолютный метод», когда результаты исследований сравниваются с заданными характеристиками. Если задача состоит в сравнении двух или более альтернативных вариантов структур воздушного пространства, то выбирается метод сравнительной оценки, когда вариант новой структуры воздушного пространства сравнивается с базовым вариантом или вариантом действующей структуры воздушного пространства.

И наконец, определяются показатели и метрики, по которым будет производиться расчет по результатам моделирования. Показатели должны быть выбраны в соответствии с поставленными целями.

Этап 2. Подготовка данных.

Подготовка данных является самой трудоемкой частью проведения исследований и занимает времени больше, чем само моделирование. Сложность данного этапа обусловлена следующими факторами: большим количеством исходных данных для проведения исследований, качеством исходным данных, необходимостью сопряжения данных на уровне моделей, подбором большого количества параметров и настроек моделей. На рисунке 4.2 изображена общая схема подготовки данных.

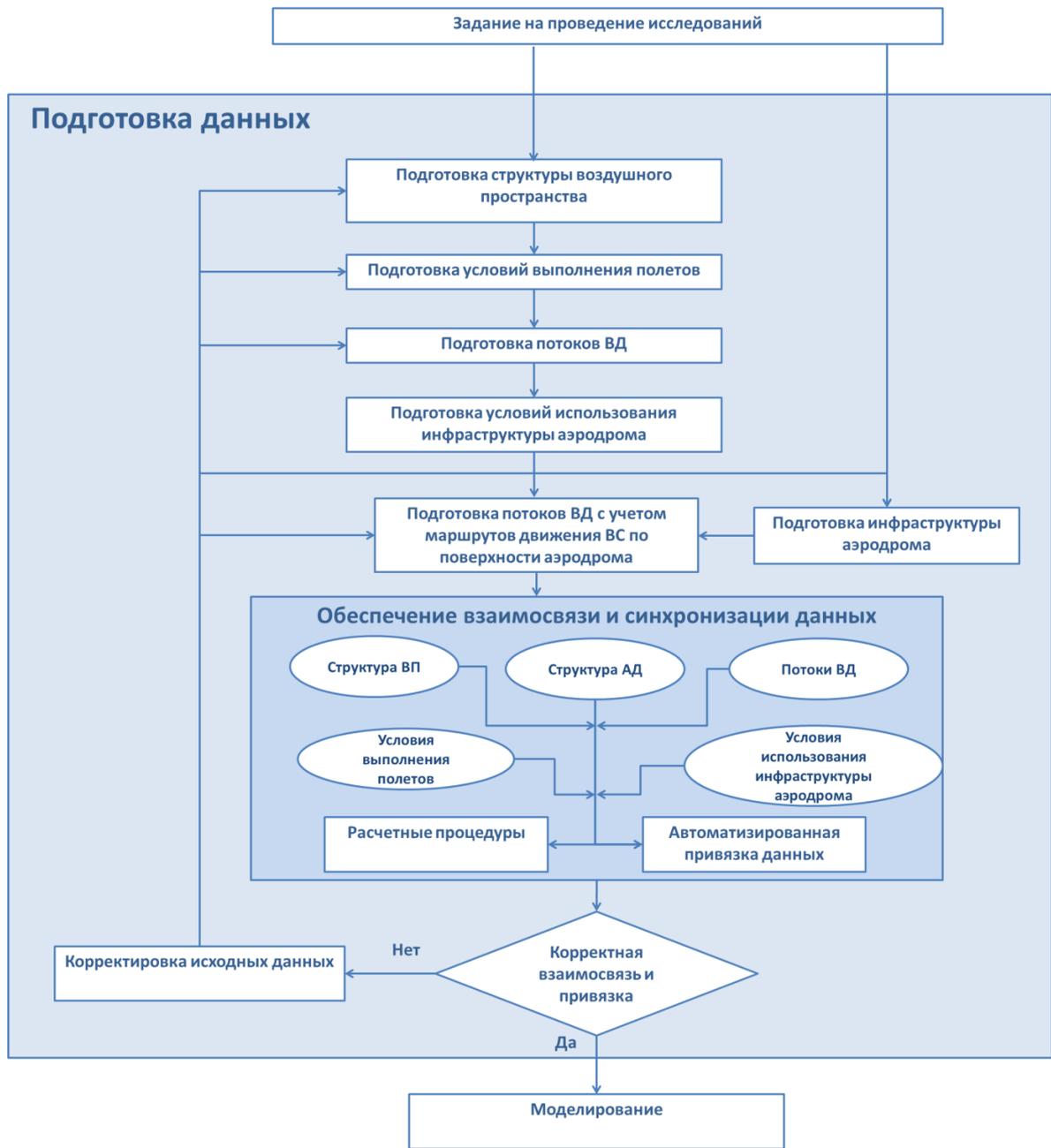


Рисунок 4.2. Подготовка данных

Исходные данные для проведения исследований по оценке структуры воздушного пространства включают в себя, прежде всего, конечно саму структуру воздушного пространства, которая состоит из следующих элементов: точки воздушного пространства, участки воздушных трасс, маршруты вылета, прибытия, захода на посадку. Подготовка каждого вида данных является двухэтапным. На первом этапе данные автоматически импортируются из определенных общепризнанных форматов. На втором этапе с использованием автоматизированных редакторов данных корректируются, либо заводятся с нуля. Результаты записываются в специальные библиотеки данных.

Другой важной составляющей процесса подготовки исходных данных является формирование потоков ВД. Исследования могут проводиться на основе фактических суточных потоках ВД. Однако такая задача может решаться только для существующей структуры воздушного пространства. Для оценки новой структуры воздушного пространства необходимо ремаршрутизировать – переложить маршруты воздушных судов под новую сеть воздушных трасс. Кроме формирования новых маршрутов отдельно ставится задача сформировать требуемую интенсивность и структуру исследовательского потока ВД. В соответствии с заложенными в задании требованиями формируется случайный, либо детерминированный поток ВД с требуемыми характеристиками.

Моделирование аэродромных операций требует заведения данных по инфраструктуре аэродрома. Для крупных аэродромов данный процесс достаточно трудоемкий и требует в каких-то случаях «ручной» работы с использованием автоматизированного редактора данных. Трудоемкость данного процесса сильно зависит от полноты и качества исходных данных, и в худшем случае данная работа может затянуться на длительное время. Аэродром является отдельной сложной системой, поэтому кроме заведения самих данных возникает задача синхронизации аэродромной инфраструктуры со структурой воздушного пространства.

Кроме основных данных в рамках данного этапа готовится информация по условиям выполнения полетов, куда входят метеоданные, нормы эшелонирования, допустимые интервалы на ВПП, а также настраиваются параметры моделирования.

В задачу подготовки данных кроме заведения входит и задача синхронизации и обеспечения связности данных для моделирования. Связь различных видов данных иногда требует сложных геометрических расчетов и может занимать длительное время. Синхронизация данных производится либо с использованием расчетных процедур, либо с использованием автоматизированных средств привязки данных. В зависимости от задачи в синхронизации участвуют данные по: структуре ВП, структуре АД, потокам ВД, условиям выполнения полетов, условиям использования инфраструктуры аэродрома. Расчетные процедуры направлены на обработку большого объема данных и решают задачу определения «принадлежности» объектов одного вида данных объектам другого вида данных. Привязка данных осуществляется путем определения либо «вручную», либо с использованием автоматических процедур и направлена на

«стыковку» данных. Задача привязки данных возникает при создании «бесшовных» маршрутов для моделирования полетов и движения ВС по поверхности аэродрома. На данном этапе анализируется целостность данных и, в случае выявления ошибок, данные корректируются, либо отправляются на доработку.

Этап 3. Моделирование

Этап моделирования требует проведения большой подготовительной работы по заведению, синхронизации, корректировке данных. Данный этап можно разделить на четыре подэтапа: формирование сценария моделирования, получение базовой модели (валидация модели), моделирование сформированного сценария и расчет показателей. На рисунке 4.3 изображена схема этапа моделирования.

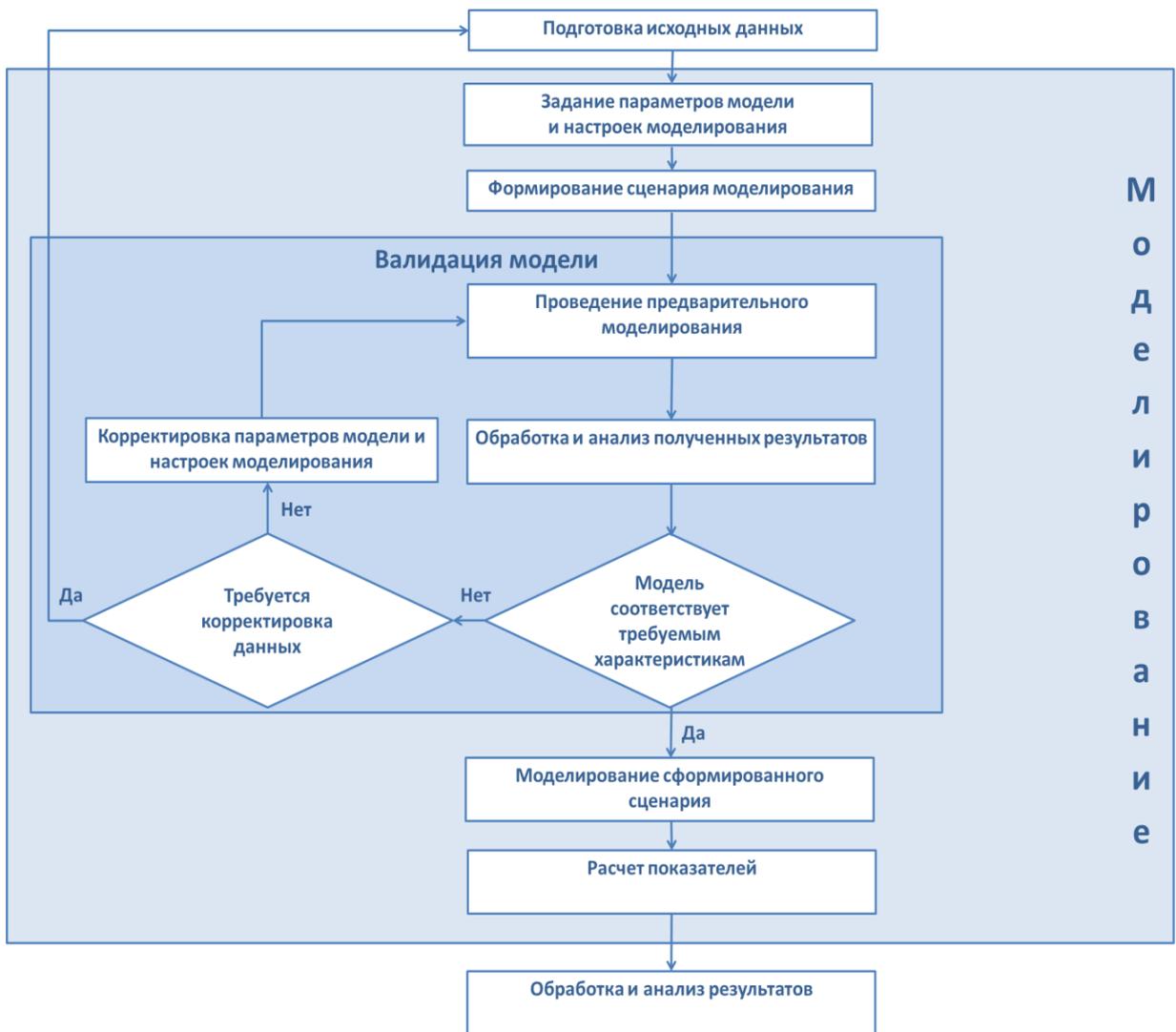


Рисунок 4.3. Этап моделирования

Валидация модели является самым трудоемким многоитерационным процессом на этапе моделирования и требует от исследователя проведения анализа модели на адекватность. На данном подэтапе исследователю необходимо провести предварительное моделирование, проанализировать характеристики и скорректировать параметры, или в худшем случае, сделать «шаг назад» и скорректировать исходные данные, если в данных были выявлены несоответствия и ошибки. В процессе проверки модели на адекватность необходимо привлекать экспертов, которые смогут оценить соответствие модели реальным процессам и системам. В зависимости от задачи экспертами могут являться представители: авиакомпаний, аэропортов, провайдеров аэронавигационных услуг, разработчиков структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома, разработчиков автоматизированных систем. Базовая модель должна проверяться на адекватность как по количественным характеристикам, так и по качественным. Количественными характеристиками могут являться, например: задержки, временная загруженность диспетчера, количество взлетно-посадочных операций. Данные характеристики могут быть получены за фактическую дату для сравнения с результатами моделирования. С другой стороны, необходимо качественно оценить процесс моделирования. Для этого проводится визуализация процесса моделирования и с помощью экспертов оценивается развитие воздушной обстановки, а также обстановки на поверхности аэродрома.

После валидации модели формируется сценарий и проводится моделирование. В зависимости от того, какие показатели требуется рассчитать, включаются те или иные модели. По результатам моделирования проводится расчет показателей. Часть характеристик может рассчитываться в процессе моделирования. Трудоемкие расчеты производятся после окончания моделирования.

Этап 4. Обработка и анализ результатов

По результатам моделирования и расчета показателей формируется большой объем данных. Это могут быть «логи» с подробным представлением данных о процессе функционирования модели, состоянием системы в конкретный момент времени с выбранным шагом фиксации. Другой составляющей является «первичная» обработка данных в результате расчета показателей. Выполняется агрегирование данных, а также геометрические расчеты, связанные с синхронизацией полученных по результатам

моделирования полетных данных и данных по структуре воздушного пространства. Полученный большой объем данных требует анализа и обработки. На рисунке 4.4 изображена схема обработки и анализа результатов.

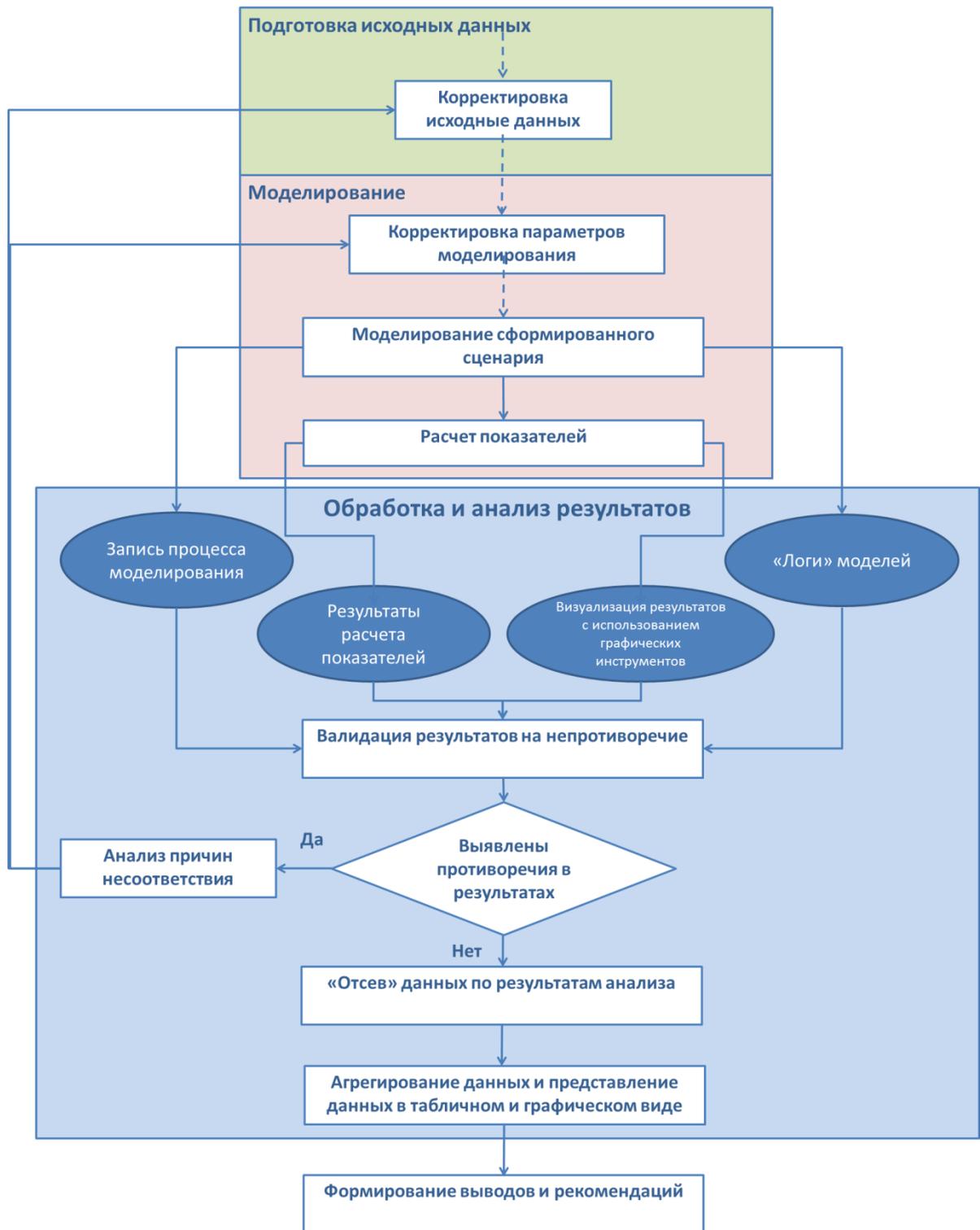


Рисунок 4.4. Обработка и анализ результатов

Первое, что требуется, это провести анализ результатов, совместив их с логами моделирования. Таким образом, производится «валидация» результатов. Анализируется выборка за определенный исследователем интервал на предмет схожести данных,

полученных в результате расчета показателей и по результатам обработки «логов» модели.

На следующем этапе производится «отсев» данных. Удаляются лишние данные, например, это могут быть рассчитанные характеристики за пределами выбранного для анализа временного интервала, либо воздушные суда, которые не закончили полет к окончанию моделирования.

После подготовки данные агрегируются и представляются в табличном и графическом виде с использованием встроенных в комплекс моделирования инструментов, а также с использованием программ, обладающими возможностью статистических расчетов и графическими инструментами.

Этап 5. Формирование выводов и рекомендаций

На последнем этапе проведения исследований производится анализ полученных результатов и промежуточных выводов. Исследователь формирует выводы и рекомендации, которые должны соответствовать поставленным в рамках исследований целям. Выводы должны отражать все преимущества и недостатки исследуемой структуры воздушного пространства, инфраструктуры аэродрома, а также моделируемых процессов, технологий и концепций.

Выводы включают в себя:

- результаты сравнительной оценки исследуемых вариантов структуры воздушного пространства, выраженные в сравнении по показателям и индикаторам;
- выявленные «узкие места» в структуре ВП, требующие либо дополнительных исследований, либо корректировки структуры ВП;
- выявленные «узкие места» в инфраструктуре аэродрома, которые снижают пропускную способность и эффективность выполнения операций на поверхности аэродрома.

Рекомендации должны быть направлены на:

- повышение эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома;
- устранение «узких мест» в структуре ВП и инфраструктуре аэродрома.

4.2. Исследовательские задачи

Перед специалистами по ОрВД могут возникать задачи, связанные с эффективностью использования действующей или проектируемой структуры воздушного пространства, а также смежные задачи, в основу которых заложена оценка использования воздушного пространства, такие как: оценка пропускной способности аэродрома, оценка роста интенсивности воздушного движения, оценка безопасности выполнения полетов т.д. Далее приведены примеры исследовательских задач, связанных с оценкой эксплуатационных характеристик структуры воздушного пространства:

- Обеспечение потребности при росте интенсивности воздушного движения в условиях действующей структуры воздушного пространства.

Сформированы прогнозы по росту спроса на авиаперевозки. В рамках программы развития авиатранспортной системы поставлены цели по обеспечению определенного количества взлетно-посадочных операций, которые должны быть выполнены для перевозки пассажиров в рамках одного или нескольких аэродромов в пределах авиаузла. Требуется оценить пропускную способность воздушного пространства и аэродрома в прогнозных условиях выполнения полетов.

- Обеспечение потребности при росте интенсивности воздушного движения в условиях проектируемой структуры воздушного пространства.

При невозможности достижения поставленных целей по обеспечению требуемой пропускной способности необходимо оценить предложенный разработчиком концептуальный проект новой структуры воздушного пространства. На основе сравнительного анализа с действующей структурой оценить по ряду показателей достижение поставленных целей, а также эффективность новой структуры воздушного пространства относительно действующей.

- Увеличение пропускной способности воздушного пространства при выполнении операций на аэродроме

Существующая (или проектируемая) инфраструктура аэродрома позволяет выполнять большее количество взлетно-посадочных операций, чем выполняется в настоящее время. Оператором аэродрома предложено количество взлетно-посадочных операций, которое аэродром может обеспечить. Задача состоит в оценке возможности

достижения поставленных целей в условиях действующей структуры воздушного пространства.

- Увеличение пропускной способности аэродромов

Структура воздушного пространства диспетчерской зоны района аэродрома (терминальной зоны авиаузла) позволяет выполнять требуемое количество взлетно-посадочных операций. Необходимо оценить возможность выполнения заданного количества взлетно-посадочных операций с учетом операций, выполняемых на поверхности аэродрома.

- Снижение нагрузки на диспетчера

Выполнение полетов в действующей структуре воздушного пространства приводит к перегрузке диспетчера в определенных секторах УВД. Требуется с использованием инструментов комплекса оценить временную загруженность диспетчера в различных условиях с учетом пиковой нагрузки. Предложить меры по снижению нагрузки на диспетчера и оценить предложенные меры.

Аналогичная задача может быть поставлена и для проектируемой структуры воздушного пространства.

- Увеличение уровня безопасности выполнения полетов

В проектируемой структуре ВП предложены меры по повышению уровня безопасности полетов. Требуется с использованием модели оценки рисков в составе комплекса, а также показателей безопасности, рассчитываемых по результатам расчетного и имитационного моделирования, оценить уровень безопасности полетов в различных условиях выполнения полетов.

- Эксплуатационная и экономическая эффективность выполнения полетов ВС в проектируемой структуре воздушного пространства

В рамках процесса совершенствования структуры воздушного пространства основной задачей является обеспечение выполнения эффективных траекторий полета для пользователей воздушного пространства. Задача может рассматриваться с точки зрения оценки горизонтальной эффективности выполнения полетов, а также оценки вертикального профиля, в особенности, на этапах снижения и набора высоты. Исследования состоят в оценке топливной эффективности, задержек, протяженности маршрутов, времени полета.

- Влияние на окружающую среду при выполнении полетов в районе аэродрома

Одним из важных факторов, который должен учитываться при разработке/совершенствовании структуры воздушного пространства является учет шумовых воздействий при полетах по схемам маневрирования в терминальной зоне/районе аэродрома, а также выбросы вредных веществ. Задача состоит в оценке шумовых воздействий и выбросов вредных веществ в различных режимах работы ВПП.

Приведенные выше исследовательские задачи оценки структуры воздушного пространства в зависимости от области моделирования можно разделить на три типовые задачи:

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

На рисунке 4.5 представлена схема с учетом вложенности задач. Задача 1, например, включает моделирование полетов только в верхнем воздушном пространстве. Задача 2 заключается в моделировании диспетчерской зоны района аэродрома (терминальной зоны авиаузла), а также может включать моделирование верхнего воздушного пространства. Тогда как, задача 3 может включать в себя моделирование в верхнем воздушном пространстве, терминальной зоне авиаузла (диспетчерской зоне района аэродрома) и на поверхности аэродрома.

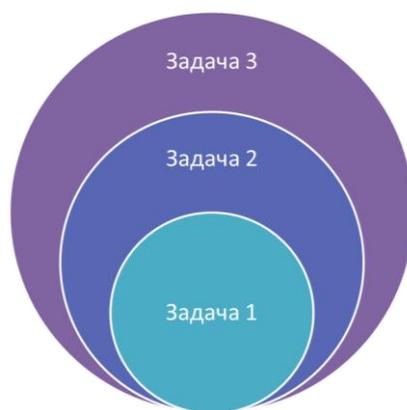


Рисунок 4.5. Вложенность задач

4.3. Оценка эффективности использования структуры воздушного пространства Московской зоны ЕС ОрВД

4.3.1. Исходные данные

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

Исходные данные по трем вариантам структуры воздушного пространства включали в себя:

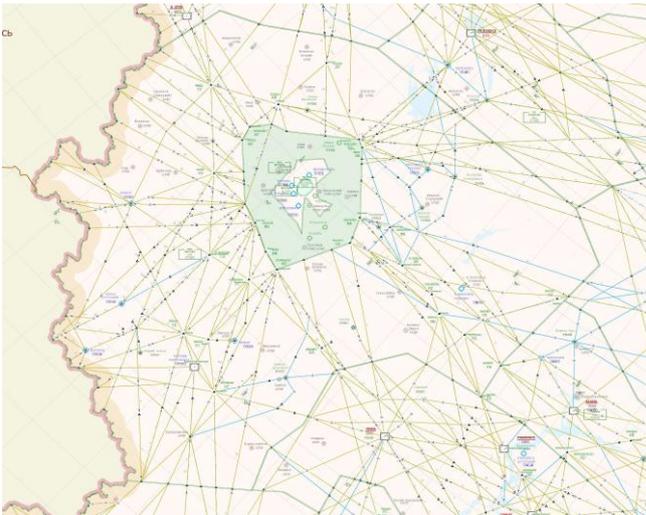
- каталог маршрутов Московской зоны ЕС ОрВД (\bar{s}_{BT});
- границы секторов Московской зоны ЕС ОрВД ($\bar{s}_{сек}$);
- маршруты схем вылета (SID) из аэропортов Шереметьево, Внуково и Домодедово (\bar{s}_{SID});
- маршруты схем прибытия (STAR) в аэропорты Шереметьево, Внуково и Домодедово (\bar{s}_{STAR});

- маршруты схем захода на посадку (Approach) в аэропорты Шереметьево, Внуково и Домодедово (\bar{s}_{app});

Для проведения имитационного моделирования были использованы также следующие данные:

- база данных с летно-техническими характеристиками ВС ($u_{лtxbc}$);
- данные по потокам воздушного движения ($u_{планы.полетов}$);
- границы зон ограничений полетов, запретных зон и постоянных зон ($\omega_{оивп}$);

На рисунке 4.6 представлены три варианта структуры воздушного пространства Московской зоны ЕС ОрВД. В левой части рисунка изображены границы секторов и маршрутов ОВД Московского районного центра. В правой части рисунка изображены границы секторов и маршруты SID, STAR, Approach для Московского узлового диспетчерского района.



Вариант 1 (действующая структура)

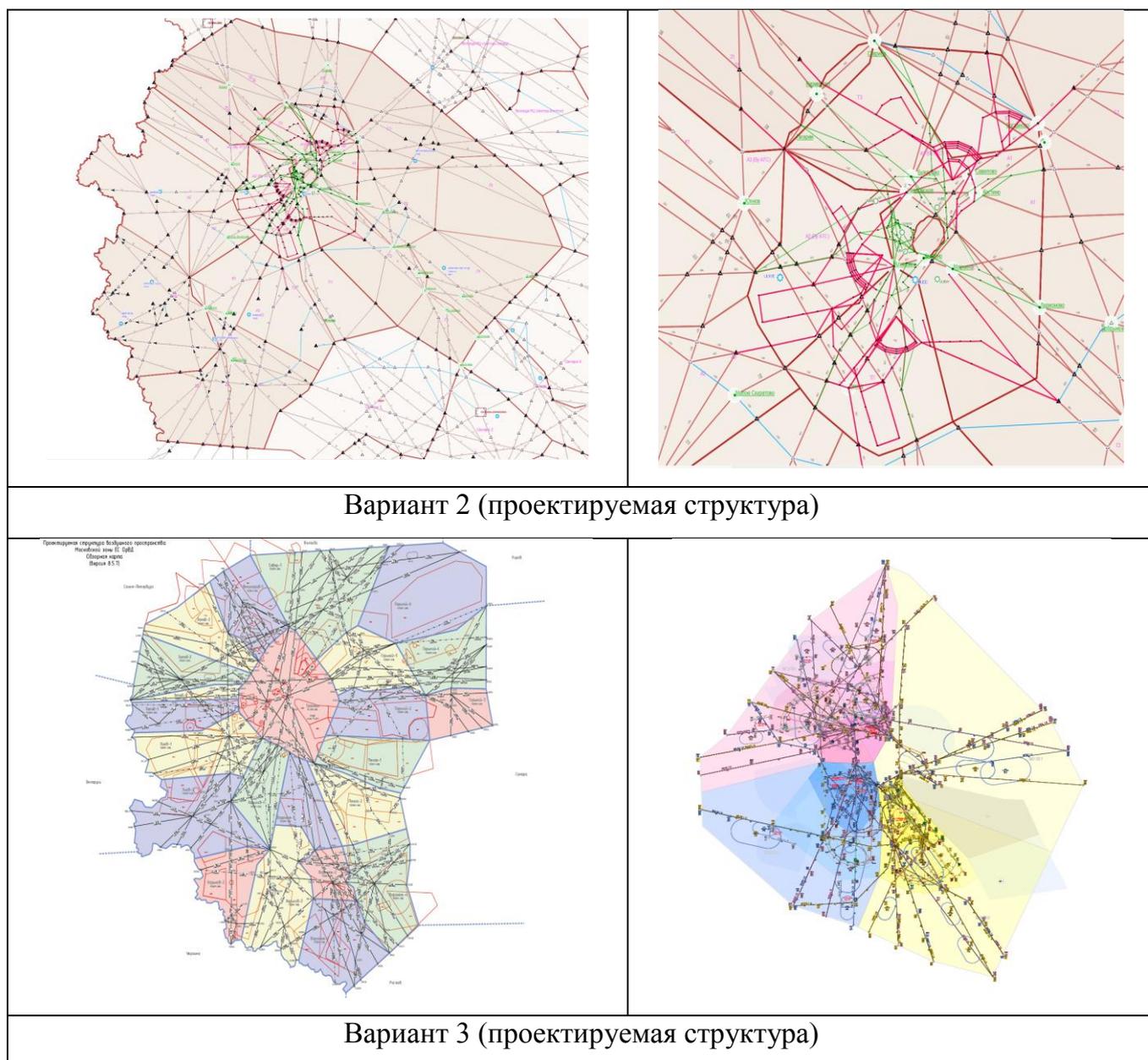


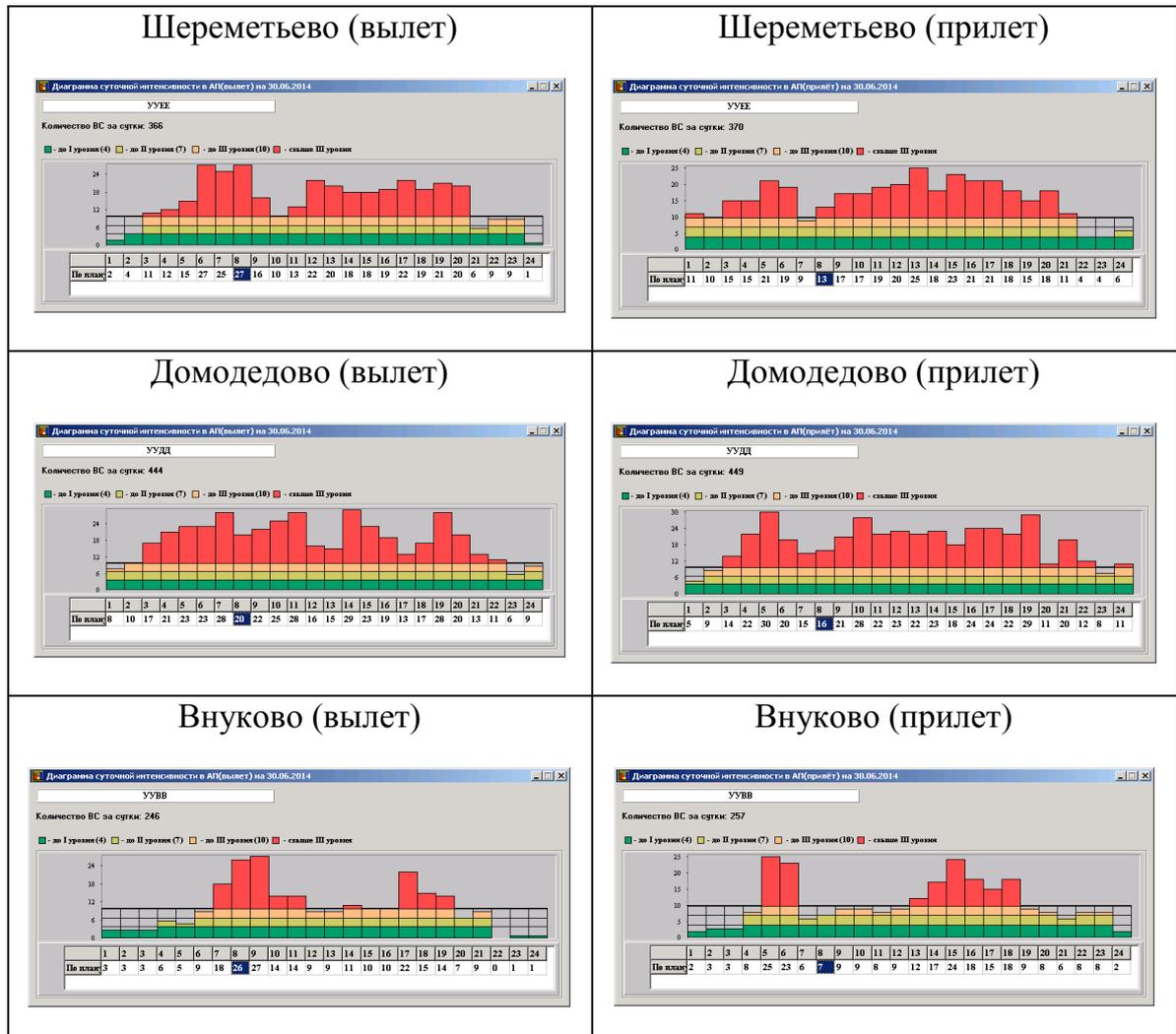
Рисунок 4.6. Варианты структуры ВП Московской зоны ЕС ОрВД

4.3.2. Анализ полётных данных

Одним из элементов сценария для имитационного моделирования является план полетов – поток воздушных судов. Для исследований был выбран фактический план полетов за 30 июня 2014 года, когда наблюдались увеличение интенсивности ВД в период отпусков и рост туристического пассажиропотока.

В таблице 4.1 представлено фактическое выполнение ВПО на аэродромы Шереметьево, Домодедово, Внуково на основе плановых данных 30 июня 2014 года.

Таблица 4.1. Количество ВПО в основных аэродромах МУДР



Основной пик для аэродрома Шереметьево на вылет приходится на утренние часы с 6 до 9 по UTC. На прилет наблюдается высокая интенсивность ВД в утренние (с 5 до 6) и дневные/вечерние часы (с 12 до 17) по UTC соответственно. В Домодедово ярко выражен утренний пик на прилет с 4 до 6 по UTC. Вылет на аэродроме Домодедово распределен более равномерно. Пиковые часы по вылетам наблюдаются с 4 до 7, с 10 до 11 в 14 и в 19 часу. На аэродроме Внуково количество вылетов имеет пиковые значения в утренние (с 7 до 9) и вечерние (с 17 до 19) часы. Пиковая интенсивность на прилет приходится также на утренние (с 5 до 6) и вечерние часы (с 14 до 18) по UTC.

На рисунке 4.7. представлена диаграмма с пиковым значением ВПО на трех основных аэродромах МУДР, где по оси ординат приведено направление потока ВС для аэропорта, при этом в случае, когда поток с высоким ВПО для одного аэропорта повторяется несколько раз в течение суток, то он имеет на диаграмме несколько соответствующих строк (например, ДМД вылет1 – ДМД вылет4).

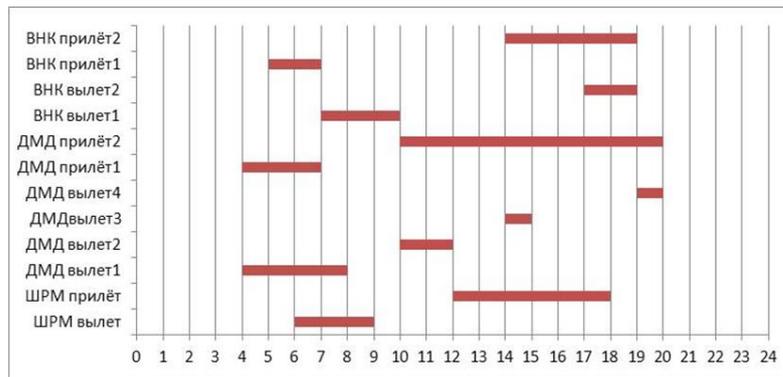


Рисунок 4.7. Диаграмма с пиковыми значениями количества ВПО в трех основных аэродромах МУДР

Как видно на рисунке 4.7, высокая нагрузка аэропортов распределена как по утренним и вечерним, так и по дневным часам. Таким образом, целесообразно для проведения исследований использовать весь суточный план с 0 до 24 часов по UTC.

На рисунке 4.8 изображена диаграмма с процентным соотношением рейсов по направлениям в Московской зоне ЕС ОрВД.

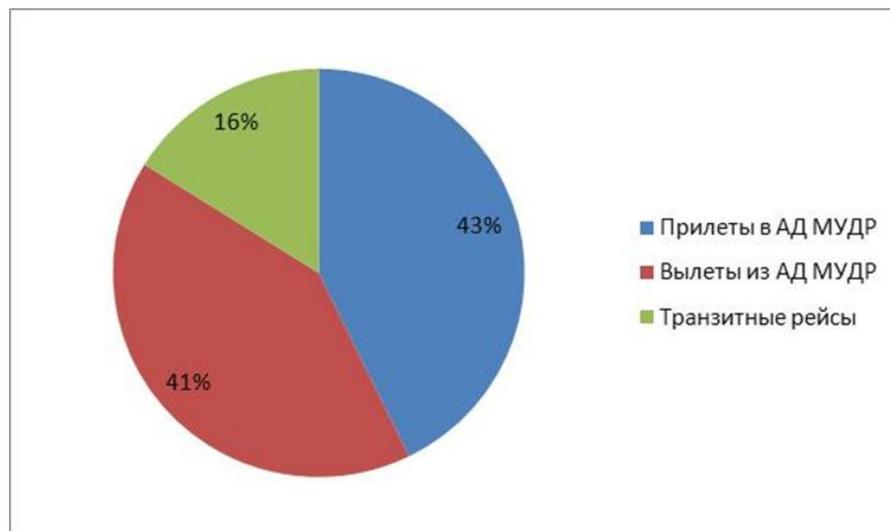


Рисунок 4.8. Процентное соотношение рейсов в Московской зоне ЕС ОрВД

Основная доля рейсов приходится на прилет и вылет из аэродромов МУДР (Шереметьево, Внуково, Домодедово) – 84%. Для исследований будет целесообразно использовать весь суточный план, включая транзитные рейсы, рейсы с вылетом и прилетом в аэродромы Шереметьево, Внуково, Домодедово.

4.3.3. Показатели эффективности для оценки структуры ВП

Оценка исследуемых структур ВП выполнялась по группам показателей:

- Безопасность (W_{σ});
- Эффективность для пользователей ВП (W_a);
- Пропускная способность ($W_{ПВП}$);
- Пропускная способность аэродрома ($W_{ПА}$);
- Эффективность для системы ОрВД ($W_{ОрВД}$);
- Влияние на окружающую среду (W_{cp}).

В таблице 4.2. представлен список показателей и результатов моделирования, на основе которых рассчитывались показатели.

Таблица 4.2. Список используемых показателей

№	Группа показателей	Показатели	Результаты моделирования для расчёта показателей
1.	Безопасность (W_{σ})	Количество ПКС ($W_{ПКС}$)	Количество ПКС в час
			Количество ПКС за интервал моделирования
			Количество ПКС по секторам АДЦ, РДЦ
2.	Эффективность для пользователей ВП (W_a)	Протяженность маршрута ($W_{\text{протяж.марш}}$), км	Протяженность маршрута каждого рейса в пределах Московской зоны ЕС ОрВД
			Задержки ($W_{\text{а.зад}}$), мин
		Средняя задержка на рейс прилетающих ВС на аэродром Шереметьево	
		Средняя задержка на рейс вылетающих ВС с аэродрома Домодедово	
		Средняя задержка на рейс прилетающих ВС на аэродром Домодедово	
		Средняя задержка на рейс вылетающих ВС с аэродрома Внуково	
		Средняя задержка на рейс прилетающих ВС на аэродром Внуково	
		Расход топлива ($W_{\text{а.топл.эф}}$), кг/рейс	Расход топлива вылетающего ВС с аэродромов МУДР в пределах Московской зоны ЕС ОрВД
Расход топлива прилетающих ВС на			

№	Группа показателей	Показатели	Результаты моделирования для расчёта показателей
			аэродромы МУДР в пределах Московской зоны ЕС ОрВД Расход топлива транзитных ВС через Московскую зону ЕС ОрВД Налет (продолжительность полета) ($W_{\text{а.налет}}$), мин/рейс Время полёта вылетающих с аэродромов МУДР ВС в пределах Московской зоны ЕС ОрВД Время полёта прилетающих на аэродромы МУДР ВС в пределах Московской зоны ЕС ОрВД Время полета транзитных ВС через Московскую зону ЕС ОрВД
3.	Эффективность для системы ОрВД ($W_{\text{ОрВД}}$)	Неравномерность загрузки участков ВТ ($W_{\text{загр.уч.ВТ}}$), ВС/час Неравномерность загрузки точек ВП ($W_{\text{загр.точек.ВП}}$), ВС/час Использование зон ожидания ($W_{\text{исп.ЗО}}$)	Суммарная интенсивность ВД на участках ВТ в час Суммарная интенсивность ВД на участках ВТ за интервал моделирования Максимальная часовая ИВД на участках маршрутов ОВД Средняя часовая ИВД на участках маршрутов ОВД Суммарная интенсивность ВД в точках ВП в час Суммарная интенсивность ВД в точках ВП за интервал моделирования Максимальная часовая ИВД в точках ВП Средняя часовая ИВД в точках ВП Среднее количество кругов в зоне на одно ВС Максимальное время в зоне ожидания Максимальное число ВС одновременно в зоне ожидания Максимальное количество кругов в зоне ожидания
4.	Пропускная способность ВП ($W_{\text{ПВП}}$)	Загрузка секторов без превышения НПС сектора ($W_{\text{сек}}$), сектор-час/рейс Равномерность временной загрузки диспетчера	Количество часов с превышениями норматива пропускной способности за сутки Часовые значения превышений нормативов пропускной способности секторов Часовая интенсивность ВД в секторах ОВД Значение норматива пропускной способности для секторов ОВД Время, затрачиваемое на операции по контролю и управлению ВД в течение часа

№	Группа показателей	Показатели	Результаты моделирования для расчёта показателей
		$(W_{\text{врем.загр.дисп}})$	
5.	Пропускная способность аэродрома ($W_{\text{ПА}}$)	Количество ВПО ($W_{\text{ВПО}}$), ВПО/час	Количество ВПО в Шереметьево в час
			Количество ВПО во Внуково в час
			Количество ВПО в Домодедово в час
6.	Влияние на окружающую среду ($W_{\text{ср}}$)	Выбросы вредных веществ (W_{CO_2}), тыс. кг/рейс	Расход топлива ВС в пределах Московской зоны ЕС ОрВД

4.3.4. Имитационное моделирование

Для каждого варианта структуры воздушного пространства были разработаны сценарии моделирования, которые включали: потоки воздушного движения, параметры и настройки моделирования. Исследовательский поток ВС был получен путем увеличения интенсивности воздушного движения в базовом потоке ВД с использованием модели формирования случайных потоков ВД с сохранением структуры потока. Коэффициент увеличения выбирался исходя из предварительной оценки пропускной способности исследуемых аэродромов.

При имитационном моделировании использовались следующие модели: модель прогнозирования 4D траекторий полета, модель полёта ВС, обнаружение потенциальных конфликтных ситуаций и модель формирования бесконфликтной очереди прибывающих и вылетающих ВС. Формирование очереди основано на имитации действий диспетчера по разрешению потенциальных конфликтных ситуаций и созданию безопасных интервалом между ВС как в горизонтальной, так и вертикальной плоскости. Для этого была проведена настройка модели, которая заключалась в следующем: были отмечены места в структуре воздушного пространства, где имитационная модель могла применять меры регулирования в целях обеспечения безопасных интервалов. Применялись такие меры регулирования, как: зона ожидания, задержка скоростью, спрямления, PMS, «тромбон». На рисунке 4.9 представлена визуализация процесса моделирования одного из исследуемых вариантов структуры

воздушного пространства. Желтым цветом отмечены траектории воздушных судов после применения мер регулирования.

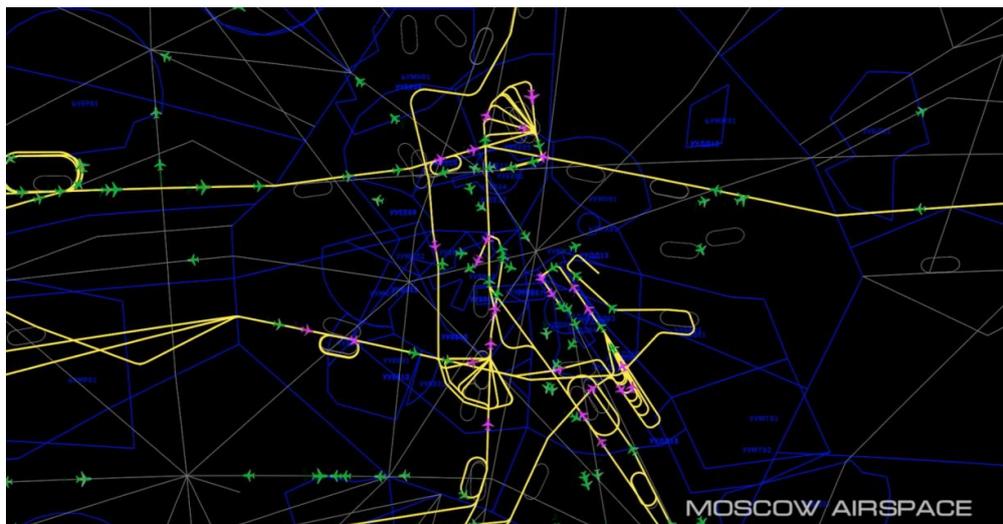


Рисунок 4.9. Визуализация процесса моделирования

На рисунке 4.10 представлен пример применения регулирования с использованием PMS. Желтым цветом изображены траектории ВС, выполняющих заход на посадку на аэродрома Шереметьево.

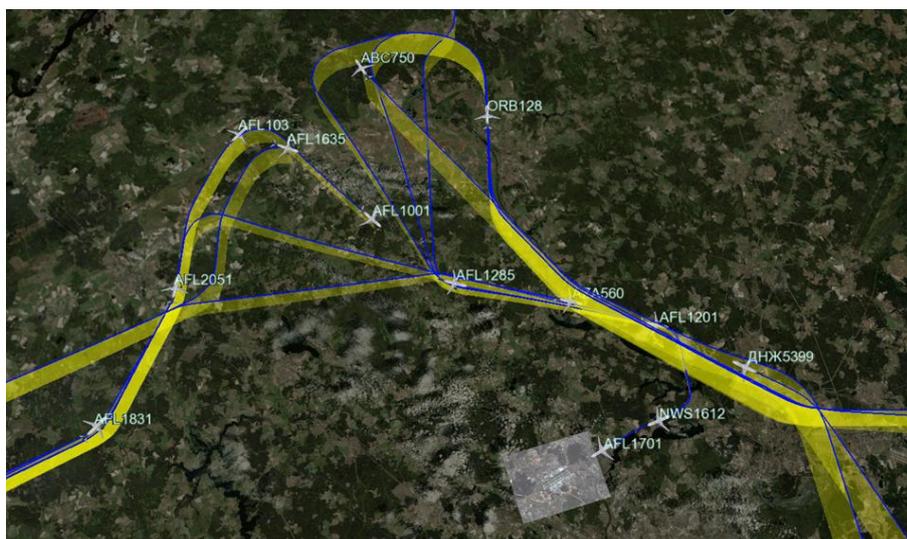


Рисунок 4.10. Применение PMS

На рисунке 4.11 продемонстрировано функционирование модели обнаружение потенциальной конфликтной ситуации между двумя ВС. Красные кружки на рисунке * а) обозначают метки ВС, зеленым цветом отображаются формуляры с информацией о рейса. На рисунке * б). 3D визуализаций потенциальной конфликтной ситуаций.

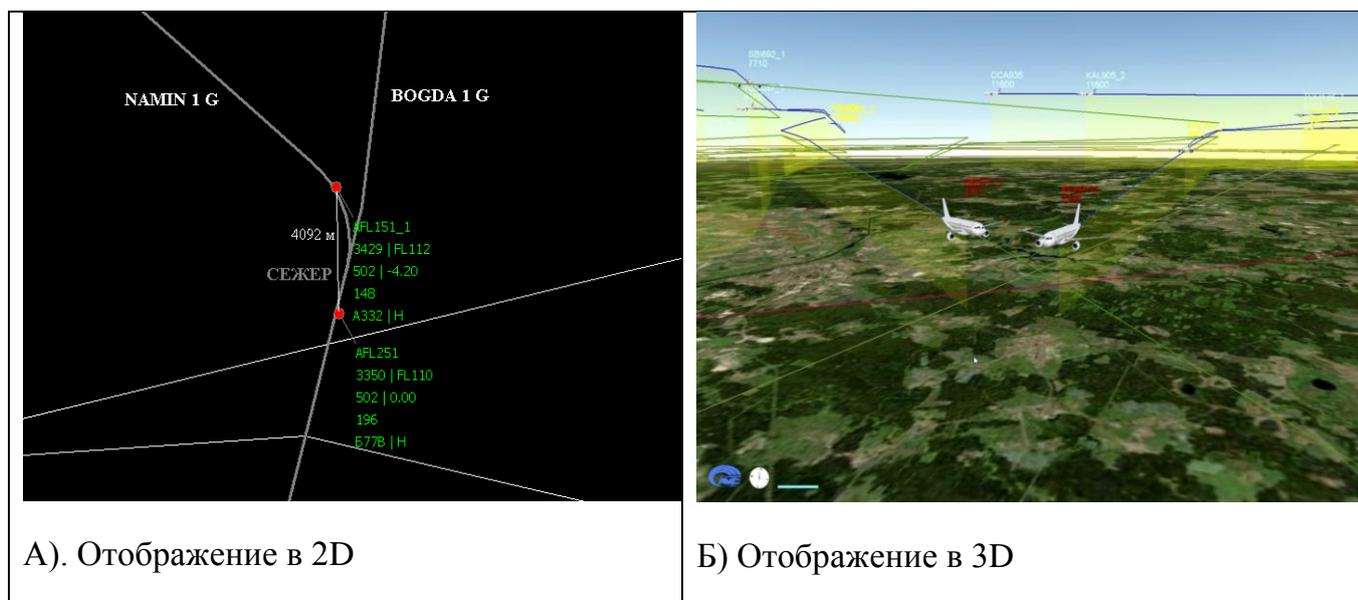


Рисунок 4.11. Визуализация потенциальной конфликтной ситуации

На рисунке 4.12 представлена тепловая карта по результатам моделирования одного из исследуемых вариантов Московской зоны ЕС ОрВД.

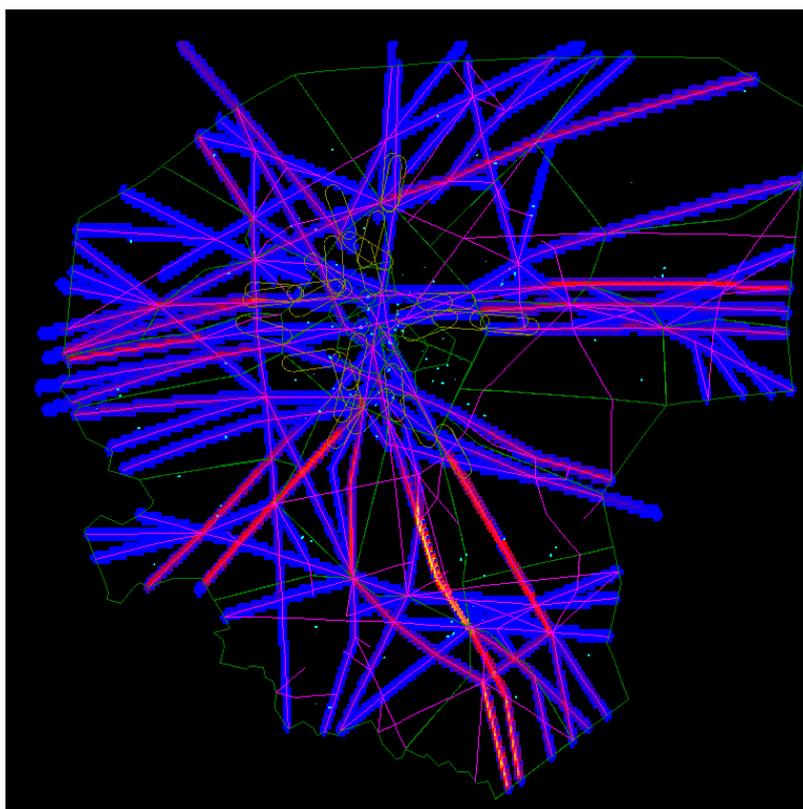


Рисунок 4.12. Тепловая карта

Тепловая карта демонстрирует интенсивность использования элементов структуры ВП. Интенсивность возрастает от синего к желтому цвету.

4.3.5. Результаты моделирования

Для каждого из трех вариантов структуры ВП были получены результаты моделирования по показателям, описанным в п.4.3.3. В разделе представлена часть полученных результатов, которые были использованы для расчёта показателей эффективности, определенных в п.2.1, и выбора рационального варианта структуры ВП.

На рисунках 4.13-4.15 представлены результаты расчета задержек и интенсивности ВД на основных аэродромах МУДР в Варианте 2 с использованием имитационного моделирования.



Рисунок 4.13. Интенсивность ВД и задержки на аэродроме Шереметьево

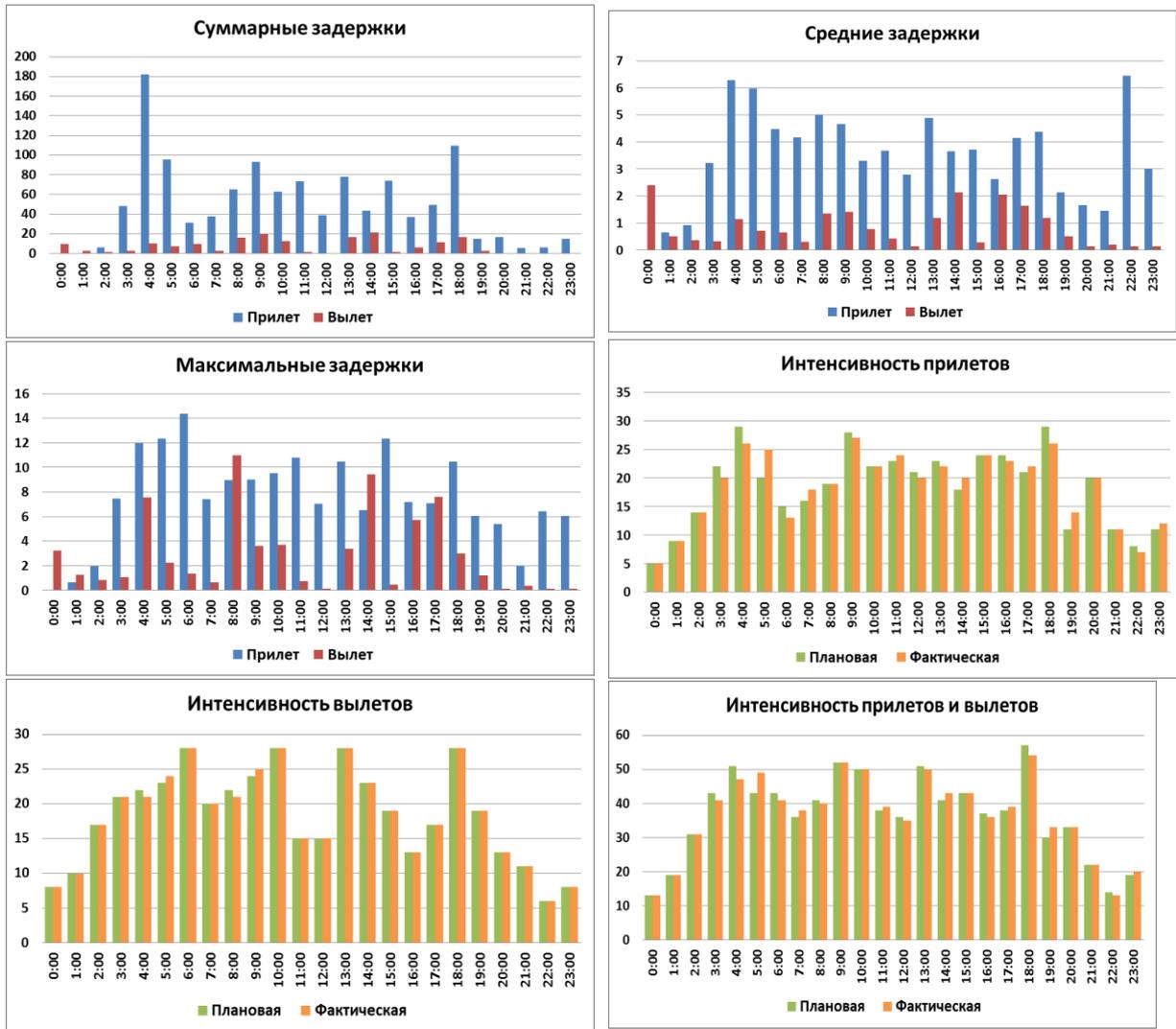
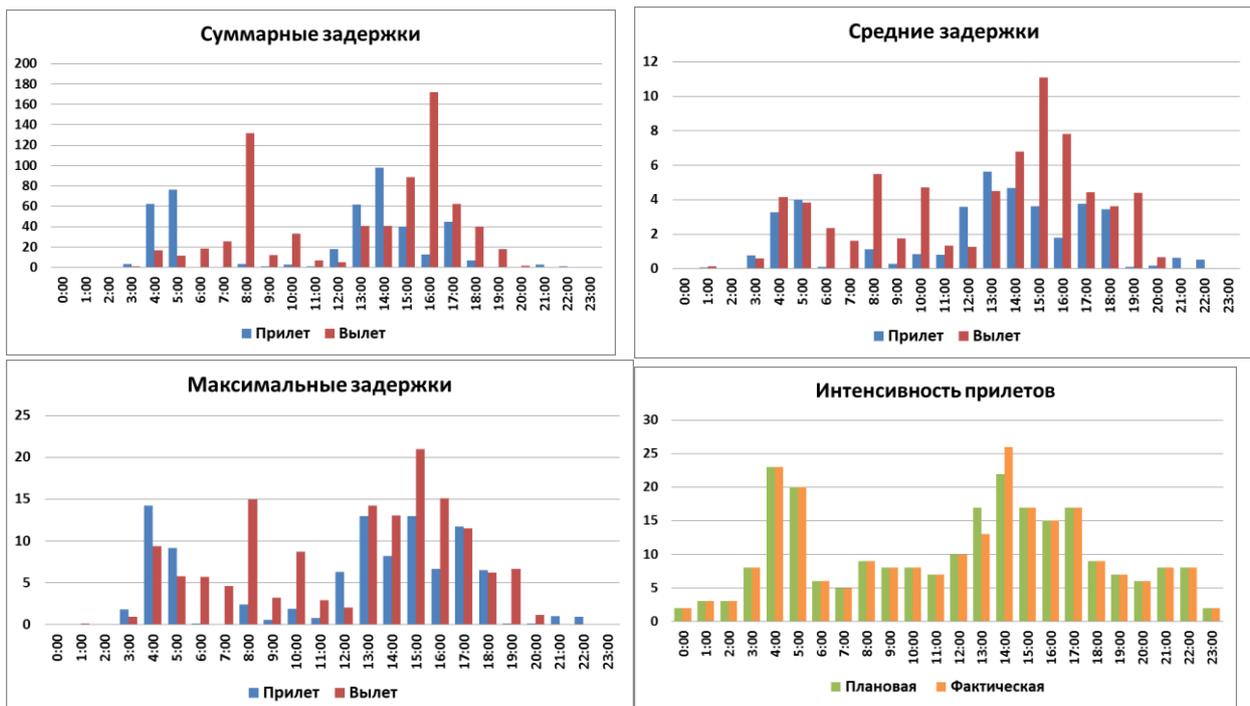


Рисунок 4.14. Интенсивность ВД и задержки на аэродроме Домодедово



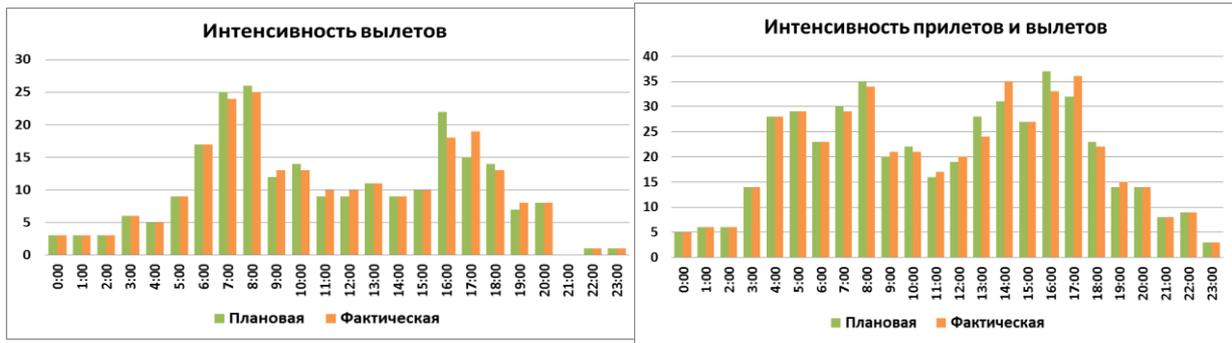


Рисунок 4.15. Интенсивность ВД и задержки на аэродроме Внуково

Синим цветом отображены задержки прилетных рейсов в час, красным цветом задержки вылетных рейсов в час. Зеленым цветом отображена плановая ИВД в час, оранжевым цветом фактическая ИВД в час.

На рисунках 4.16 представлены гистограммы временной загруженности диспетчера для самых загруженных секторов РДЦ (4.16 а) и АДЦ (4.16 б) с распределением временных затрат диспетчера по операциям.

При анализе секторов РДЦ и АДЦ можно отметить, что основную долю времени занимают операции по приему/передаче ВС, а также на сопровождающие их пультные операции. Кроме того, диспетчеры наиболее загруженных секторов тратят значительное время на разрешение ПКС и назначение STAR. В секторе ВНК Вылет превышение уровня допустимого значения временной загруженности диспетчера возникает ввиду высокой интенсивности, которая, в свою очередь, возникает из-за наличия в секторе маршрутов вылета из трех основных аэродромов МАУ.

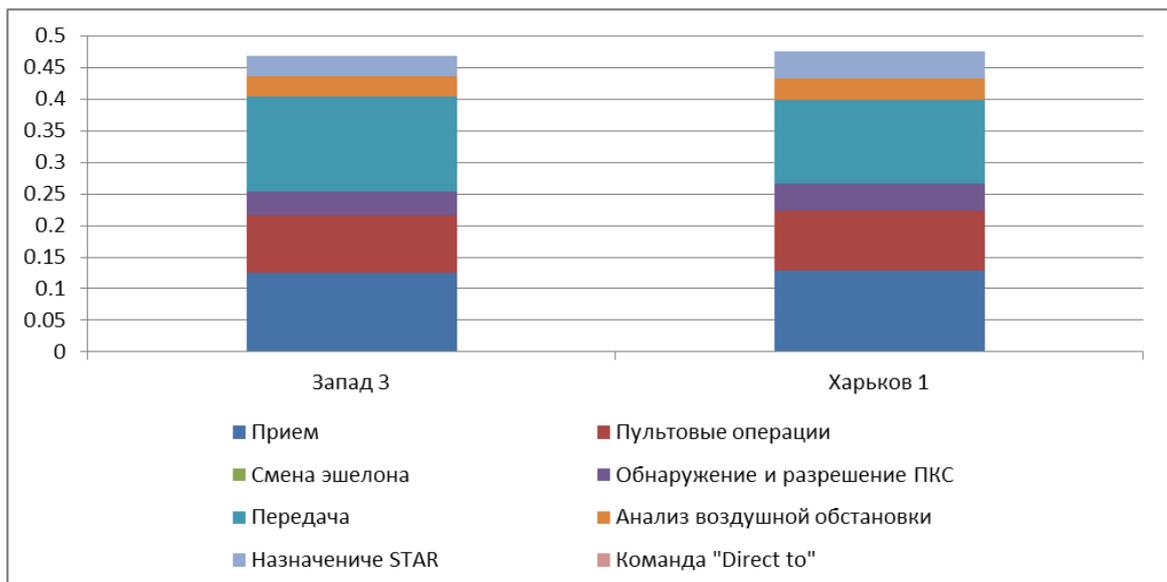


Рисунок 4.16 а. Временные затраты диспетчера в загруженных секторах РДЦ

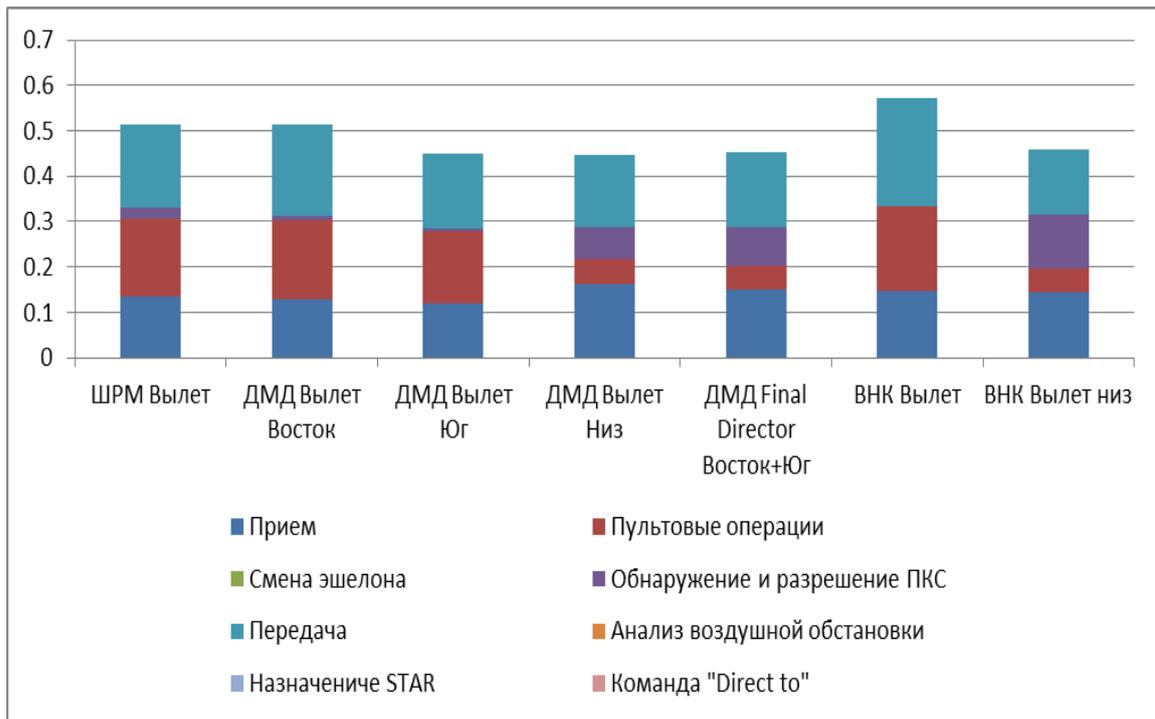
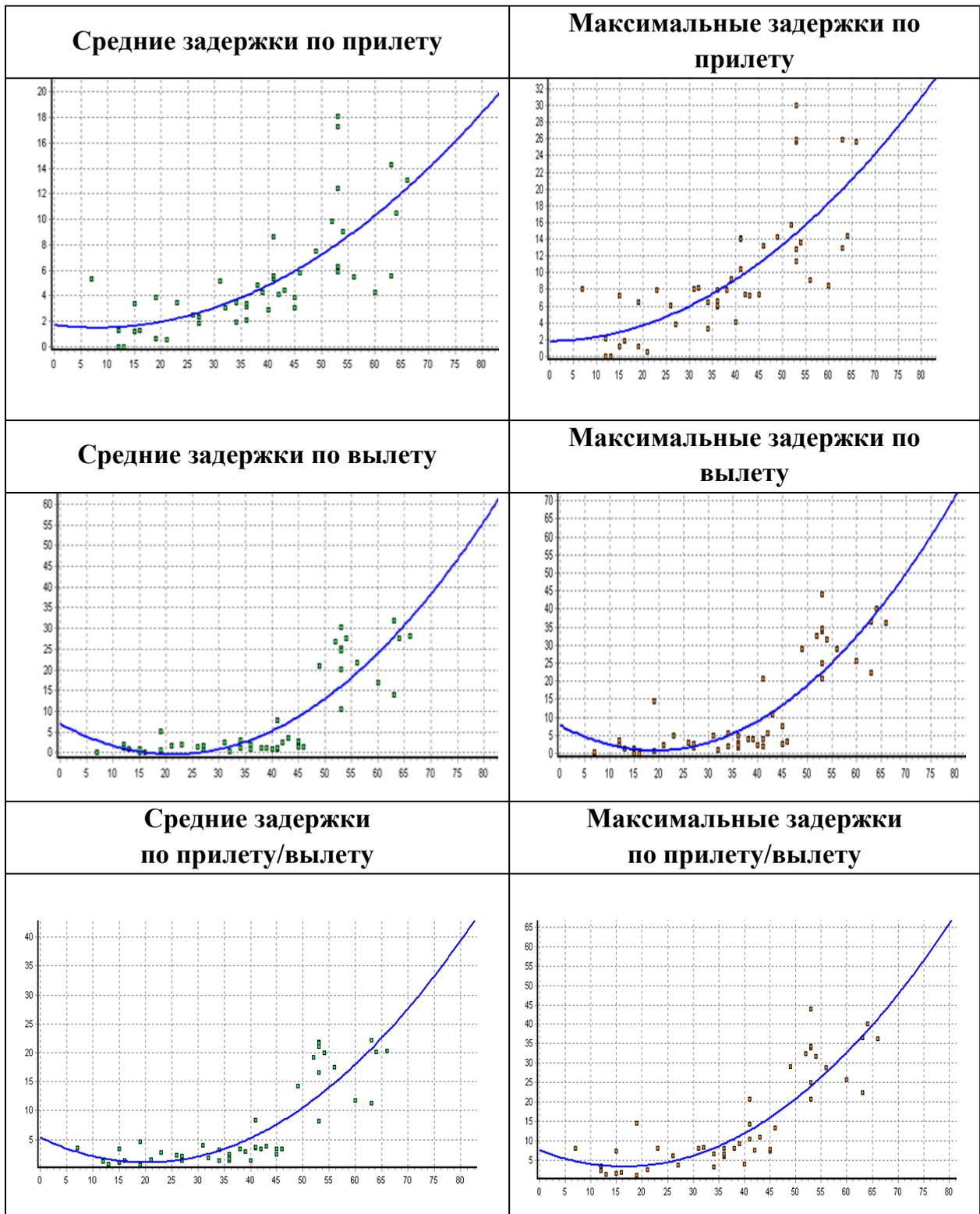


Рисунок 4.16 б. Временные затраты диспетчера в загруженных секторах АДЦ

Для каждого исследуемого варианта структуры ВП и аэродрома было рассчитано количество ВПО/час при различных уровнях максимальных и средних задержек на вылете и прилете соответственно. Полученные в ходе моделирования часовые реализации значения фактической ИВД и средней часовой задержки обрабатываются для оценки пропускной способности аэропорта. Значения часовой плановой интенсивности каждого потока ВД и задержка, соответствующая этому часу, определяются и сохраняются как отдельные реализации для последующей статистической обработки. На рисунке 4.17 представлены значения часовой ИВД и задержки по всем промоделированным реализациям. Каждая точка на плоскости, отображенная зеленым цветом, обозначает плановое количество взлетно-посадочных операций в час. По оси абсцисс указаны значения плановой часовой ИВД суммарно по прилету и вылету (ВС/час), по оси ординат – значения показателя средней задержки (мин). Синей линией – график МО средних задержек в зависимости от ИВД. График (полином) сформирован на основе статистических данных методом МНК. После построения полинома рассчитывается дисперсия, далее по результатам ее анализа удаляются выбросы значений реализации ИВД-средней задержки.



4.17. Зависимость задержек от количества ВПО для аэродрома Шереметьево

В основе показателей пропускной способности воздушного пространства являются результаты расчёта интенсивности (количество входов в час) воздушного движения в секторе диспетчерского управления. На рисунке 4.18 представлена диаграмма максимальной часовой ИВД в секторах РДЦ.

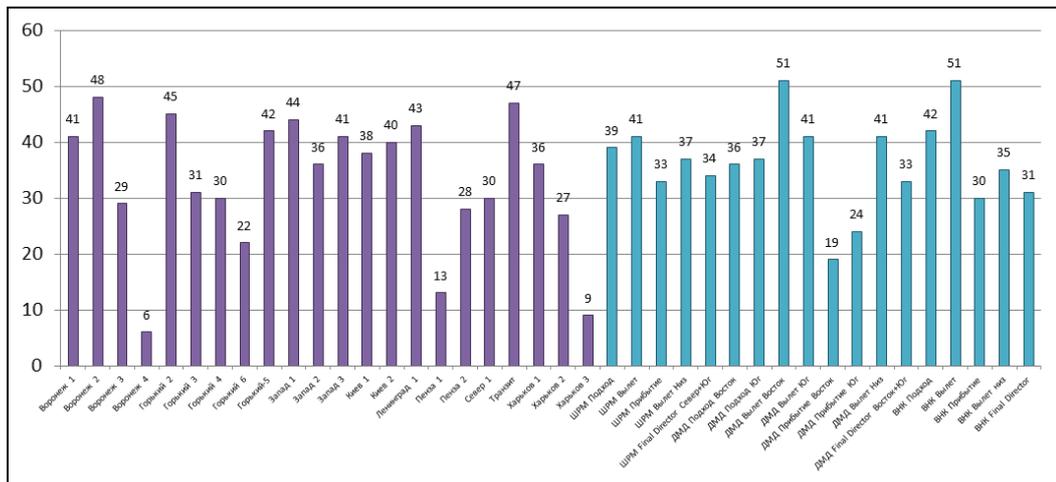


Рисунок 4.18 Максимальная ИВД в секторах РДЦ

Аналогично интенсивность ВД рассчитывается и в секторах АДЦ (рисунок 4.20).

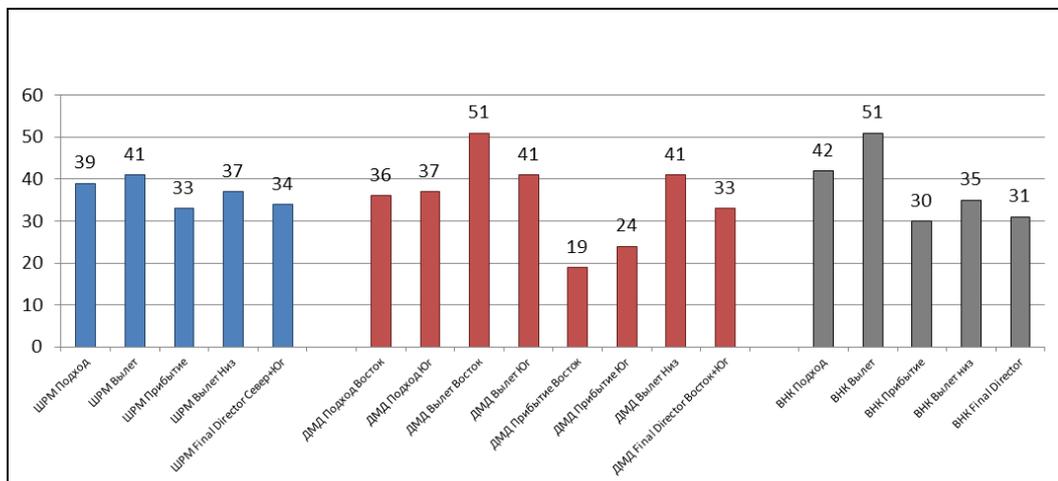


Рисунок 4.19. Максимальная ИВД в секторах АДЦ

4.3.6. Выводы по результатам моделирования

На основе полученных результатов моделирования были рассчитаны показатели эффективности, математические модели которых представлены во второй главе. Значения показателей отображены в таблице 4.3.

На рисунке 4.20 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, $x_{\min j} = 0$, $x_{\max j} = \sum_{i=1}^3 x_{ij}$. Для удобства представления результатов оценки, из-за того, что по ряду показателей минимизировались значения, а по другим, наоборот, максимизировались, те значения, которые обращались в минимум, были преобразованы по следующей формуле: $W_j^* = 1 - W_j$.

Таблица 4.3. Значения рассчитанных показателей

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

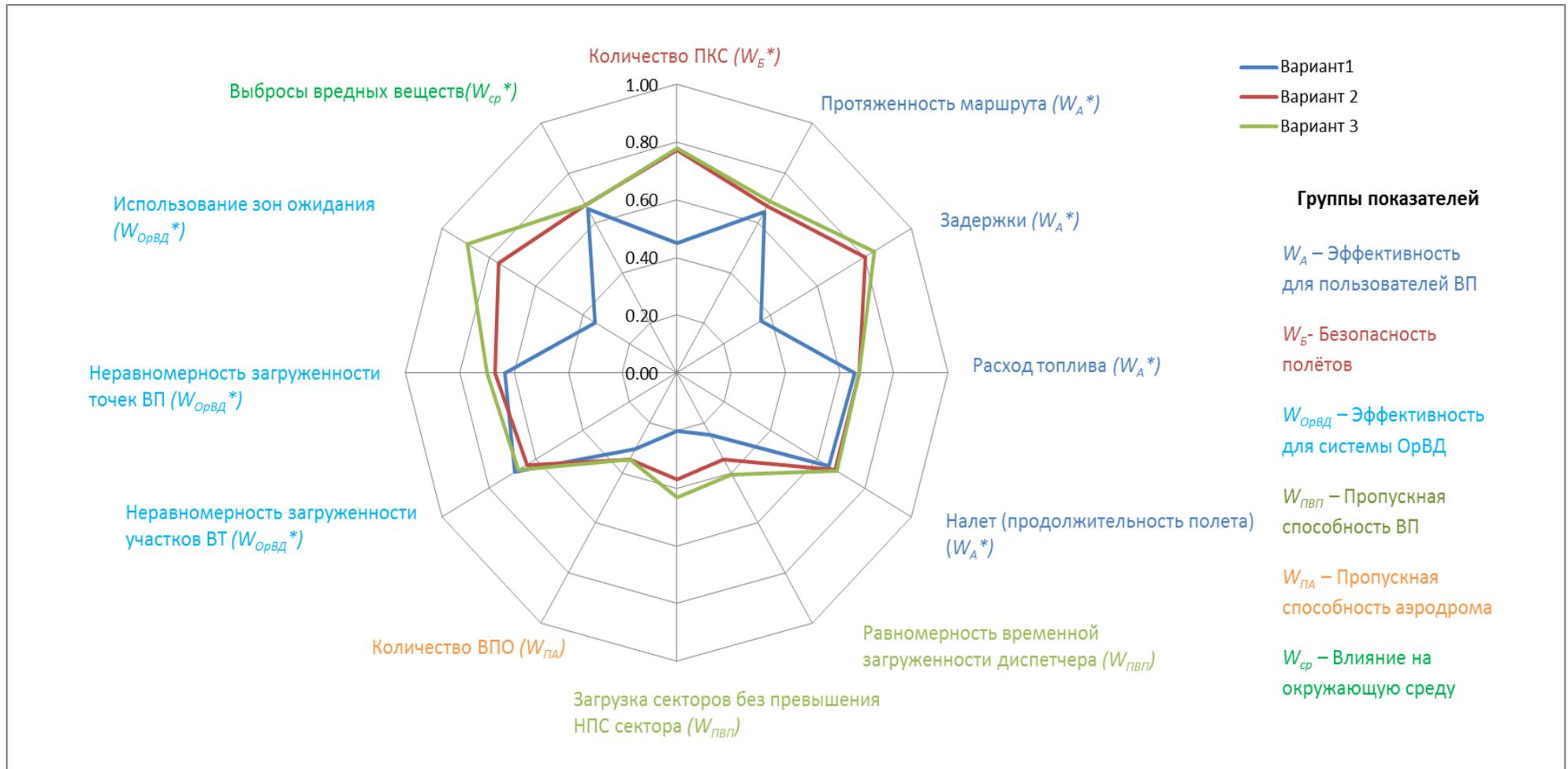


Рисунок 4.20. Графическое представление результатов расчета показателей по трем вариантам структуры ВП и инфраструктуры аэродрома

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 следующие рекомендации по оптимизации выбранного варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома:

- Для повышения эффективности для пользователей ВП рекомендуется предусмотреть вариант ограничений на маршрутах SID в условиях низкой интенсивности воздушного движения, который позволит выполнять более эффективный набор высоты.
- Для эффективности организации взаимодействия диспетчеров при формировании очереди ВС на посадку требуется разработка новых технологий, которые смогут обеспечить эффективность и в то же время безопасность выполнения прилетов на аэродром. Одной из технологий, которая помогает диспетчеру формировать очередь на прилет, является общепризнанная в авиационном сообществе и зарекомендовавшая себя в мире технология поддержки диспетчера Arrival Manager (AMAN). AMAN помогает диспетчеру формировать бесконфликтные потоки ВД и выстраивать очередь ВС на посадку как на один аэродром, так и на аэроузел. Внедрение AMAN позволит повысить пропускную способность воздушного пространства при сохранении требуемого уровня безопасности выполнения полетов.
- Для снижения загруженности диспетчера и повышения уровня безопасности полётов предусмотреть эшелонирование в точках пересечения маршрутов SID/STAR.

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 воздушного пространства 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, включая:
 - формирование случайных потоков воздушного движения;
 - формирование бесконфликтной очереди прибывающих и вылетающих воздушных судов;
 - обнаружение потенциальных конфликтных ситуаций;
 - построение маршрута движения ВС по поверхности аэродрома;
 - расстановку ВС по местам стоянок.
3. Разработана система показателей эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, позволяющая всесторонне и объективно провести соответствующую оценку эффективности, а также разработаны математические модели для их расчета.
4. Разработан метод выбор рационального варианта структуры воздушного пространства 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 организации воздушного движения по оценке эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома.
8. Проведены исследования по оценке и выбору одного из трех альтернативных вариантов структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома с использованием разработанных методов, математических моделей и комплекса имитационного моделирования системы организации воздушного движения.

Полученные в работе результаты, включая разработанные математические модели и алгоритмы системы ОрВД, расчета показателей эффективности, комплекс имитационного моделирования, методика проведения исследований и метод выбора рационального варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, делают возможным сделать вывод о том, что поставленные задачи решены и цель исследований достигнута.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анодина Т.Г., Кузнецов А.А., Маркович Е.Д. Автоматизация управления воздушным движением. М.: Транспорт, 1992.
2. Федеральные авиационные правила «Организация воздушного движения в Российской Федерации», Приказ Минтранса России от 25.11.2011 №293.
3. Глобальный аэронавигационный план (ГАНП, Doc 9750), ИКАО. Монреаль, 2019.
4. Федеральный закон от 19 марта 1997 года №60-ФЗ «Воздушный кодекс Российской Федерации (ред. от 14.03.2022).
5. Руководство по глобальным характеристикам аэронавигационной системы (Doc 9883).ИКАО, Монреаль, Издание первое. 2009.
6. Федеральная целевая программа «Модернизация Единой системы организации воздушного движения Российской Федерации (2009-2020 годы)»: утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 1 сентября 2008 г. №652.
7. Руководство по использованию навигации, основанной на характеристиках (PBN), при построении воздушного пространства (Doc 9992), ИКАО, Монреаль, Издание первое, 2013.
8. Дегтярев О.В., Зубкова И.Ф. Методы и особенности математического моделирования систем организации воздушного движения. «Известия РАН. Теория и системы управления», № 4, 2012.
9. Дегтярев О.В., Зубкова И.Ф. Ускоренное моделирование процессов организации потоков и управления воздушным движением. Аналитический обзор. - НИЦ ГосНИИАС, М., 2008.
10. Дегтярев О.В., Зубкова И.Ф. «Применение имитационного моделирования в качестве средства интеллектуальной поддержки принятия решений в задачах организации и управления воздушным движением» - Труды 8-й международной НТК «Интеллектуальные системы», Нижний Новгород, 2008.
11. Gamification solutions for software acceptance: A comparative study of Requirements Engineering and Organizational Behavior techniques”, Luca Piras; Elda Paja; Paolo Giorgini; John Mylopoulos; Roberta Cuel; Diego Ponte. 11th International Conference on Research Challenges in Information Science (RCIS), 2017.

12. Marcos, R., Toribio, D., Alsina, N., Garrigó, L., Andrienko, N., Andrienko, G., Piovano, L., Blondiau, T., and Herranz, R., (2016) “Visual Analytics and Machine Learning for ATM Performance Modelling: Preliminary Findings of the INTUIT Project and Prospects for Future Research“, in D. Schaefer (Ed.) Proceedings of the SESAR Innovation Days 2016, EUROCONTROL.
13. Andrienko, G., Andrienko, N., Chen, W., Maciejewski, R., and Zhao Y., (2017) “Visual Analytics of Mobility and Transportation: State of the Art and Further Research Directions”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 18(8), pp.2232-2249.
14. User-centric Cost-based Flight Efficiency and Equity Indicators”, Javier López-Leonés, Manuel Molaina, Pablo Sánchez-Escalonilla, Damián Ferrer, Marcos Sanz, Fernando Celorrio, Ángel Martínez, SESAR Innovation Days 2017 (SIDs 2017).
15. AURORA: Advanced User-Centric Efficiency Metrics for Air Traffic Performance Analytics”, Shen Wang, Aditya Grover, Javier López, Fernando Celorrio, Philippe Plantholt, Brian Mac Namee, The European conference on machine learning & principles and practice of knowledge discovery in databases (ecml pkdd).
16. Assessment of safety performance indicators of future air traffic management system”, F. Netjasov and D. Crnogorac, Proceedings of the 44th Symposium on operational research (SYM-OP-IS), 2017, Page(s) 734 - 739, ISBN 978-86-7488-135-4.
17. Assessing ATM Performance with Simulation and Optimisation Tools: The APACHE Project”, X. Prats, C. Barrado, A. Vidosavljevic, D. Delahaye, F. Netjasov and D. Crnogorac, Proceedings of the 7th SESAR Innovation days., 2017, SESAR.
18. A Fast and Flexible Aircraft Trajectory Predictor and Optimiser for ATM Research Applications”, Dalmau, R., Melgosa, M., Vilardaga, S. and Prats, X, Proceedings of the 8th International Conference on Research on Air Transportation (ICRAT)., 2018, Eurocontrol/FAA.
19. Potential Safety Occurrences as Indicators of Air Traffic Management Safety Performances: A network based simulation model”, Netjasov, F. and Crnogorac, D., Proceedings of the 8th International Conference on Research on Air Transportation (ICRAT), 2018, Eurocontrol/FAA.
20. Visual Analytics and Machine Learning for Air Traffic Management Performance Modelling”, R. Marcos, D. Toribio, Nommon, L. Garrigó, N. Alsina, ALG, G.

- Andrienko, N. Andrienko, Fraunhofer, L. Piovano, R. Herranz, SESAR Innovation days, 2016.
21. Trajectory Uncertainty and the Impact on Sector Complexity and Workload”, David Knorr, Leif Walter, SESAR Innovation Days 2011.
 22. Agent-Based Modelling and Simulation of Trajectory Based Operations under Very High Traffic Demand”, Henk A.P. Blom, G.J. (Bert) Bakker, SESAR Innovation Days, 2016.
 23. Advanced aircraft performance modeling for ATM: enhancements to the BADA model”, Angela Nuic, Chantal Poinot, Mihai-George Iagaru, Eduardo Gallo, Francisco A. Navarro, Carlos Querejeta, 4th Digital Avionics System Conference, 2005.
 24. Spatial, Temporal, and Grouping Behaviors in Controller Communication Activities”, Yanjun Wang, Minghua Hu, Patrick Bellot, Frizo Vormer, Vu Duong, Ninth USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, 2011.
 25. An Agent Based Model of Air Traffic Management”, C. Bongiorno, G. Gurtner, F. Lillo, L. Valori, M.Ducci, B. Monechi and S. Pozzi, SESAR Innovation Days, 2013.
 26. Modeling the Air Traffic Controller’s Direct-to Operation Using Logistic Regression”, Sungkweon Hong, Soyeon Jung, Keumjin Lee, 15th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2015.
 27. Point Merge Integration of Arrival Flows Enabling Extensive RNAV Application and Continuous Descent”, EUROCONTROL EXPERIMENTAL CENTRE, 2010.
 28. Runway Pressure Research”, W. Vermeersch, P.C. Roling, D. Mijatovic, SESAR Innovation Days 2016.
 29. Probabilistic Runway and Capacity Forecasting using Machine Learning to Support Decision Making”, A. de Leege, C. Janssen, SESAR Innovation Days 2016.
 30. Robust Runway Scheduling Using a Time-indexed Model”, Andreas Heidt, Hartmut Helmke, Frauke Liers, SESAR Innovation Days 2014
 31. Probabilistic 2-Day Forecast of Runway Use”, Henk Hesselink, Joyce Nibourg, Ninth USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar, 2011.
 32. Taxi routing for aircraft: Creation and Controlling Ground movements with time constraints” Ingrid Gerdes, Annette Temme, SESAR Innovation Days 2016.
 33. Integrated Optimization of Terminal Maneuvering Area and Airport” Ji Ma, Daniel Delahaye, Mohammed Sbihi, Marcel Mongeau, SESAR Innovation days, 2016.

34. Safety Criticality Analysis of Air Traffic Management Systems: A Compositional Bisimulation Approach, Elena De Santis, Maria Domenica Di Benedetto, Davide Pezzuti, Giordano Pola and Luca Scarciolla, Italy, SESAR Innovation Days 2013.
35. A system model of ATM safety: the integrated risk picture, Eric Perrin, Barry Kirwan, Eurocontrol, France, Ron Stroup, FAA, USA.
36. Towards the characterization of sequencing arrivals, Raphael Christien, Eric Hoffman, Aymeric Trzmiel, Karim Zeghal, Eurocontrol, Twelfth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2017).
37. Reducing Departure Delays at LaGuardia Airport with Departure-Sensitive Arrival Spacing (DSAS) Operations, Paul U. Lee, Nancy M. Smith, NASA, Eleven USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2015).
38. Optimizing Integrated Arrival, Departure and Surface Operations Under Uncertainty, Christabelle Bosson, Min Xue, Shannon Zelinski, Eleven USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2015).
39. The Effects of the Introduction of Free Route (HUFRA, Hungarian Free Route Airspace) in the Hungarian Airspace, Peter Renner, Daniel Rohacs, Gabor Papp, Hungary, Eighth Sesar Innovation Days, 2018], [Free Route Airspaces in Functional Air Space Blocks, Judith Rosenow, David Strunck, and Hartmut Fricke, Eighth Sesar Innovation Days, 2018.
40. A simulation modeling study for free routing airspace in Japan, Kota Kegeyama, Yoichi Nakamura, 31st Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 2018.
41. Глобальная эксплуатационная концепция ОрВД (Doc 9854), ИКАО. Монреаль 2005.
42. GANP Portal. KPI Overview, ICAO. Montreal, 2021.
43. Recommended Key Performance Indicators for Measuring ANSP Operational Performance. CANSO. The Netherlands, March, 2015, Methodologies for Calculating Delays/Improvement Opportunity Pools By Phase of Flight. CANSO. The Netherlands, May, 2013.
44. 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.
45. ГОСТ 22283-2014. Шум авиационный. Допустимые уровни шума на территории жилой застройки и методы его измерения, МКС 49.100. М., 01.01.2015.

46. Рекомендуемый метод расчета контуров шума вокруг аэропортов (Doc 9911), ИКАО, 2-е изд., Монреаль, 2018.
47. 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 СЦ).
48. 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).
49. Safety Management Manual (SMM) Doc 9859 AN/474. Third Edition, ICAO. Montreal, 2013., Единые принципы моделирования риска столкновения в обоснование «Руководства по методике планирования воздушного пространства для определения минимумов эшелонирования (Doc 9689)». Циркуляр ИКАО 319-AN/181 13 ИКАО. Монреаль, 2009.
50. 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)).
51. Обухов Ю.В., Вишнякова Л.В. Решение задачи оценки безопасности полетов с помощью метода имитационного моделирования // Изв. РАН. ТиСУ. 2018. №6.
52. Котова А.О., Зубкова И.Ф., Обухов Ю.В. Особенности человека-оператора в модели диспетчерского обслуживания воздушного движения в составе имитационной модели оценки безопасности полетов // Тр. ГосНИИАС. Сер.: Вопросы авионики. 2018. №1(34).
53. Обухов Ю.В., Сикачев В.Ю., Попов А.С. 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)).
54. Additional ASMA Time Performance Monitoring and Reporting – Level ½ (Edition Number: 00-04. Category: Performance Monitoring and Reporting. Eurocontrol). Brussels, 24.02.2015, Lee P., Smith N., Homola J., Brasil C., Buckley N., Cabrall C., Chevalley E., Parke B., Hyo-Sang Yoo. Reducing Departure Delays in LaGuardia Airport

- with Departure-Sensitive Arrival Spacing (DSAS)// Eleventh USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2015). Lisbon, 2015.
55. Base of aircraft database (BADA) Product Management Document EEC Technical/Scientific Report No. 2009-008 Eurocontrol. Brussels, 2019.
 56. Performance Indicator – Horizontal Flight Efficiency Level 1 and 2 documentation of the Horizontal Flight Efficiency key performance indicator (Edition Number: 01-00. . Category: Performance Monitoring and Reporting – Level 1/2 . Eurocontrol). Brussels, 23.05.2014.
 57. Рамки эффективности работы для Европейского региона, Doc 030 Eur-030. Монреаль, 2020.
 58. Методика оценки эффективности предложений по изменению трассовой структуры ВП с использованием КИМ ОрВД // Рабочий документ, ФГУП «Госкорпорация по ОрВД». М., 2008.
 59. Правила расчета ПКС и временной загрузки диспетчера РЦ. Рабочий документ. ФГУП «ГосНИИАС», ФГУП «Госкорпорация по ОрВД» // М., 2010.
 60. Методика определения нормативов пропускной способности диспетчерский пунктов (секторов) органов обслуживания воздушного движения // Приказ Росавиации от 7 ноября 2012 г. №757.
 61. Методика расчета технической возможности аэропортов // Приказ Минтранса РФ от 24 февраля 2011 г. №63.
 62. Попов А.С. Минаенко В.Н. Оценка ПС аэродромного ВП с использованием имитационного моделирования на примере аэропорта Сочи //Тр. конф. ФГУП ГосНИИАС «Моделирование авиационных систем». М., 2013. С. 154-155
 63. 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.
 64. Попов А.С., Вересов К.А., Оценка уровня шума в районе аэродрома с применением имитационного моделирования, Авиационные системы в XXI веке. Тезисы докладов юби-лейной Всерос. науч.-технич. конф. Москва, 2022. С. 220-221.

65. Методика расчета выбросов загрязняющих веществ двигателями воздушных судов гражданской авиации // Министерство транспорта РФ 27 октября 2008 г.
66. 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.).
67. 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.
68. 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.
69. 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.
70. Дегтярев О.В., Егорова В.П. и др. «Комплекс имитационного моделирования УВД» - Труды НТК «Авиационные системы в XXI веке», т.2, НИЦ ГосНИИАС, Москва, 2006.
71. Дегтярев О.В., Вишнякова Л.В. и др. «Комплекс имитационного моделирования системы ОрВД РФ» - Российско-европейский семинар «Концепции и технологии ОрВД». Труды. Москва, 2007.
72. Degtiarev O.V., Egorova V.P. «Regulated Air Traffic Flow Simulation Tool» - 16th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace, Sanct-Peterburg, 2003.
73. Дегтярев О.В., Егорова В.П. и др. «Комплекс имитационного моделирования потоков воздушного движения» - Сб. трудов ГосНИИАС серия «Вопросы авионики», вып.2(12), 2003.
74. 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.

75. 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.
76. 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.
77. 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.
78. 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)).
79. 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.
80. 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.
81. 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, (№2020, перечень ВАК (2015-2018)).

82. C. A. ZUNIGA, D. DELAHAYE, M. A. PIERA Integrating and Sequencing Flows in Terminal Maneuvering Area by Evolutionary Algorithms, DASC 2011, 30th IEEE/AIAA Digital Avionics Systems Conference, Seattle, United States, 2011.
83. T. FARLEY, M. KUPFER, H. ERZBERGER Automated conflict resolution: A simulation evaluation under high demand including merging arrivals, 7th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference (ATIO), Belfast, Northern Ireland, 2007., 153.
84. Neuman F., Erzberger H. Analysis of Delay Reducing and Fuel Saving Sequencing and Spacing Algorithms for Arrival Traffic // NASA Ames Research Center, USA, 1991.
85. Psaraftis H.N. A dynamic programming approach to the aircraft sequencing problem. Rep. FTL R78-4, Flight Transportation Laboratory, M.I.T., Cambridge, USA, 1978.
86. Алешин А. В. Алгоритмы формирования очередности захода на посадку при маневрировании в зоне ожидания // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации, №1(5), 2013, С.73-84.
87. Алешин В.И. Алгоритм планирования очередности захода на посадку воздушных судов в районе аэродрома // Труды ОЛАГА, №72, 1978.
88. B. FAVENNEC at all Point merge integration of arrival flows enabling extensive RNAV application and CDA – operational services and environment definition, EUROCONTROL technical/scientific report, V. 2.0, 2010.
89. D. IVANESCU at all Models of air traffic merging techniques: evaluating performance of point merge, 9th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference, (ATIO), 2009.
90. Попов А.С., Методика проведения исследований по анализу эффективности использования воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома, // «Труды ГосНИИС, Серия: Вопросы авионики, №4(55), 2021, с.47-64, (№2342, перечень ВАК от 29.03.2022 г.).
91. Отчет о НИР «Оценка эксплуатационных характеристик проектируемой структуры воздушного пространства МЗ ЕС ОрВД и МУДР по результатам проведенной доработки, с использованием имитационного моделирования», ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», Москва, 2016 г.

92. Отчет о НИР «Предложения и обоснование решений по модернизации Комплекса Имитационного Моделирования системы Организации Воздушного Движения (КИМ ОрВД)», ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», Москва, 2017 г.
93. Отчет о НИР «Описание реализованных в комплексе имитационного моделирования при модернизации решений и алгоритмов функциональных моделей и программных модулей», ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», Москва, 2018 г.
94. Отчет о НИР «Методика оценки структуры воздушного пространства по показателям эффективности, пропускной способности и безопасности с учётом моделирования движения ВС по поверхности аэродрома, и результатами её апробации», ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», Москва, 2019 г.
95. Отчет о НИР «Комплексная оценка эффективности выполнения полётов в новой структуре воздушного пространства Московской, Санкт-Петербургской, Ростовской, Самарской и Екатеринбургской зонах ЕС ОрВД, а также оценка показателей эффективности выполнения полётов в районах основных аэродромов Московского узлового диспетчерского района с использованием имитационного моделирования», ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», Москва, 2019 г.
96. Отчет о НИР «Оценка пропускной способности основных аэродромов Московского узлового диспетчерского района с учётом моделирования в нём воздушного движения, включая полёты в района аэродрома, операции взлёта, посадки и движение воздушных судов по поверхности аэродрома с использованием имитационного моделирования», ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», Москва, 2019.
97. Отчет о НИР «Исследования по развитию Московского авиационного узла (МАУ) на основе формирования и реализации потенциала авиаузла на рынке международного авиационного трансфера», ФГБУ «НИЦ имени Н.Е Жуковского», Москва, 2021 г.