

На правах рукописи

Луговой Вениамин Геннадьевич

**МЕТОД ОРГАНИЗАЦИИ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ
ПРИБЫВАЮЩИХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ
СЛИЯНИЯ ПОТОКОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕВЕРСИВНЫХ
ЭШЕЛОНОВ**

2.9.6. Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова (ФГБОУ ВО СПб ГУ ГА им. А.А. Новикова)

Научный руководитель:

ПЛЯСОВСКИХ Александр Петрович

Доктор технических наук, профессор кафедры №22 «Организация и управление в транспортных системах» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова»

Официальные оппоненты:

БОРСОВЕВ Владимир Александрович

Доктор технических наук, Главный специалист Секретариата Ученого совета, федеральное унитарное предприятие «Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации»,

СКРЫПНИК Олег Николаевич

Доктор технических наук, профессор, профессор кафедры организации движения и обеспечения безопасности на воздушном транспорте, Белорусская государственная академия авиации (Минск)

Ведущая организация:

Акционерное общество «Азимут»

Защита состоится «14» марта 2025 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 42.2.002.01 на базе ФГБОУ ВО СПбГУ ГА им. А.А. Новикова по адресу: 196210, г. Санкт-Петербург, ул. Пилотов, д. 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО СПб ГУГА им. А.А. Новикова и на сайте: https://spbguga.ru/files/Dissovet/42.2.002.01/Lygovoi_Диссертация.pdf

Автореферат разослан « » января 2025 года.

Ученый секретарь

Диссертационного совета 42.2.002.01

кандидат технических наук, доцент

Н.Е. Баранов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Организация воздушного движения представляет собой динамичный и комплексный процесс обслуживания воздушного движения, организации потоков воздушного движения и воздушного пространства, осуществляемый безопасным, экономичным и эффективным образом путем предоставления средств и непрерывного обслуживания в сотрудничестве и взаимодействии всех заинтересованных сторон с использованием бортовых и наземных функций. Организация воздушного движения прибывающих воздушных судов, в том числе, включает в себя формирование необходимых продольных (временных) интервалов на посадку между несколькими воздушными судами (ВС), при этом ВС, очередь которых еще не подошла должны выполнять полет в режиме ожидания.

Традиционные способы организации воздушного движения прибывающих ВС (применение стандартных маршрутов прибытия (STAR) и зон ожидания, применение векторения) отличаются высокой степенью загруженности диспетчера УВД. Это, в свою очередь, приводит к достижению предела пропускной способности, повышению рисков связанных с безопасностью полетов, снижению качества формирования интервалов на посадку и увеличению расходов на организацию предоставляемого обслуживания (требуется большее количество секторов УВД).

Для разрешения данной проблемы разработана система Point Merge (традиционная система слияния потоков), внедряемая на многих аэродромах Российской Федерации и всего мира. Традиционные системы слияния потоков демонстрируют существенное снижение загруженности диспетчера УВД при организации воздушного движения прибывающих ВС за счет применения процедур зональной навигации вместо векторения. При этом, оказалось, что в случае применения традиционных систем слияния потоков в условиях неравномерного распределения потоков прибывающих ВС наблюдается снижение пропускной способности данных систем до 41,6%. Таким образом, в условиях интенсивного воздушного движения (при неравномерном распределении потоков прибывающих ВС), использование традиционных систем слияния потоков приводит к увеличению дополнительного полетного времени, увеличению потребления авиационного топлива и увеличению выбросов загрязняющих атмосферу веществ.

Возникает необходимость поиска решения, при котором сохраняются преимущества систем слияния потоков, а показатели эффективности аэронавигационного обслуживания не зависят от равномерности распределения прибывающих ВС по направлениям прибытий. Схожесть внедренных систем слияния потоков, применяемых на многих аэродромах, позволяет выработать общие положения по практическому применению данных систем в

целях определения оптимального метода организации воздушного движения прибывающих ВС.

Поставленная в диссертации научная задача соответствует пункту 9 «Аэронавигационное обеспечение полетов, закономерности процессов навигации, управления движением отдельных воздушных судов и их потоков» и пункту 10 «Совершенствование методов использования воздушного пространства, средств радиосвязи, навигации и наблюдения для решения задач управления воздушным движением» паспорта научной специальности 2.9.6. «Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники».

Степень разработанности темы исследования. Общий подход к эффективности аэронавигационного обеспечения ВС при прибытии, ожидании и заходе на посадку изложен в рекомендуемой практике ИКАО и документах организации EUROCONTROL. В Российской Федерации процессы аэронавигационного обслуживания ВС при прибытии, ожидании и заходе на посадку отражены в соответствующих Федеральных авиационных правилах. Одной из основных задач диспетчерского обслуживания подхода является построение очередности заходов и создание необходимых интервалов на посадку между прибывающими ВС. Для решения данной задачи применяются различные методы (полет по стандартному маршруту с применением зоны ожидания, наведение посредством векторения), создаются соответствующие элементы структуры воздушного пространства.

В последнее время среди разработчиков структуры воздушного пространства интенсивно используется система Point Merge, разработанная организацией EUROCONTROL и впервые внедренная в аэропорту Дублин в 2008 году. Опыт применения системы Point Merge в аэропорту Дублин, Осло и ряде других аэропортов позволил создать методический материал по внедрению и использованию данной системы, который представлен в документах организации EUROCONTROL. Однако, при адаптации системы Point Merge к условиям неравномерного движения прибывающих ВС, проявляется ряд проблем, которые снижают эффективность использования данной системы при организации воздушного движения.

Вопросам повышения эффективности аэронавигационного обеспечения полетов прибывающих ВС посвящены работы Крыжановского Г.А., Алешина В.И., Пятко С.Г., Губенко С.Г., Глухова Ю.Е., Барановского А.М. Ассорова Н.А., Кулакова М.В., Дивак Н.И. Ключникова Ю.И., Александрова Э.М. и др.

Однако проблема организации воздушного движения прибывающих ВС в условиях неравномерного движения и высоких транспортных нагрузок не имеет законченного решения. Следовательно, решение научной проблемы повышения эффективности аэронавигационного обеспечения прибывающих ВС в аэропортах гражданской авиации РФ является актуальной.

Объект исследования.

Организация воздушного движения прибывающих ВС.

Предмет исследования.

Процессы слияния потоков прибывающих ВС.

Цели и задачи диссертации.

Целью диссертации является разработка метода организации воздушного движения прибывающих ВС с применением усовершенствованной системы слияния потоков для повышения эффективности аэронавигационного обеспечения полетов на этапах прибытия и захода на посадку в условиях различного распределения потоков прибывающих воздушных судов.

В соответствии с целью данного исследования были поставлены и решены следующие задачи:

1. Анализ процессов и методов организации воздушного движения прибывающих ВС, в том числе с использованием систем слияния потоков.
2. Разработка математической модели традиционной системы слияния потоков, с использованием сети массового обслуживания, позволяющей проанализировать использование систем слияния потоков, с учетом реального распределения потоков прибывающих ВС.
3. Разработка математической модели усовершенствованной системы слияния потоков с использованием сети массового обслуживания и проведение имитационного моделирования усовершенствованной системы слияния потоков с учетом реального распределения потоков, прибывающих ВС.
4. Разработка усовершенствованной системы слияния потоков.
5. Разработка метода организации воздушного движения прибывающих ВС с применением усовершенствованной системы слияния потоков.
6. Оценка эффективности аэронавигационного обслуживания при применении усовершенствованной системы слияния потоков.

Научная новизна.

1. Разработана математическая модель традиционной системы слияния потоков с использованием сети массового обслуживания с обратной связью, позволяющая исследовать процессы применения систем слияния потоков с учетом различных по интенсивности потоков, прибывающих ВС. Аналогов разработанной модели в зарубежной и отечественной научной литературе не выявлено.
2. Разработана математическая модель усовершенствованной системы слияния потоков, *отличающаяся* от модели традиционной системы слияния потоков использованием нескольких каналов обслуживания, системы массового обслуживания зоны ожидания диспетчерского пункта подхода (вместо одного), количество каналов обслуживания динамически изменяется в зависимости от соотношения интенсивности потоков, прибывающих ВС.

3. Разработана усовершенствованная система слияния потоков, *отличающаяся* использованием нескольких эшелонов для полета по траектории задержки вместо одного (при использовании одной и той же точки входа), с возможностью использования реверсивного движения по эшелонам на траекториях задержки, что обеспечивает повышение эффективности аэронавигационного обслуживания полетов прибывающих ВС. Реверсивные эшелоны распределяются между точками входа в зависимости от интенсивности потоков прибывающих ВС.

4. Разработан метод организации воздушного движения прибывающих ВС в условиях высокой интенсивности воздушного движения с использованием усовершенствованной системы слияния потоков, *отличающийся*:

- использованием реверсивных эшелонов на траекториях задержки;
- распределением количества представляемых реверсивных эшелонов между точками входа на траектории задержки в соответствии с предлагаемым правилом;
- выводом прибывающих ВС с одного направления на предоставленные реверсивные эшелоны с использованием вертикального эшелонирования.

Теоретическая и практическая значимость диссертации.

Разработана математическая модель системы слияния потоков с использованием сети массового обслуживания, позволяющая исследовать систему слияния потоков в условиях различного распределения потоков прибывающих ВС. Математическая модель разработана впервые. Ранее, в целях исследования процессов, связанных с организацией воздушного движения прибывающих ВС на основе системы слияния потоков использовались экспериментальные методы, такие как моделирование на диспетчерском тренажере или моделирование на имитаторе воздушной обстановки в ускоренном режиме (Fast time simulation). С помощью разработанной модели определены закономерности, определяющие пропускную способность системы слияния потоков, среднее время задержки ВС и другие характеристики процессов слияния потоков.

С учетом выявленных закономерностей, определенных для традиционной системы слияния потоков разработана модель усовершенствованной системы слияния потоков. Модель усовершенствованной системы слияния потоков отличается от модели традиционной системы слияния потоков использованием нескольких каналов обслуживания системы массового обслуживания диспетчерского пункта подхода (вместо одного). При этом количество каналов обслуживания динамически изменяется в зависимости от соотношения интенсивности потоков прибывающих ВС. Сами каналы обслуживания являются общими для обеих систем массового обслуживания диспетчерских пунктов подхода.

На основе полученных в результате исследований усовершенствованной системы слияния потоков данных, разработан метод организации воздушного движения прибывающих ВС с использованием усовершенствованной системы слияния потоков.

Практическая значимость диссертации заключается в повышении эффективности аэронавигационного обслуживания. Наибольший рост эффективности достигается в условиях предельно неравномерного распределения потока прибывающих ВС по точкам входа на траекторию задержки. Практически значимыми результатами на примере аэродрома Санкт-Петербург (Пулково) являются:

- увеличение пропускной способности системы слияния потоков на величину до 70%;
- сокращение суммарного среднего времени ожидания прибывающих ВС

с 180 до 32 минут в сутки;

- снижение дополнительного расхода топлива (топлива затрачиваемого для задержки ВС) с 8 до 1,5 тонн в сутки;

- уменьшение количества вредных выбросов загрязняющих атмосферу веществ с 24 до 4,3 тонн в сутки.

Методология и методы исследования. В целях решения поставленных в диссертации задач и выработки рекомендаций, были использованы методы математического моделирования с использованием аппарата систем массового обслуживания, математической статистики, теории случайных процессов, для подтверждения теоретических результатов проводилось полунатурное моделирование с использованием диспетчерских тренажеров.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель системы слияния потоков прибывающих ВС, основанная на сети массового обслуживания, позволяющая исследовать процессы слияния потоков в традиционной системе слияния потоков.

2. Математическая модель усовершенствованной системы слияния потоков прибывающих ВС, основанная на сети массового обслуживания, отличающаяся от модели традиционной системы слияния потоков использованием динамически распределяемых каналов обслуживания.

3. Метод организации воздушного движения прибывающих ВС основанный на модели усовершенствованной системы слияния потоков с использованием реверсивных эшелонов, динамически распределяемых между точками входа на траектории задержки в зависимости от соотношения интенсивности потоков прибывающих ВС, а также применением вертикального эшелонирования для ВС, прибывающих на одну из траекторий задержки. Метод позволяет повысить пропускную способность системы слияния потоков в условиях неравномерного распределения потоков прибывающих ВС по точкам входа на траектории задержки.

Достоверность полученных результатов.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным использованием апробированных научных методов исследований и современного математического аппарата обработки результатов, данными полунатурного моделирования с использованием

диспетчерских тренажеров, а также практическим применением усовершенствованной системы слияния потоков в аэропорту Санкт-Петербург (Пулково), что подтверждается актами внедрения.

Апробация работы.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 4 научных конференциях:

1. Научно – практический семинар «Совершенствование аэронавигационного обслуживания на аэродромах», филиал НИИ «Аэронавигации» ФГУП ГосНИИ ГА, г. Москва, 26.06.2014.
2. Научно – практическая конференция преподавателей, слушателей и студентов «Состояние и перспективы развития аэронавигационной системы России», Институт Аэронавигации, г. Москва, 15.05.2019.
3. Научно – практическая конференция преподавателей, слушателей и студентов «Современные тенденции использования воздушного пространства и перспективные системы обеспечения полетов», Институт Аэронавигации, г. Москва, 03.12.2020.
4. Научно – практическая конференция преподавателей, слушателей и студентов «Современные тенденции использования воздушного пространства и перспективные системы обеспечения полетов», Институт Аэронавигации, г. Москва, 01.12.2021.

Публикации.

Полученные результаты диссертации изложены в 10 научных публикациях, 5 из которых являются публикациями в журналах перечня рекомендованного ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации. Пять публикаций в изданиях, индексируемых базой данных РИНЦ.

Связь работы с крупными научными программами.

Работа непосредственно связана с концепцией блочной модернизации авиационной системы, в соответствии с глобальным аэронавигационным планом ИКАО.

Личный вклад.

Личным вкладом автора является содержание данной работы и положения, выносимые на защиту. Автор принимал личное непосредственное участие в подготовке проекта модернизации и внедрении новой структуры воздушного пространства района аэродрома Санкт-Петербург (Пулково) впервые включающего усовершенствованную систему слияния потоков. Содержание опубликованных работ и данной диссертации являются выработанными автором решениями, подкрепленными экспериментальными исследованиями и непосредственной практикой использования.

Реализация результатов работы.

Представленный в диссертации метод организации воздушного движения прибывающих ВС, отражен в виде нормативных положений в технологиях работы

диспетчеров УВД аэроузлового диспетчерского центра ЕС ОрВД (Санкт-Петербург). Предложенный метод организации воздушного движения прибывающих ВС используется на тренажерных комплексах при проведении практической подготовке персонала ОВД, а также в процессе обучения. Система слияния потоков ВС аэродрома Санкт-Петербург (Пулково) разработана с учетом применения метода организации воздушного движения с использованием усовершенствованной системы слияния потоков. Результаты диссертации применяются на комплексном диспетчерском тренажере «Галактика», используемом для целей обучения персонала ОВД аэроузлового диспетчерского центра ЕС ОрВД (Санкт-Петербург). Имеются соответствующие акты о внедрении результатов диссертационной работы.

Структура и объем диссертации.

Диссертация включает введение, 4 главы и заключение. Диссертация состоит из 128 страниц. В диссертации содержится 44 рисунка и 17 таблиц. Список литературы состоит из 104 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы объект, предмет, цели и задачи исследования. Показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В первой главе приведена характеристика методов организации воздушного движения прибывающих ВС, рассмотрены их преимущества и недостатки, рассмотрены различные варианты построения систем, слияния потоков, показаны их преимущества и недостатки. Показана основная проблема метода организации воздушного движения с применением традиционной системы слияния потоков, возникающая при использовании только одного эшелона на каждой траектории задержки с учетом существующих интервалов горизонтального эшелонирования. Автором проведен анализ неравномерности потоков прибывающих воздушных судов на аэродромах, где применяются системы слияния потоков, показана актуальность необходимости решения научной задачи диссертации.

Во второй главе разработана и представлена математическая модель метода организации воздушного движения прибывающих ВС с использованием традиционной системы слияния потоков на основе временных диаграмм.

Основными элементами временной диаграммы являются: система слияния потоков, траектория задержки, эшелоны соответствующего диспетчерского пункта подхода (эшелоны

выхода из зоны ожидания), зоны ожидания соответствующих диспетчерских пунктов подхода (ДПП).

Для представления процессов используются следующие обозначения:

i – порядковый номер, по счету ВС;

$\tau_{i,п}$ – время поступления i -го ВС в зону ожидания;

$\Omega_{i,п}$ – время поступления i -го ВС на участок между точкой выхода ВС из зоны ожидания и точкой входа на траекторию задержки;

$\chi_{i,п}$ – выраженный временем интервал за i -м ВС, когда следующее ВС может покинуть зону ожидания;

$\tau_{i,к}$ – время поступления i -го ВС на траекторию задержки (пролета точки входа на траекторию задержки);

$\Omega_{i,к}$ – время покидания i -м ВС траектории задержки, и начала следования на точку слияния;

Θ_i – время завершения формирования интервала за i -м ВС, покинувшим траекторию задержки;

$\chi_{i,к}$ – выраженный временем интервал за i -м ВС, когда следующее ВС может покинуть траекторию задержки;

χ_k – выраженный временем продольный интервал на посадку;

$\chi_п$ – выраженный временем продольный интервал, применяемый для исключения сокращения горизонтального интервала, в момент выполнения разворотов при диспетчерском обслуживании подхода.

С помощью разработанной математической модели показана разница при обслуживании равномерного и неравномерного потоков прибывающих ВС с применением системы слияния потоков. При предельно неравномерном распределении прибывающих ВС процесс обслуживания прибывающих ВС с использованием традиционной системы слияния потоков представлен в виде временной диаграммы на рисунке 1.

Время обслуживания каждого прибывающего ВС можно представить выражением:

$$\begin{cases} \Theta_i = \tau_{i,п} + \chi_п + \chi_k \\ \Theta_{i+1} = \tau_{i,п} + 2\chi_п + \chi_k \\ \Theta_{i+2} = \tau_{i,п} + 3\chi_п + \chi_k \\ \Theta_{i+3} = \tau_{i,п} + 4\chi_п + \chi_k \end{cases} \quad (1)$$

Таким образом, при неравномерном распределении прибывающих ВС интервал между ВС составляет минимальный интервал, применяемый при диспетчерском обслуживании подхода, в то время как при равномерном распределении прибывающих ВС интервал

соответствует минимальному интервалу, применяемому при аэродромном диспетчерском обслуживании.

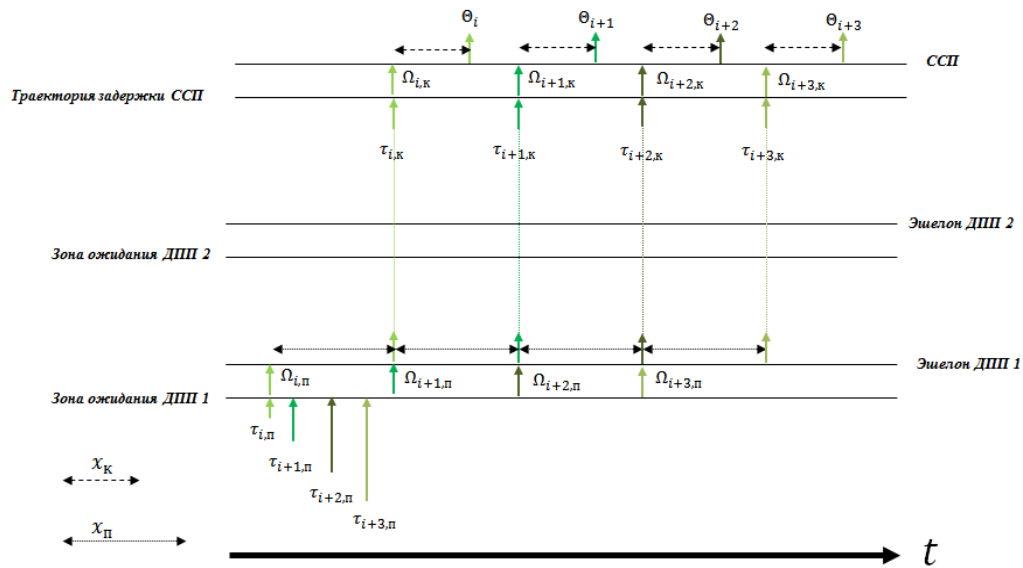


Рисунок 1 – Работа традиционной системы слияния потоков при неравномерном потоке прибывающих ВС на точки входа траектории задержки

Для исследования процессов организации воздушного движения прибывающих ВС разработана модель традиционной системы слияния потоков с применением сети массового обслуживания.

В предлагаемой модели ВПП представлена как одноканальная система массового обслуживания (СМО) с отказом типа G/G/1. Заявкой в такой СМО будут являться непосредственно ВС, прибывающие на посадочную прямую с интенсивностью потока $\lambda_{впп}$, обслуживающим каналом будет являться непосредственно ВПП. Результатом обслуживания будет сформированный поток ВС освобождающих ВПП, выполняющих заруливание на перрон аэродрома, $\lambda_{а/д}$.

Задача непосредственно системы слияния потоков в этом случае, является формирование потока ВС на посадочную прямую (т.е. потока ВС для СМО ВПП). Систему слияния потоков можно представить как одноканальную СМО с ограниченным количеством заявок в очереди и с детерминированным временем обслуживания типа G/D/1. При этом СМО системы слияния потоков имеет два входа для потока входящих заявок. Заявками будут ВС, поступающие на траектории задержки системы слияния потоков через точки входа, соответственно СМО системы слияния потоков, как правило, имеет два потока входящих заявок: $\lambda_{ссп1}$ и $\lambda_{ссп2}$. Каналом обслуживания будет воздушное пространство между траекториями задержки системы слияния потоков и точкой слияния. Результатом обслуживания является сформированный поток посадочной прямой $\lambda_{впп}$.

Еще одним компонентом сети массового обслуживания будут траектории прибытия и зоны ожидания расположенные на траекториях прибытия ДПП. Учитывая то, что в типовой системе слияния потоков выход на траекторию задержки возможен только на одном эшелоне, СМО ДПП будет также являться одноканальной СМО типа G/D/1 с ограниченным временем ожидания заявок в очереди, так как ожидание возможно только до тех пор, пока ВС имеют определенный резерв топлива. Заявками на обслуживание будут являться ВС, поступающие на траекторию прибытия, в рассматриваемом случае λ_1 и λ_2 . Каналом обслуживания является эшелон зоны ожидания, предназначенный для вывода ВС на траекторию задержки. Результатом обслуживания будут соответственно сформированные на точки входа траекторий задержки потоки $\lambda_{ссп1}$ и $\lambda_{ссп2}$. ВС будут находиться в зонах ожидания до момента освобождения канала обслуживания. При этом, если количество ВС выполняющих полет по траектории задержки i достигнет предельного количества I (предел количества заявок СМО ССП), выход из СМО ДПП станет на какое-то время невозможным, что приведет к увеличению времени обслуживания СМО ДПП. В целях недопущения такой ситуации, суммарная пропускная способность СМО ДПП1 и СМО ДПП2 не должна превышать пропускной способности СМО ССП.

Таким образом, традиционную систему слияния потоков, предназначенную для обслуживания потока заходящих на посадку ВС можно представить в виде совокупности трех СМО, общий вид такой модели представлен на рисунке 2.

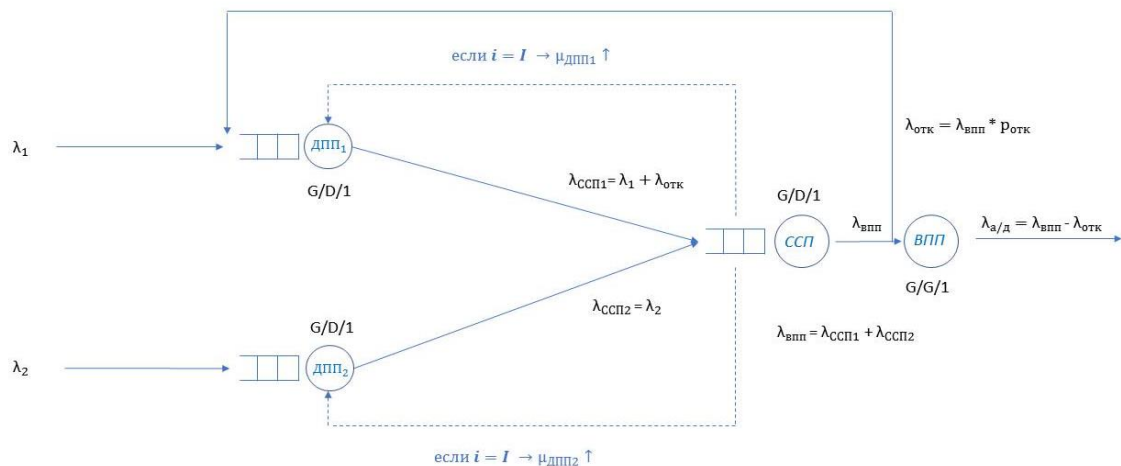


Рисунок 2 – Модель традиционной системы слияния потоков с использованием сети массового обслуживания

Представим пропускную способность СМО ВПП как пропускную способность посадочной прямой, которую найдем по формуле:

$$\mu_{вп_пос} = \frac{1}{T_{адог_{глисс}}} = 1/L_{адо}/W_{глисс} = W_{глисс}/L_{адо}, \quad (2)$$

где $W_{\text{глисс}}$ – скорость движения ВС на глиссаде.

С учетом того, что скорость движения ВС типа Ту-204 на данном участке

$W_{\text{глисс}} = 240 \text{ км/час}$, получим:

$$\mu_{\text{вп_пос}} = \frac{W_{\text{глисс}}}{L_{\text{адо}}} = \frac{240}{5} = 48 \text{ ВС/час}$$

Таким образом, для полного использования ресурсов посадочной прямой поток, создаваемый СМО должен соответствовать 48 ВС/час, тогда пропускная способность СМО системы слияния потоков $\mu_{\text{ссп}} = 48 \text{ ВС/час}$.

Потоки с интенсивностями $\lambda_{\text{ссп1}}$ и $\lambda_{\text{ссп2}}$, формируются ДПП. При этом время обслуживания будет зависеть от применяемого интервала эшелонирования при диспетчерском обслуживании подхода $L_{\text{доп}} = 10 \text{ км}$, а также скорости полета перед входом на траекторию задержки, которая будет соответствовать оптимальной скорости ожидания. Учитывая потери интервала эшелонирования при выполнении разворота на траектории задержки, который составляет 90 градусов, потребный интервал горизонтального эшелонирования $L_{\text{тз}}$ с учетом потери интервала в развороте составляет $L_{\text{тз}} = 14,2 \text{ км}$. Для расчета пропускной способности СМО ДПП используем формулу:

$$\mu_{\text{дпп1}} = \mu_{\text{дпп2}} = \frac{W_{\text{тз}}}{L_{\text{тз}}}, \quad (3)$$

где $W_{\text{тз}}$ – скорость движения ВС на траектории задержки.

Рассчитаем пропускную способность СМО ДПП с учетом $L_{\text{тз}} = 14,2 \text{ км}$ и скорости полета по траектории задержки $W_{\text{тз}} = 400 \text{ км/час}$.

$$\mu_{\text{дпп1}} = \mu_{\text{дпп2}} = \frac{W_{\text{тз}}}{L_{\text{тз}}} = \frac{400}{14,2} = 28,17 = 28 \text{ ВС/час}$$

Суммарная пропускная способность $\mu_{\text{дпп1+дпп2}} = 28 + 28 = 56 \text{ ВС/час}$

Таким образом, полная абсолютная пропускная способность сети массового обслуживания будет равна $A\mu_{\text{семо}} = \min(\mu_{\text{ссп}}, \mu_{\text{дпп1}} + \mu_{\text{дпп2}}) = 48 \text{ ВС/час}$. Потоки большей интенсивности не могут быть обслужены.

При этом, существует ограничение, накладываемое пропускной способностью СМО ДПП1 и СМО ДПП2. При потоке $\lambda_1 = 0$, $A\mu_{\text{семо}} = \min(\mu_{\text{ссп}}, \mu_{\text{дпп1}} + \mu_{\text{дпп2}}) = 28 \text{ ВС/час}$, при потоке $\lambda_2 = 0$, $A\mu_{\text{семо}} = \min(\mu_{\text{ссп}}, \mu_{\text{дпп1}} + \mu_{\text{дпп2}}) = 28 \text{ ВС/час}$. Таким образом, при потоках $\lambda_1 \geq 28$ и/или $\lambda_2 \geq 28$ образуется очередь бесконечной длины.

В результате абсолютная пропускная способность будет располагаться в пределах: $28 \leq A_{\mu_{\text{СеМО}}} \leq 48$. Работоспособность сети массового обслуживания будет определяться системой уравнений:

$$\begin{cases} \lambda_1 + \lambda_2 = 48 \\ \lambda_1 \leq 28 \\ \lambda_2 \leq 28 \end{cases} \quad (4)$$

График зависимости абсолютной пропускной способности сети массового обслуживания от соотношения интенсивностей входящих потоков λ_1 и λ_2 представлен на рисунке 3.

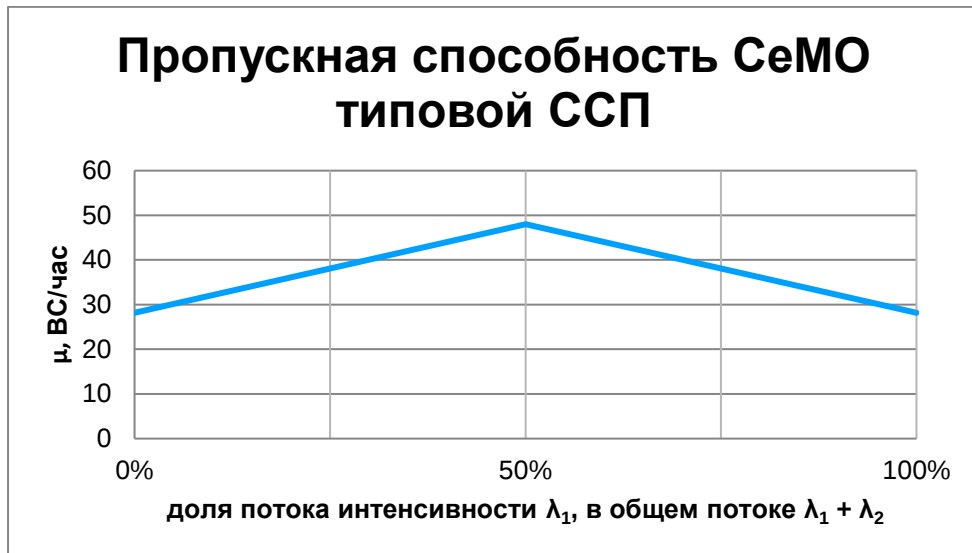


Рисунок 3 – График зависимости пропускной способности от соотношения потоков λ_1 и λ_2 в сети массового обслуживания традиционной системы слияния потоков

Таким образом, ключевой недостаток традиционной системы слияния потоков состоит в том, что пропускная способность системы при неравномерном потоке прибывающих ВС падает на 41,6% (с 48 ВС/час до 28 ВС/час). Это влечет за собой дополнительные задержки ВС в воздухе, и как следствие увеличение расхода топлива. Увеличение расхода топлива, в свою очередь, приводит к повышению количества выбросов загрязняющих атмосферу веществ.

Таким образом, требуется решение задачи увеличения пропускной способности ССП при любом соотношении потоков λ_1 и λ_2 .

В третьей главе разработана и представлена математическая модель усовершенствованной системы слияния потоков, основным отличием которой является многоканальность. Многоканальность достигается за счет возможности перераспределения каналов между системами массового обслуживания внутри сети. Модель

усовершенствованной системы слияния потоков в виде сети массового обслуживания представлена на рисунке 4.

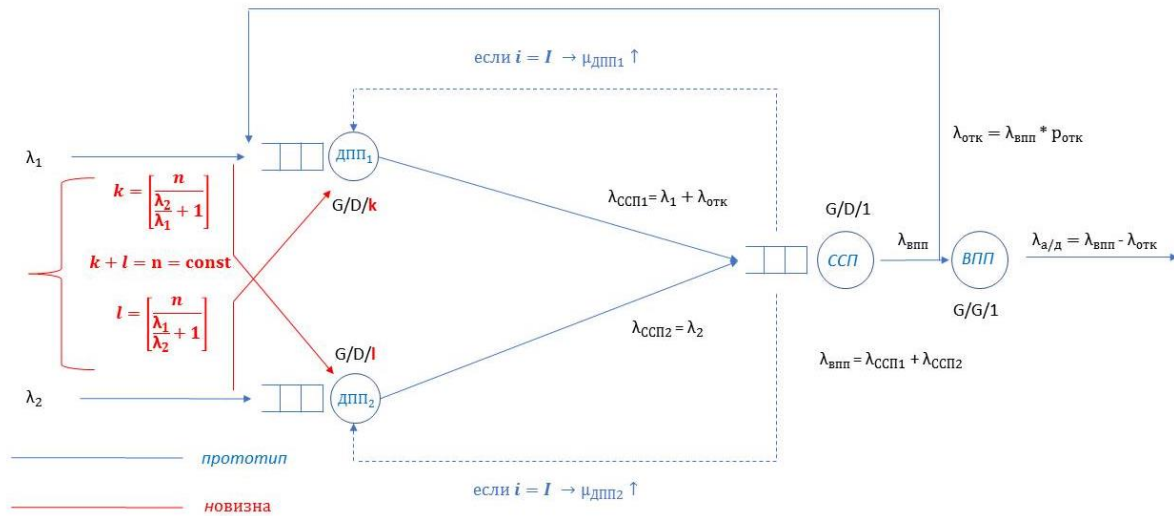


Рисунок 4 – Модель усовершенствованной системы слияния потоков с использованием сети массового обслуживания

Пропускная способность усовершенствованной системы слияния потоков более не зависит от распределения потоков прибывающих ВС. Зависимость пропускной способности от равномерности распределения потоков прибывающих ВС представлена на рисунке 5.

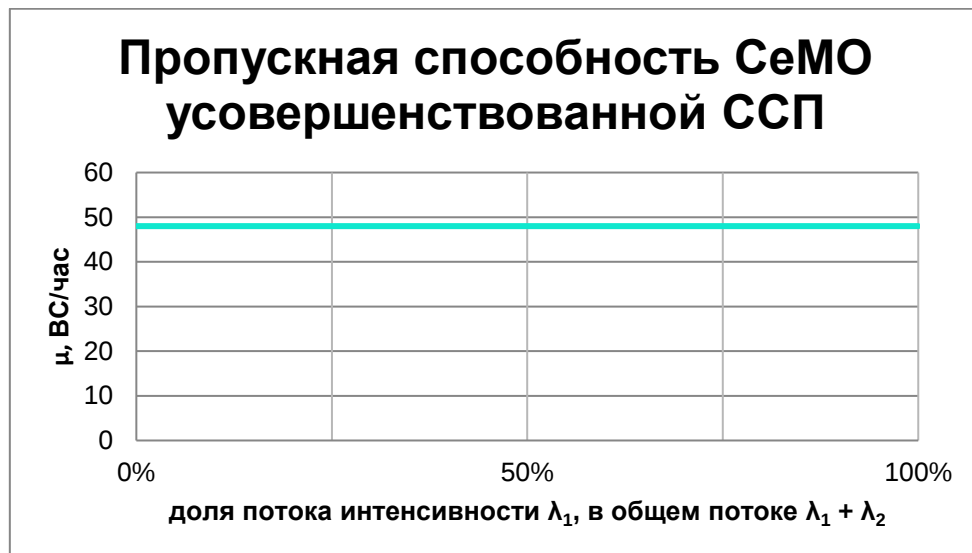


Рисунок 5 – График зависимости пропускной способности от соотношения потоков λ_1 и λ_2 в сети массового обслуживания усовершенствованной системы слияния потоков

С использованием математического аппарата теории массового обслуживания проведено исследование моделей традиционной системы слияния потоков и

усовершенствованной системы слияния потоков. Для определения среднего времени ожидания выведены формулы:

$$T_{\text{оч_тссп}} = \frac{T_{\text{оч_дпп1}} * \lambda_1 + T_{\text{оч_дпп2}} * \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} = \frac{1}{2(\lambda_1 + \lambda_2)} * \left(\frac{\lambda_1^2}{\mu_1(\mu_1 - \lambda_1)} + \frac{\lambda_2^2}{\mu_2(\mu_2 - \lambda_2)} \right) \quad (5)$$

И

$$T_{\text{оч_уссп}} = \frac{p^4 * P_0 * \left(1 - \frac{p}{3}\right)^{-2}}{18 * (\lambda_1 + \lambda_2)} \quad (6)$$

Полученные в ходе исследования результаты представлены на рисунке 6.



Рисунок 6 – График зависимости среднего времени ожидания $T_{\text{оч}}$ ВС от суммарной интенсивности потоков $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$ в типовой ССП и усовершенствованной ССП при предельно неравномерном ($\lambda_1 = 0$) распределении потоков прибывающих ВС

Таким образом, можно заключить что в случае предельно неравномерного потока прибывающих ВС при сопоставимом среднем времени ожидания $T_{\text{оч}}$ (29 минут для типовой ССП и 27 минут для усовершенствованной ССП) пропускная способность сети массового обслуживания возрастает с 28 ВС/час до 48 ВС/час (на 70%).

На основе модели усовершенствованной системы слияния потоков разработан метод организации воздушного движения прибывающих ВС, *отличающийся* возможностью использования нескольких эшелонов для полета на каждой из траекторий задержки. При этом

занятые эшелоны становятся недоступными для ВС, поступающих на другие траектории задержки (точки входа на траекторию задержки), т.е. фактически эшелоны полета используются в реверсивном режиме. В таком случае появляется возможность выхода на траекторию задержки с одного направления с горизонтальным интервалом менее допустимого, так как полет выполняется на ином эшелоне. Доступные для полета эшелоны перераспределяются между траекториями задержки на основе анализа данных об интенсивности движения с каждого направления прибытия. Для перераспределения эшелонов используется зависимость, представленная формулой:

$$k = \left\lfloor \frac{n}{\frac{\lambda_2}{\lambda_1} + 1} \right\rfloor, n = \text{const}, l = n - k, \quad (7)$$

где λ_1 и λ_2 – интенсивности потоков ВС, поступающих на 1-ю траекторию и 2-ю траекторию задержки соответственно;

n – общее количество доступных эшелонов на траекториях задержки;

k – количество доступных эшелонов на 1-й траектории задержки;

l – количество доступных эшелонов на 2-й траектории задержки.

Процесс организации воздушного движения с использованием усовершенствованной системы слияния потоков и разработанного метода смоделирован с использованием временной диаграммы (рисунок 7).

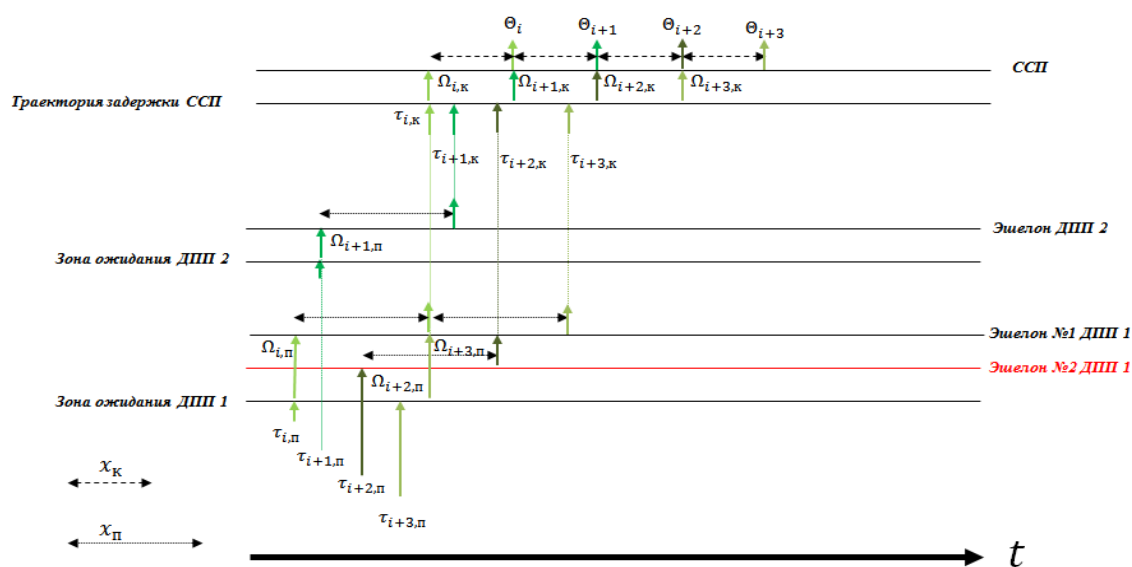


Рисунок 7 – Работа предлагаемого метода с использованием усовершенствованной системы слияния потоков при неравномерном распределении потоков прибывающих ВС

В результате время обслуживания каждого ВС можно представить выражением:

$$\begin{cases} \Theta_i = \tau_{i,п} + \chi_{п} + \chi_{к} \\ \Theta_{i+1} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + 2\chi_{к} \\ \Theta_{i+2} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + 3\chi_{к} \\ \Theta_{i+3} = \tau_{i,п} + \chi_{п} + 4\chi_{к} \end{cases} \quad (8)$$

Таким образом, время обслуживания при применении метода организации воздушного движения с использованием усовершенствованной системы слияния потоков при неравномерном распределении потоков прибывающих ВС уменьшено, и фактически зависит только от применяемого интервала аэродромного диспетчерского обслуживания $\chi_{к}$.

Реализация разработанного метода организации воздушного движения с использованием усовершенствованной системы слияния потоков достигается сведущим порядком действий диспетчера УВД:

1. Анализируя планируемые прибытия ВС по списку, диспетчер определяет превалирующее направление прибытий на предстоящий период работы, например 30 минут или 60 минут.

При превышении количества прибытий с одного направления над количеством прибытий с другого направления диспетчер УВД принимает решение использовать один эшелон, например 50 для организации воздушного движения прибывающих ВС с направления с наименьшим числом прибывающих ВС. С другого направления использует два эшелона, например 60 и 70.

Если поток прибытий полностью равномерен, распределение количества эшелонов для каждой точки входа на траекторию задержки – не принципиально.

Если поток ВС с одного из направлений отсутствует, диспетчер УВД принимает решение использовать все три эшелона 50, 60 и 70 для одного направления прибытий.

2. При прибытии ВС к началу зоны ожидания диспетчер УВД направляет первые три ВС (по количеству эшелонов) на точки входа траектории задержки, назначая эшелоны, в соответствии с ранее определенными эшелонами.

3. При освобождении одного из эшелонов, диспетчер УВД направляет очередное ВС на точку входа на траекторию задержки с использованием освобожденного эшелона.

В **четвертой главе** приведены результаты моделирования разработанного метода организации воздушного движения прибывающих ВС с использованием диспетчерского тренажера (таблица 1).

Таблица 1

Результаты моделирования на диспетчерском тренажере

Тип ССП, распределение потоков прибывающих ВС	Суммарные потери при формировании интервала на посадку $L_{\Sigma_потерь_j}$, км	Количество сеансов радиосвязи, K_{p/c_j}	Коэффициент загрузки, $K_{э_j}$	Время решения задачи, $T_{э_j}$, мин
ТССП, равномерное	3,5	23	0,27	10:09
ТССП, неравномерное	16,5	33	0,34	13:38
УССП, равномерное	3,8	16	0,18	07:52
УССП, неравномерное	3,9	27	0,25	08:26

В результате применения разработанного метода показано снижение загрузки диспетчера УВД, уменьшение количества радиосвязей, сокращение протяженности траекторий при формировании интервала на посадку.

С учетом данных о неравномерности потоков прибывающих ВС приведены расчеты пропускной способности ССП для некоторых аэродромов, показано, что снижение пропускной способности при использовании традиционной ССП характерно для большинства аэродромов.

Произведены расчеты показателей эффективности, связанные с пропускной способностью, уменьшением суммарного времени ожидания, снижением расход топлива при выполнении ожидания и сокращением выбросов загрязняющих атмосферу вещества для конкретного дня полетов на аэродроме Санкт-Петербург (Пулково).

Расчет суммарного времени ожидания произведен по формулам:

$$T_{сут_тссп} = \sum_{j=0}^{23} T_{оч_тсспj} * (\lambda_{1j} + \lambda_{2j}) \quad (9)$$

$$T_{сут_уссп} = \sum_{j=0}^{23} T_{оч_усспj} * (\lambda_{1j} + \lambda_{2j}) \quad (10)$$

Показано снижение среднего времени ожидания с 179 минут в сутки при использовании традиционной системы слияния потоков до 32 минут при применении усовершенствованной системы слияния потоков.

На основании полученных данных о суммарном времени ожидания, с учетом парка эксплуатируемых ВС выполнен расчет величины дополнительного расхода топлива, которое затрачивается на выполнение полета в режиме ожидания.

$$Q_{сут_тссп} = T_{сут_тссп} * Q_{ср} \quad (11)$$

$$Q_{сут_уссп} = T_{сут_уссп} * Q_{ср} \quad (12)$$

Показано снижение дополнительного расхода топлива с 7848 до 1387 кг в сутки.

На основании данных о расходе топлива рассчитано количество выбросов загрязняющих атмосферу веществ, образовавшихся при сжигании топлива, затраченного на выполнении полета в режиме ожидания (таблица 2).

Таблица 2

Результаты расчета количества выбросов загрязняющих атмосферу веществ, образовавшихся при сжигании топлива, затраченного на выполнении полета в режиме ожидания, для аэродрома Санкт-Петербург (Пулково)

Вещество	Выбросы		Эффект (сокращение выбросов)
	ТССП	УССП	
CO ₂ , кг/сут	24389	4300	20089
CO, кг/сут	47	8,3	38,7
SO ₂ , кг/сут	20	3,47	16,53
C _n H _m , кг/сут	1,18	0,21	0,97
сажа, кг/сут	0,79	0,14	0,65
NO _x , кг/сут	118	20,67	97,33

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержится решение актуальной научной проблемы по повышению эффективности аэронавигационного обеспечения полетов на этапах прибытия и захода на посадку в условиях различного распределения потоков прибывающих воздушных судов и приведены следующие научные результаты:

1. Проведен анализ потоков прибывающих ВС на аэродромы, в которых используется система слияния потоков и определена неравномерность потоков прибывающих ВС в течение суток.
2. Разработана модель системы слияния потоков с использованием сети массового обслуживания и исследована традиционная система слияния потоков. Показано снижение пропускной способности традиционной системы слияния потоков на величину до 41,6% при неравномерном распределении прибывающих ВС.
3. Разработана модель усовершенствованной системы слияния потоков и показана возможность увеличения пропускной способности на величину до 70% при абсолютно неравномерном распределении прибывающих ВС.
4. Для организации воздушного движения прибывающих ВС по направлениям прибытия, с учетом предложенной модели усовершенствованной системы слияния потоков, разработан метод, исключаящий простои, связанные с формированием интервалов на посадку. Новизна предлагаемого метода заключается в использовании нескольких эшелонов для полета ВС на траектории задержки. Доступные для полета эшелоны динамически

перераспределяют между точками входа на траектории задержки в соответствии с заданным условием. Реализация предложенного метода организации воздушного движения прибывающих ВС с использованием усовершенствованной системы слияния потоков достигается соответствующим порядком технологических действий диспетчера УВД.

5. Моделированием с использованием комплексного диспетчерского тренажера подтверждена неэффективность использования метода организации воздушного движения прибывающих ВС с применением традиционной системы слияния потоков и отмечено преимущество метода организации воздушного движения прибывающих ВС с применением усовершенствованной системы слияния потоков. Результаты моделирования показано, что предложенный метод организации воздушного движения прибывающих ВС с применением усовершенствованной системы слияния потоков позволяет привести к сокращению дополнительного расхода топлива (топлива, затрачиваемого для ожидания, непроизводительного налета в связи с ожиданием) на величину до 70 %.

6. Использование метода организации воздушного движения прибывающих ВС с применением усовершенствованной системы слияния потоков также приводит к уменьшению количества сеансов радиосвязи на величину от 18 до 30% и снижению загруженности диспетчеров УВД на величину от 26 до 33%.

7. Проведен расчет показателей эффективности аэронавигационного обслуживания при применении усовершенствованной системы слияния потоков. Показано, что использование метода организации воздушного движения прибывающих ВС с применением усовершенствованной системы слияния потоков позволяет существенно сократить значения дополнительного полетного времени (времени непроизводительного налета в связи с ожиданием) в воздушном пространстве узлового диспетчерского района, и, следовательно, организовать движение прибывающих ВС с меньшими задержками. Ожидаемый экономический эффект от применения метода организации воздушного движения прибывающих ВС с применением усовершенствованной системы слияния потоков, на примере аэродрома Санкт-Петербург (Пулково) составляет сотни тысяч рублей в сутки за счет снижения затрат на дополнительный расход топлива (топлива затрачиваемого для ожидания, непроизводительного налета в связи с ожиданием). Следует отметить, что наиболее существенный эффект достигается на аэродромах с высокой интенсивностью полетов и неравномерным распределением прибывающих ВС в зависимости от направления прибытия.

8. Предложенный метод организации воздушного движения прибывающих ВС с применением усовершенствованной системы слияния потоков апробирован и доведен до практической реализации в аэроузловом диспетчерском центре ЕС ОрВД (Санкт-Петербург). Внедрение предложенного метода позволило повысить пропускную способность системы слияния потоков, применяемой на аэродроме Санкт-Петербург (Пулково) на 70 % (в условиях

абсолютно неравномерного распределения потока прибывающих ВС по точкам входа на траекторию задержки).

Применение полученных в работе результатов позволяют:

1. Повысить пропускную способность системы слияния потоков на величину до 70% (в условиях абсолютно неравномерного распределения потока прибывающих ВС по точкам входа на траекторию задержки) с 28 до 48 ВС/час.
2. Снизить время ожидания ВС, в условиях абсолютно неравномерного распределения потока прибывающих ВС по точкам входа на траекторию задержки, на примере аэродрома Санкт-Петербург (Пулково) с 179 до 32 минут в сутки. Время ожидания в среднем сокращается на 0,54 минуты для одного ВС.
3. Сократить расход топлива, затрачиваемого на ожидание (непроизводительный налет в связи с ожиданием) в условиях абсолютно неравномерного распределения потока прибывающих ВС по точкам входа на траекторию задержки. На примере аэродрома Санкт-Петербург (Пулково) с 7800 до 1400 килограммов в сутки. Годовая экономия топлива (по грубой оценке) составляет 1168 тонн в год.
4. Уменьшить часть количества выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, возникающих при выполнении ожидания (непроизводительного налета в связи с ожиданием) в условиях абсолютно неравномерного распределения потока прибывающих ВС по точкам входа на траекторию задержки, на примере аэродрома Санкт-Петербург (Пулково) с 24 до 4,3 тонн в сутки (выбросы CO_2). Годовое сокращение выбросов CO_2 (по грубой оценке) составляет 3 595 тонн в год.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные публикации в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (5):

1. Луговой, В. Г. Применение процедуры Point Merge в условиях неравномерного распределения потоков прибывающих воздушных судов / В. Г. Луговой // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2017. № 4 (17). – С.25-37.
2. Луговой, В. Г. Применение тактических точек пути стандартного маршрута вылета зональной навигации для организации потока вылетающих воздушных судов / В. В. Купин, В. Г. Луговой // Вестник Санкт-Петербургского университета гражданской авиации. 2018. № 1 (18). – С. 83-101.

3. Луговой, В. Г. Проблемы, связанные с определением необходимого количества топлива при планировании полетов по стандартным траекториям прибытия (STAR), которые имеют участки для задержки воздушных судов / В. Г. Луговой, А. В. Сорокин, О. В. Шилов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2019. Т. 22. № 2. – С. 28-37.

4. Луговой, В. Г. Разработка критериев поддержания оптимальной загруженности траекторий задержки, при использовании системы POINT MERGE / В. Г. Луговой // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2020, № 3 (28). – С. 45-58.

5. Луговой, В. Г. Модель системы слияния потоков прибывающих воздушных судов с помощью сети массового обслуживания / А. П. Плясовских, В. Г. Луговой // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2023. № 3 (40). – С. 65-80.

Публикации в трудах российских конференций:

1. Луговой, В. Г. Проблемы проектирования и применения стандартных траекторий прибытия (STAR), которые имеют участки для задержки воздушных судов / В. Г. Луговой // Сборник докладов и тезисов научно-практической конференции преподавателей, слушателей и студентов «Состояние и перспективы развития аэронавигационной системы России». – 2019. – С. 66-72.

2. Луговой, В. Г. Особенности определения очередности заходов на посадку при использовании систем Point Merge / В. Г. Луговой // В сборнике: Современные тенденции использования воздушного пространства и перспективные системы обеспечения полетов. Материалы научно-практической конференции преподавателей, слушателей и студентов. Москва, 2020. – С. 111-114.

3. Луговой, В. Г. Особенности формирования интервалов на посадку при использовании систем Point Merge / В. Г. Луговой // Сборник докладов и тезисов научно-практической конференции преподавателей, слушателей и студентов «Состояние и перспективы развития аэронавигационной системы России». – 2021. – С. 67-73.

4. Луговой, В. Г. Оценка эффективности внедрения маршрутов расчета топлива в системах Point Merge / В. Г. Луговой // В сборнике: Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации. Сборник трудов XI Международной научно-практической конференции, посвященной празднованию 100-летия конструкторского бюро «Туполев», 55-летия Иркутского филиала МГТУ ГА, 75-летия Иркутского авиационного технического колледжа. Иркутск, 2022. – С. 188-193.

5. Луговой, В. Г. Результаты внедрения маршрутов расчета топлива в системе Point Merge аэродрома Санкт-Петербург (Пулково), ожидаемый эффект для других аэродромов / В.

Г. Луговой //В сборнике: Современные тенденции использования воздушного пространства и перспективные системы обеспечения полетов. Материалы научно-практической конференции преподавателей, слушателей и студентов (1 декабря 2022 г.). Москва, 2022. – С. 93-100.

Печатается в авторской редакции.

Подписано к печати 27.12.2024. Формат бумаги 60х90^{1/16}.

Тираж 100. Усл.печ.л. 1,5. С 246. Заказ 650

Тип. Университета ГА. 196210 Санкт-Петербург, ул. Пилотов, д.38