

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Попова Андрея Сергеевича на тему «Методы, математические модели и комплекс программ для выбора структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома на основе анализа эффективности их использования», представленную к защите на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)»

**Актуальность диссертационной работы.** Основной задачей системы организации воздушного движения (ОрВД) является обеспечение потребностей пользователей воздушного пространства при соблюдении требуемого уровня безопасности выполнения полётов. С другой стороны, воздушное пространство и аэродромы ограничены своей пропускной способностью. Растущий спрос на выполнение полётов приводит к необходимости совершенствования системы ОрВД с целью повышения пропускной способности и качества аэронавигационного обслуживания. Непрерывное развитие технологий позволяет совершенствовать как бортовое, так и наземное оборудование, в том числе, системы связи, наблюдения, навигации. Кроме этого, ведутся разработки новых типов воздушных судов. Все это приводит к необходимости проектирования новой структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродромов. Процесс этот является сложным, многоэтапным и многокритериальным.

Предлагаемые структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродромов в виде концептуальных проектов должны быть проанализированы и выбран один наилучший вариант для дальнейшей проработки и внедрения. Вместе с тем, визуальная оценка не позволяет сделать полноценный анализ, а отработка на полунатурных тренажерах слишком затратная как по времени, так и по трудоемкости, и не дает возможность провести оценку в прогнозных условиях. Кроме этого, полунатурный тренажер используется в интересах только одного из участников системы ОрВД (например, диспетчера), а разработка структуры затрагивает таких пользователей, как: авиакомпании, аэропорты, провайдеры аэронавигационных услуг и др. В связи с этим, применение методов математического и имитационного моделирования позволяет более

качественно решить задачу количественной оценки исследуемого варианта структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродромов.

Следовательно, задача разработки методов, математических моделей и комплекса программ для оценки эффективности использования воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома, которая решается в диссертационной работе Попова А.С., является актуальной, практически важной и позволяет повысить качество выбора варианта структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома.

**Оценка содержания диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и литературы. Диссертация изложена на 168 страницах, содержит 53 рисунка, 3 таблицы и список литературы, который включает 97 наименований.

Диссертационная работа хорошо структурирована.

Во введении обоснована актуальность выполнения работы, сформулированы цель, научная задача, а также частные задачи исследования. Приведены научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена оценке разработанности темы исследования и целесообразности применения моделирования для оценки эффективности использования воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома. Исследованы как подходы, применяемые для оценки, так и инструментарий, используемый для моделирования процессов организации воздушного движения. Автор исследовал особенности моделирования разных сегментов структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома. В первой главе сформулирована постановка задачи многомерной условной оптимизации, показатель и критерий эффективности, ограничения и условия выполнения полётов. Показатель эффективности состоит из групп показателей в интересах различных участников системы ОрВД.

Во второй главе представлены математические модели показателей эффективности, а также алгоритмы их расчёта. Показатели объединены в группы, отражающие интересы участников системы ОрВД. Выбор показателей основывается на рекомендациях, которые даёт Международная организация гражданской авиации. Автор приводит метод, обеспечивающий решений многокритериальной задачи условной оптимизации, а также алгоритм расчёта. Применение метода последовательных уступок позволяет

свести задачу к ряду однокритериальных задач, а также варьировать условия выбора одного из альтернативных вариантов структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома, путем назначения уступки. Предложенный автором метод даёт возможность участникам системы ОрВД обеспечить баланс интересов в условиях взаимных компромиссов.

В третьей главе приводится комплекс имитационного моделирования системы организации воздушного движения. Комплекс состоит из имитационных и расчётных моделей, моделей расчёта показателей, а также моделей, предназначенных для автоматического или автоматизированного заведения полётных, аэронавигационных и других видов данных. По основным моделям представлено описание и визуализация реализации. В работе приведена взаимосвязь моделей, исходные данные, поступающие на вход в комплекс, структурная схема, включая базу данных комплекса. В основе ряда моделей лежат численные методы. Автор даёт описание и алгоритм реализации модели, в том числе, обнаружения потенциальных конфликтных ситуаций, формирования случайных потоков воздушного движения и др.

Четвертая глава посвящена практической реализации разработанных метода и программного комплекса имитационного моделирования. Предложена методика проведения исследований по анализу эффективности использования воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома. Особенность методики заключается в её декомпозиции в зависимости от моделируемого воздушного пространства и(или) инфраструктуры аэродрома. В качестве апробации приведены исследования по оценке эффективности использования структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома на основе сравнительного анализа из трех вариантов.

В заключении приводятся результаты проведенных научных изысканий, включая результаты решенных частных задач. В заключении работы приводятся основные результаты и выводы по диссертации.

Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы.

**Степень обоснованности и достоверности научных положений диссертации.** Проведенный автором всесторонний анализ опыта использования и обоснование целесообразности применения имитационного моделирования при решении задачи анализа эффективности использования воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома и корректное

формулирование постановки задачи позволяют сделать вывод о строгом системном подходе в диссертационном исследовании. Обоснованность научных результатов и положений, выносимых на защиту, подтверждается их апробацией в периодических изданиях, а также в докладах на конференциях.

**Методы исследования** используемые автором: 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.

**Достоверность полученных результатов и выводов** обеспечивается обоснованным выбором системы показателей эффективности и использованием рекомендаций ИКАО при их выборе и разработке алгоритмов их расчёта, разработкой комплекса имитационного моделирования с применением известных численных методов, неоднократным применением комплекса для решений задач по оценке структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома, а также учётом экспертного мнения при проведении исследований

Результаты диссертационного исследования докладывались на всероссийских и международных конференциях, а также рассматривались экспертами в области аэронавигационного обеспечения полетов и эксплуатации воздушного транспорта.

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 21 печатной работе, в том числе: 8 научных статьях в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК при Минобрнауки РФ, Scopus и Web of Science; 10 научных статьях и тезисах докладов, опубликованных в других изданиях; 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

**Новизна научных положений и выводов, сформулированных в диссертационной работе,** заключается в:

1. Математических моделях, позволяющих комплексно описать элементы системы ОрВД, их функционирование и процессы взаимодействия между ними и алгоритмы управления воздушным движением и движением воздушных судов (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.

2. Методе выбора рационального варианта структуры воздушного пространства (ВП) и инфраструктуры аэродрома, позволяющий учесть интересы всех участников системы ОрВД для выработки общего решения.

3. Системе 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 для определения зависимости задержек от интенсивности воздушного движения.

4. Методике 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.

5. Комплексе 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.

**Практическая значимость работы** состоит в реализации и внедрении программного комплекса имитационного моделирования в процессы поддержки принятия решений национального провайдера аэронавигационных услуг, методики его применения при решении целого спектра задач, включая процессы организации и управления воздушным движением на поверхности аэродрома, в диспетчерской зоне района аэродрома или аэроузла, а также в верхнем воздушном пространстве при полёте по маршруту.

**К недостаткам диссертационной работы** можно отнести следующее:

1. В диссертации автор не пояснил, как при определении пропускной способности взлетно-посадочной полосы аэродрома учитывается регламент ее работы.

2. Регламент работы взлетно-посадочной полосы и безопасность движения воздушных судов по аэродрому во многом определяется

состоянием и техническими характеристиками средств радиотехнического обеспечения полетов. В работе автором не учитываются состояние и технические характеристики средств радиотехнического обеспечения полетов.

3. В автореферате автору стоило бы представить оценку количества сценариев моделирования, необходимых для принятия решения по выбору структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома.

4. На стр. 108 автор пишет: «Для вычисления времени входа была выбрана случайная величина, определяемая бета-распределением». Однако автор не приводит обоснования данного выбора.

5. В тексте диссертации в рисунках, которые иллюстрируют графические зависимости, не везде подписаны оси. В тексте работы объяснение этих зависимостей есть, однако отсутствие подписи осей затрудняет чтение диссертации.

Указанные замечания и недостатки не снижают положительной оценки представленной диссертационной работы и ее научно-практической значимости.

**Заключение о соответствии диссертационной работы установленным требованиям.** Представленная диссертационная работа Попова Андрея Сергеевича выполнена на высоком научно-техническом уровне. В работе представлена актуальная научно-техническая задача, решение которой позволяет повысить качество выбора структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома на основе компьютерного математического имитационного моделирования. Автореферат соответствует и в полном объеме отражает содержание диссертации. Результаты диссертационной работы, выносимые на защиту, прошли апробацию на 9 научно-технических российских и международных конференциях, а также представлены в печатных изданиях, включая 7 статей в периодических изданиях из перечня ВАК и одной в изданиях, входящих в реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science. Научные положения и результаты, выносимые на защиту, полностью отражены в работе и публикациях и соответствуют научной специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)». По научному уровню, полученным результатам, актуальности, практической и теоретической значимости, воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома на основе компьютерного математического имитационного моделирования. Автореферат соответствует и в полном объеме отражает содержание диссертации.

оформлению и содержанию диссертация полностью соответствует всем требованиям п.п. 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (в редакции постановления Правительства Российской Федерации от 20 марта 2021 г. №426) Высшей аттестационной комиссии при Минобрнауки России, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а её автор, Попов Андрей Сергеевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки)».

**Официальный оппонент**

**Боделов**

Доктор технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой «Техническая  
эксплуатация радиоэлектронного  
оборудования воздушного  
транспорта» ФГБОУ ВО  
«Московский государственный  
технический университет  
гражданской авиации» (МГТУ ГА)

**Эдуард Анатольевич**

Дата: « 01 » 11 2022 г.

Подпись официального оппонента Боделова Э.А. заверяю.

Проректор по НР  
д.т.н, профессор



**В.В. Воробьев**

Полное наименование организации:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА).

Адрес организации: 125993, г. Москва, Кронштадтский бульвар, д.20.

Телефон: +7-916-2753184, e-mail: e.bolelov@mstuca.aero

С отзывом ознакомлен

08.11.2022