



Государственный научный центр Российской Федерации  
Федеральное автономное учреждение

**ЦЕНТРАЛЬНЫЙ  
АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени профессора Н.Е. Жуковского  
ФАУ «ЦАГИ»**

Жуковского ул., д. 1, г. Жуковский, Московская область, 140180  
тел.: +7 495 556-4303, факс: +7 495 777-6332, www.tsagi.ru  
ОГРН 1225000018803, ИНН 5040177331, КПП 504001001, ОКПО 50205960

01.11.2022 № КС 2/15-10-10187

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор

ФАУ «Центральный

аэрогидродинамический институт

имени профессора Н.Е. Жуковского»

д.т.н., профессор,

член-корреспондент РАН

К.И. Сыпало

« 28 » \_\_\_\_\_ 2022 г.



### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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 темы.** Постоянный рост интенсивности воздушного движения приводит к необходимости совершенствования системы организации воздушного движения (ОРВД). Совершенствование может заключаться как в модернизации структуры воздушного пространства при появлении новых технологий, например, зональной навигации, позволяющей строить более эффективные маршруты, так и в улучшении наземной составляющей системы, в первую очередь, инфраструктуры аэродрома. Однако, и в том и другом случае возникает задача оценки эффективности решений, которые закладываются при модернизации. Эффективность

Отдел документационного  
обеспечения МАИ

« 8 » 11 2022

000106

использования структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома зависит от многих факторов, среди которых:

- структура воздушного пространства (маршруты обслуживания воздушного движения (ОВД), схемы маневрирования, секторизация);
- технология работы диспетчерского состава, включая взаимодействие со смежными районными центрами;
- движение воздушных судов по поверхности аэродрома и их взаимодействие с диспетчерским составом, обслуживающим полет по маршруту ОВД;
- взаимодействие диспетчеров по управлению воздушным движением с центром планирования использования воздушного пространства;
- взаимодействие с центрами управления полетов авиакомпаний;
- наличие средств поддержки диспетчера с целью повышения пропускной способности, эффективности, пунктуальности выполнения полетов.

Учесть многофакторность задачи с использованием аналитических выражений ввиду своей сложности не представляется возможным. Совершенствование структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома выполняется в интересах и с привлечением всех заинтересованных лиц, включая авиакомпании, провайдеров аэронавигационных услуг, операторов аэропортов, регулирующих органов, авиационных властей и т.д., где каждый участник имеет свои критерии и показатели эффективности.

Существующие подходы направлены на решение однокритериальных задач по одной группе показателей, а также базируются, в основном, на аналитических расчётах.

Актуальность работы также обусловлена отсутствием методов и решений, позволяющих проводить оценку эффективности использования не только существующей структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома, но и исследовать перспективные варианты на

основе прогнозных моделей в условиях увеличенной интенсивности воздушного движения.

### **Структура и основное содержание диссертационной работы**

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.

Работа четко структурирована, содержит все необходимые для диссертации элементы.

*Во введении* сформулирована цель исследования, для достижения поставленной цели определена научная задача. Обосновывается актуальность темы диссертации и практическая значимость работы. Определена научная новизна, представлены основные научные результаты, выносимые на защиту. Приведены основные результаты апробации работы и реализации результатов работы.

*В первой главе* проведено обоснование целесообразности применения математического моделирования для решения задачи выбора альтернативного варианта структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома на основе сравнительного анализа. Рассмотрены различные варианты применения имитационного моделирования для оценки эффективности использования воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома, в основе которых лежит создание математических моделей процессов и элементов системы ОрВД. Выполнен анализ применения моделирования для решения поставленной задачи на разных этапах полёта воздушного судна: на маршруте, при полёте в диспетчерской зоне района аэродрома или терминальной зоне и при движении на поверхности аэродрома. Рассмотрены общие принципы построения средств имитационного моделирования системы

ОрВД. Проанализированы существующие зарубежные решения в части инструментов ускоренного моделирования системы ОрВД.

Автор сформулировал постановку задачи поиска оптимальной структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома. В качестве критерия эффективности определены группы показателей, которые характеризуют интересы разных заинтересованных лиц в системе ОрВД. Представлено определение структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома, какие элементы входят в их состав. Определены ограничения и условия использования структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома.

*Во второй главе* приведено описание математических моделей и алгоритмов расчёта показателей эффективности системы ОрВД, включая: пять показателей безопасности выполнения полётов, шесть показателей эксплуатационной эффективности для пользователей ВП, пять показателей эффективности системы ОрВД и по два показателя для групп, характеризующих пропускную способность воздушного пространства, пропускную способность аэродрома и влияние на окружающую среду. По каждому показателю представлен алгоритм с учётом рекомендаций ИКАО. Расчёты основаны на результатах математического моделирования структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома.

Предложен метод решения многокритериальной задачи выбора наилучшего варианта структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома, который сводится к решению одной или последовательности однокритериальных задач. Применяется метод последовательных уступок, где группы и показатели ранжируются по значению на основе экспертной оценки.

*В третьей главе* представлено описание комплекса имитационного моделирования системы организации воздушного движения, его состав и структура. Предложена архитектура и схема взаимодействия расчетных и имитационных моделей. Модели разделены на блоки по функциональному

значению: импортирование и подготовка данных, синтез структуры ВП и потоков ВС, моделирование и расчёт показателей. Приведено описание моделей, входящих в комплекс, их назначение и примеры реализации.

Автор приводит описание алгоритмов и ключевых решений для проведения моделирования, включая алгоритмы формирования случайных потоков ВС, формирования бесконфликтной очереди прибывающих и вылетающих ВС, обнаружения потенциальных конфликтных ситуаций, расстановки ВС по местам стоянок и построения маршрутов руления ВС по поверхности аэродрома.

**В четвертой главе** представлена методика проведения исследований по анализу эффективности использования воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома. Методика позволяет решать задачи отдельно для верхнего воздушного пространства, воздушного пространства района аэродрома, поверхности аэродрома, а также проводить комплексные исследования, включая все этапы полета. В работе приведены описание и результаты исследований по оценке эффективности трех вариантов структуры воздушного пространства. По каждому варианту было проведено моделирование, рассчитаны показатели и с учётом предложенного метода выбран рациональный вариант. На основе проведенных исследований предложены рекомендации по повышению эффективности использования структуры воздушного пространства.

**В заключении** представлены научно-методические и практические результаты работы.

#### **Научные результаты диссертации и их новизна.**

Научная новизна диссертационного исследования Попова А.С. заключается в следующем:

1. Математические модели элементов и процессов системы ОрВД 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 в существующих и перспективных потоках воздушного движения.

2. Метод выбора рационального варианта структуры ВП и инфраструктуры аэродрома 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, включающего формирование приоритетного ряда показателей.

3. Система показателей эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома и алгоритмы их расчета отличается комплексным учетом современных требований к структуре ВП и инфраструктуре аэродрома, а также многодисциплинарным подходом к оценке их использования за счет включения разнородных групп показателей: безопасности полетов, пропускной способности ВП и аэродрома, эффективности для пользователей ВП, эффективности для системы ОрВД, влияния на окружающую среду в интересах участников системы ОрВД.

4. Методика оценки эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома отличается от известных методик тем, что оценка выполняется путем расчетного и имитационного моделирования процессов ОрВД с использованием разработанной системы показателей и позволяет проводить комплексные исследования, включая воздушное пространства и инфраструктуру аэродрома.

5. Комплекс программ для оценки эффективности использования структуры ВП и инфраструктуры аэродрома, разработанный на основе методов 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), 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 и практическая значимость**

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в применении комбинации аналитического и имитационного моделирования для решения задач анализа использования воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома и выбора наилучшего варианта на основе сравнительного анализа.

Практическая значимость работы заключается в реализации комплекса имитационного моделирования системы организации воздушного движения и внедрении его во ФГУП «Госкорпорация по ОрВД» - национального провайдера аэронавигационных услуг, что подтверждается соответствующими актами о внедрении.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов** обосновывается применением разработанного комплекса, системы показателей эффективности при выполнении работ по оценке и выбору структуры воздушного пространства Московской зоны ЕС ОрВД и смежных с ней зон на основе сравнительного анализа и последующим внедрением структуры воздушного пространства в эксплуатацию.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.**

Полученные результаты диссертационной работы рекомендуется использовать на практике в следующих процессах и организациях:

- на предприятии национального провайдера аэронавигационных услуг (ФГУП «Государственная корпорация по организации воздушного движения в Российской Федерации») для поддержки принятия решений при внедрении

перспективных вариантов структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома на основе сравнительного анализа альтернативных вариантов, а также оценки эксплуатационных характеристик существующих структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома по показателям эффективности;

- в аэропортах (АО «Домодедово» и др.) для анализа операций на поверхности аэродрома, а также при оценке проектов по развитию аэродрома;

- в научно-исследовательских институтах (ФАУ «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации») для проведения исследований по оценке эффективности существующих и перспективных вариантов структуры воздушного пространства и инфраструктуры аэродрома;

- в авиакомпаниях (ПАО «Аэрофлот» и др.) для оценки эффективности использования сети маршрутов ОВД и схем маневрирования.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Из текста диссертации непонятно, возможно ли моделировать и оценивать процессы планирования полётов авиакомпаниями и провайдером аэронавигационных услуг.

2. Нет полного понимания, моделируется ли пассажиропоток в терминалах аэропорта?

3. В работе не представлены основные характеристики модели среднесрочного обнаружения потенциальных конфликтных ситуаций, например глубина их обнаружения.

Недостатки, отмеченные в отзыве, носят частный характер и не снижают научной и практической ценности результатов исследования, а также не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Попова А.С.



## **Заключение по диссертационной работе**

Диссертационная работа Попова Андрея Сергеевича представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, которая посвящена актуальной научной проблеме, имеющей практическое и теоретическое значение. Работа выполнена на высоком научно-техническом уровне. Автореферат соответствует и в полном объёме отражает содержание диссертации. Автор является соавтором семи статей, опубликованных в журналах, рекомендованных ВАК, и одной, индексируемой в системе научного цитирования «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, 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)».

Отзыв ведущей организации о диссертационной работе 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)» обсужден и утвержден на заседании научно-технического совета (НТС) научно-исследовательского центра безопасности полета (НИЦ БП) ФАУ «ЦАГИ» (протокол № 45 от 24.10.2022г).

**Баженов Сергей Георгиевич,**

Доктор технических наук, начальник НИО-15, НИЦ БП ФАУ «ЦАГИ».

Электронная почта: [sergey.bazhenov@tsagi.ru](mailto:sergey.bazhenov@tsagi.ru),

тел. +7 (495) 556-45-06, +7 (910) 478-41-36

Федерально автономное учреждение

«Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФАУ «ЦАГИ»)

РФ 140180, г. Жуковский, Московская область, ул. Жуковского, 1

Контактный телефон: +7(495)556-43-03

Веб-сайт: <http://www.tsagi.ru>

Электронная почта: [info@tsagi.ru](mailto:info@tsagi.ru)

С ответом  
ознакомлен  
08.11.2022