

Том 23, № 06, 2020

ISSN 2079-0619

e-ISSN 2542-0119

Научный Вестник МГТУ ГА

Civil Aviation High TECHNOLOGIES

Vol. 23, No. 06, 2020

Издается с 1998 г.

Москва
2020

Научный Вестник МГТУ ГА решением Президиума ВАК Министерства образования и науки РФ включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Главная редакция

Главный редактор: *Елисеев Б.П.*, заслуженный юрист РФ, проф., д. ю. н., ректор МГТУ ГА, Москва, Россия.

Зам. главного редактора: *Воробьев В.В.*, проф., д. т. н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия.

Ответственные секретари главной редакции: *Наумова Т.В.*, доцент, к. филос. н., доцент кафедры МГТУ ГА, Москва, Россия;
Полешкина И.О., доцент, к. э. н., доцент кафедры МГТУ ГА, Москва, Россия.

Члены главной редакции:

Козлов А.И., заслуженный деятель науки и техники РФ, проф., д. ф.-м. н., советник ректората МГТУ ГА, Москва, Россия;

Гаранина О.Д., почетный работник науки и техники РФ, проф., д. филос. н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

Туркин И.К., проф., д. т. н., зав. каф. МАИ (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

Калугин В.Т., проф., д. т. н., декан МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия;

Лукин Д.С., заслуженный деятель науки РФ, проф., д. ф.-м. н., проф. МФТИ, Москва, Россия;

Шапкин В.С., заслуженный работник транспорта РФ, проф., д. т. н., первый заместитель генерального директора Национального исследовательского центра «Институт имени Н.Е. Жуковского», Москва, Россия;

Боев С.Ф., проф., д. т. н., д. э. н., генеральный директор Межгосударственной акционерной корпорации «Вымпел», Москва, Россия;

Дамиан Ривас Ривас, проф., PhD, проф. Университета Севильи, Севилья, Испания;

Сюй Хаудзюнь, PhD, Университет военно-воздушных сил, Хянань, Китай;

Франческа де Кресценцио, профессор, кафедра промышленной инженерии, Болонский университет, Болонья, Италия;

Владимир Немец, PhD, Транспортный факультет Яна Пернера, кафедра воздушного транспорта, Университет Пардубице, Пардубице, Чешская Республика;

Станислав Сзабо, PhD, Факультет авиационной техники, Технический университет в Кошице, Кошице, Словацкая Республика.

Сайт: <http://avia.mstuca.ru>

E-mail: vestnik@mstuca.aero

Тел.: +7 (499) 459-07-16

Плата за публикацию в Научном Вестнике МГТУ ГА с аспирантов не взимается

Chief Editorial Board

- Editor-in-chief:** *Boris Eliseev*, Professor, Doctor of Sciences, Rector, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;
- Deputy Editor-in-chief:** *Vadim Vorobyev*, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;
- Executive Secretaries:** *Tatiana Naumova*, Associate Professor, Candidate of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;
Irina Poleshkina, Associate Professor, Candidate of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia.

Members of the Chief Editorial Board:

Anatoly I. Kozlov, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Olga D. Garanina, Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Igor K. Turkin, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia;

Vladimir T. Kalugin, Professor, Doctor of Sciences, Dean, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia;

Dmitry S. Lukin, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia;

Vacily S. Shapkin, Honored Worker of Transport of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, First Deputy General Director, The National Research Center "Zhukovsky Institute" Moscow, Russia;

Sergey F. Boev, Professor, Doctor of Sciences, General Director, Interstate Joint Stock Corporation "Vimpel", Moscow, Russia;

Damian Rivas Rivas, Professor, PhD, University of Seville, Seville, Spain;

Xu Haojun, PhD, Air Force Engineering University, Xi'an, China;

Francesca De Crescenzo, Professor, Department of Industrial Engineering DIN, University of Bologna, Bologna, Italy;

Vladimir Němec, PhD, Faculty of Transportation Sciences, Jan Perner Transport Faculty, University of Pardubice, Pardubice, Czech Republic;

Stanislav Szabo, Associate Professor, PhD, Dean, Faculty of Aeronautics, Technical University of Košice, Košice, Slovak Republic.

Редакционный совет

Абрамов О.В., заслуженный деятель науки РФ, проф., д. т. н., Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия;

Акинишин Р.Н., проф., д. т. н., в. н. с., секция оборонных проблем МО РФ при президенте РАН, Москва, Россия;

Бачкало Б.И., проф., д. т. н., в. н. с. ЦНИИ ВВС МО РФ, Щелково, Россия;

Брусов В.С., проф., д. т. н., проф. МАИ (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

Вышинский В.В., проф., д. т. н., проф. МФТИ, г. н. с. ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Россия;

Горелик А.Г., проф., д. ф-м. н., проф. МИФИ, Москва, Россия;

Гузий А.Г., д. т. н., зам. директора ПАО «Авиакомпания «ЮТэйр», Москва, Россия;

Давидов А.О., доцент, д. т. н., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина;

Красильщик И.С., проф., д. ф-м. н., проф. МНУ, Москва, Россия;

Кубланов М.С., проф., д. т. н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

Кузнецов В.Л., проф., д. т. н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия;

Кузнецов С.В., проф., д. т. н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия;

Логвин А.И., заслуженный деятель науки РФ, проф., д. т. н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

Нечаев Е.Е., проф., д. т. н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия;

Пантелеев А.В., проф., д. ф-м. н., зав. каф. МАИ (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

Рухлинский В.М., д. т. н., председатель комиссии МАК по связям с Международной организацией гражданской авиации, Москва, Россия;

Самохин А.В., д. т. н., проф. МГТУ ГА, Москва, Россия;

Сарычев В.А., проф., д. т. н., г. н. с. АО «Радар-ММС», Санкт-Петербург, Россия;

Татаринов В.Н., действительный член Академии электромагнетизма США, проф., д. т. н., проф. ТУСУР, Томск, Россия;

Увайсов С.У., проф., д. т. н., зав. каф. МТУ, Москва, Россия;

Халютин С.П., проф., д. т. н., ген. директор ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт», Москва, Россия;

Харитонов С.А., проф., д. т. н., зав. каф. НГТУ, Новосибирск, Россия;

Ходаковский В.А., заслуженный деятель науки ЛССР, проф., д. т. н., Рига, Латвия;

Чинючин Ю.М., проф., д. т. н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

Шахтарин Б.И., академик РАЕН, заслуженный деятель науки и техники РФ, проф., д. т. н., проф. МГТУ им. Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

Юрков Н.К., заслуженный деятель науки РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, проф., д. т. н., проф. ПГУ, Пенза, Россия.

Editorial Council

Oleg V. Abramov, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia;

Ruslan N. Akinshin, Professor, Doctor of Sciences, Section of Applied Problems under the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

Boris I. Bachkalo, Professor, Doctor of Sciences, Leading Research Fellow, Russian Air Force Central Scientific Research Institute of Ministry of Defence, Shchelkovo, Russia;

Vladimir S. Brusov, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia;

Viktor V. Vyshinsky, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Institute of Physics and Technology, Chief Research Fellow, Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovskiy, Russia;

Andrey G. Gorelik, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia;

Anatoliy G. Guziy, Doctor of Sciences, UTair Airlines, Moscow, Russia;

Albert O. Davidov, Assistant Professor, Doctor of Sciences, National Aerospace University Kharkiv Aviation Institute, Kharkiv, Ukraine;

Iosif S. Krasilschik, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Independent University, Moscow, Russia;

Michael S. Kublanov, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Valeriy L. Kuznetsov, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Sergey V. Kuznetsov, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Aleksandr I. Logvin, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation Moscow, Russia;

Evgeniy E. Nechaev, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Andrey V. Panteleev, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia;

Victor M. Rukhlinskiy, Doctor of Sciences, Chairman of the Commission for Relations with ICAO Board, International and Interstate Organizations of the Interstate Aviation Committee, Moscow, Russia;

Aleksey V. Samokhin, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia.

Valentin A. Sarychev, Professor, Doctor of Sciences, "Radar-MMS" Joint-Stock Company, St.Petersburg, Russia;

Viktor N. Tatarinov, Actual Member of the US Electrical Magnetism Academy, Professor, Doctor of Sciences, Tomsk State Radio Electronic and Control Systems University, Tomsk, Russia;

Saygid U. Uvaysov, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Technological University, Moscow, Russia;

Sergey P. Khalyutin, Professor, Doctor of Sciences, Director General, CEO LLC "Experimental laboratory NaukaSoft", Moscow, Russia;

Sergey A. Kharitonov, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia;

Vladimir A. Hodakovsky, Honored Worker of Science of Latvian Soviet Socialist Republic, Professor, Doctor of Sciences, Riga, Latvia;

Yuriy M. Chinyuchin, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

Boris I. Shakhtarin, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia;

Nikolay K. Urkov, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Penza State University, Penza, Russia.

СОДЕРЖАНИЕ

ТРАНСПОРТ

Борисов В.Е., Борсоев В.А., Бондаренко А.А.

Разработка перспективных тренажеров, имеющих голосовую поддержку, с функцией автоматизации оценки навыков диспетчеров по управлению воздушным движением 8

Buraimah I.J.

Using modern clustering techniques for parametric fault diagnostics of turbofan engines 20

Кирпичев И.Г., Петров Д.В., Чинючин Ю.М.

Многофункциональная интегрированная платформа сопровождения технической эксплуатации воздушных судов 28

Куц К.А.

Совершенствование алгоритма определения зон оперирования дальнемагистральных самолетов 40

Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б.

Формирование частных критериев эффективности А-СДМ с учетом интересов участников процесса принятия решений в динамической обстановке 53

Poleshkina I.O.

Transportation of perishable goods by air: handling problems at Russian airports 65

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

Dianov S.V., Novichkov V.M.

System based approach to the design of tension sensing element made of modified diamond 84

Михайлов Ю.С.

Повышение эффективности механизации стреловидного крыла 101

CONTENTS

TRANSPORT

Borisov V.E., Borsoev V.A., Bondarenko A.A.

Development of advanced voice-supported simulators with the function of automated estimation of air traffic controllers skills 8

Buraimah I.J.

Using modern clustering techniques for parametric fault diagnostics of turbofan engines 20

Kirpichev I.G., Petrov D.V., Chinyuchin Yu.M.

Multi-functional integrated technical support platform of aircraft maintenance 28

Kuts K.A.

Improving the algorithm for determining the areas of operation of long-range aircraft 40

Lebedev G.N., Malygin V.B.

Creating private criteria for A-CDM effectiveness to take into account the interests of decision-making participants in a dynamic environment 53

Poleshkina I.O.

Transportation of perishable goods by air: handling problems at Russian airports 65

AVIATION, ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

Dianov S.V., Novichkov V.M.

System based approach to the design of tension sensing element made of modified diamond 84

Mikhailov Yu.S.

Increase in high-lift devices efficiency of swept wing 101

ТРАНСПОРТ

05.22.01 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;

05.22.08 – Управление процессами перевозок;

05.22.13 – Навигация и управление воздушным движением;

05.22.14 – Эксплуатация воздушного транспорта

УДК 621.396.96

DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-6-8-19

РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТРЕНАЖЕРОВ, ИМЕЮЩИХ ГОЛОСОВУЮ ПОДДЕРЖКУ, С ФУНКЦИЕЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ОЦЕНКИ НАВЫКОВ ДИСПЕТЧЕРОВ ПО УПРАВЛЕНИЮ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ

В.Е. БОРИСОВ¹, В.А. БОРСОВ², А.А. БОНДАРЕНКО¹

¹*Ульяновский институт гражданской авиации*

им. Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, г. Ульяновск, Россия

²*Институт аэронавигации, г. Москва, Россия*

По данным Всемирной организации здравоохранения число потенциальных патогенов во всем мире очень велико, что повышает вероятность возникновения новой пандемии. Воздействие новой коронавирусной инфекции (Covid-19) на все сферы деятельности человека, в том числе и на авиатранспортную отрасль, показало, что необходимо учитывать возможности ее функционирования в новых условиях. В процессе исследования была рассмотрена возможность использования автоматизированных модульных тренажерных систем для подготовки диспетчеров УВД в режиме удаленного доступа. В известных тренажерах не реализована обоснованная инструментальная процедура измерения полученных навыков по обслуживанию воздушного движения, и оценку их освоения осуществляет инструктор, реагирующий на основе своего опыта на действия обучаемого. Инструктору сложно контролировать развитие отдельных навыков и приходится полагаться на свой опыт. Для моделирования контура «диспетчер-пилот ВС» привлекаются псевдо-пилоты, вручную осуществляющие ввод параметров полета ВС и имитирующие радиообмен с экипажами. Известные тренажеры не позволяют проводить самостоятельные тренировки. В результате был сформирован облик и разработан перспективный тренажер с функцией автоматизации подготовки и голосовой поддержкой. Была проведена проверка эффективности предложенных решений по сравнению с традиционным подходом к тренажерной подготовке. В результате установлено, что после использования специального тренажера ошибки студентов уменьшились. Впоследствии тренажер был использован для практической подготовки студентов при организации дистанционного обучения в условиях пандемии (Covid-19). Проект показал свою жизнеспособность и возможность проведения удаленных тренировок диспетчеров УВД после соответствующей доработки перспективного тренажера.

Ключевые слова: управление воздушным движением, тренажерная подготовка, голосовая система, автоматизация.

ВВЕДЕНИЕ

В 2020 г. широкое распространение новой коронавирусной инфекции (Covid-19) стало серьезным препятствием для нормального функционирования авиатранспортной отрасли. Однако, несмотря на пандемию, возросла потребность в срочной доставке медицинских препаратов и оборудования. Провайдеры аэронавигационных услуг продолжали обслуживать воздушное движение. В начале июня 2020 г. остро встал вопрос о прохождении курсов повышения квалификации диспетчеров по управлению воздушным движением (УВД) Госкорпорации по ОрВД. Распространение новой коронавирусной инфекции оказало влияние на все виды деятельности человека, в том числе на процесс подготовки и повышения квалификации авиационного персонала, что актуализировало поиск новых форм и методов подготовки. В докладе Министра науки и высшего

образования России В.Н. Фалькова в рамках VI заседания Общественного совета при Минобрнауки России отмечается, что при работе вузов в условиях пандемии проявилась необходимость разработки и реализации новой комбинированной модели образовательного процесса¹.

По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) число потенциальных патогенов во всем мире очень велико, а перечень заболеваний, имеющих эпидемический потенциал, не является исчерпывающим и в нем не указаны наиболее вероятные причины следующей эпидемии. В начале этого года ВОЗ опубликовала список патогенов, которые могут вызвать следующую глобальную пандемию². По данным университета Джона Хопкинса в дикой природе может существовать еще порядка 1,7 миллиона нераскрытых вирусов, а рост численности населения и стремительные экологические изменения повышают вероятность появления новой эпидемии уже в ближайшем будущем³. Это потребует готовности основных видов деятельности к новым вызовам.

В этих условиях необходимо совершенствование методов подготовки и повышения квалификации авиационного персонала с использованием дистанционных форм подготовки наряду с традиционным обучением. Здесь следует отметить, что подготовка диспетчеров УВД только с использованием дистанционных образовательных технологий недопустима, а их применение в качестве одного из элементов подлежит всесторонней оценке [1].

Предыдущие исследования в области применения дистанционного обучения при подготовке авиационного персонала в основном были направлены на автоматизацию теоретической подготовки и внедрение автоматизированных обучающих систем (АОС). При этом методы автоматизации процесса приобретения навыков по обслуживанию воздушного движения с помощью автоматизированных тренажерных систем исследованы недостаточно.

Направлениями совершенствования практической подготовки диспетчеров УВД с использованием тренажеров являются организация самостоятельной подготовки студентов с контролем со стороны инструкторов, в том числе в режиме удаленного доступа, и разработка перспективных тренажеров, имеющих голосовую поддержку, с функцией автоматизации оценки навыков.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В процессе исследования была рассмотрена возможность использования автоматизированных модульных тренажерных систем для подготовки диспетчеров УВД. Практическое обучение диспетчеров УВД на тренажере заключается в выработке сложных навыков по обслуживанию воздушного движения (ОВД), декомпозируемые на более простые навыки [2]. Применительно к обучению диспетчеров УВД можно выделить три типа навыков: моторные, когнитивные и метакогнитивные, которые развиваются со временем в процессе их практического освоения. На начальном этапе обучения новые задачи воспринимаются диспетчером УВД как когнитивно требовательные, но по мере их освоения некоторые из когнитивных действий становятся автоматизированными и поэтому навык требует меньше усилий для его выполнения. В процессе дальнейшего обучения это дает обучаемому возможность и способность находить решения для более сложных задач⁴. В известных тренажерах не реализована обоснованная инструмен-

¹ Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. Материалы VI заседания общественного совета при Минобрнауки России 03.07.2020. [Электронный ресурс]. URL: https://minobrnauki.gov.ru/ru/press-center/card/?id_4=2777 (дата обращения: 15.07.2020).

² Всемирная организация здравоохранения. Определение приоритетности болезней для научных исследований и разработок в чрезвычайных ситуациях [Электронный ресурс]. URL: <https://www.who.int/activities/prioritizing-diseases-for-research-and-development-in-emergency-contexts> (дата обращения: 15.07.2020).

³ Live Science. Why Scientists Are Rushing to Hunt Down 1.7 Million Unknown Viruses The Learning Company [Электронный ресурс]. URL: <https://www.livescience.com/61848-scientists-hunt-unknown-viruses.html> (дата обращения: 15.07.2020).

⁴ Руководство по обучению и оценке диспетчеров УВД на основе компетенций. Doc.10056. ICAO, 2016.

тальная процедура измерения полученных навыков и степень освоения навыков по ОВД осуществляет инструктор, реагирующий на основе своего опыта на действия обучаемого в процессе моделирования воздушного движения [3].

Исследования реальных процессов ОВД позволяют утверждать, что изменение интенсивности воздушного движения $\lambda_{вд}$ и плотности потока ВС $\rho_{вс}$ с течением времени можно рассматривать как одномерные стационарные Марковские процессы и редкие выбросы, характеризующие усложнение воздушной обстановки [4]. Взяв их за основу при моделировании тренажерной подготовки, можно создать обучающие последовательности, формирующие необходимую степень подготовки, состоящую из заданной последовательности навыков $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$.

Процесс приобретения профессиональных навыков диспетчером УВД с достаточной степенью приближения можно описать уравнением:

$$\frac{1}{\alpha} \frac{dS}{dT} + S = Z, \quad (1)$$

где S – степень подготовки; Z – заданный уровень подготовки; T – общее время на тренажерную подготовку; α – параметр процесса обучения, характеризующий его скорость.

Заданный уровень подготовки можно рассматривать как составной комплексный критерий, представленный как совокупность частных показателей, которые в свою очередь характеризуют подготовку диспетчера УВД по различным критериям. Некоторые параметры поддаются инструментальной оценке как частные показатели, полученные в результате сравнения измеряемых параметров [5]. Каждому частному показателю соответствуют весовые коэффициенты, характеризующие меру значимости каждого показателя. Весовые коэффициенты значимости частных показателей определяют суммарное значение комплексного критерия уровня подготовки. Причем базовые значения весовых коэффициентов различны для каждого этапа подготовки и изменяются при проигрыше контрольного упражнения k в зависимости от сложности упражнений [6, 7]. Расчет параметров подготовки диспетчера УВД может быть представлен в виде выражения:

$$Z_k = \sum_{n=1}^S W_n^k I_n, \quad (2)$$

где W_n^k – весовые коэффициенты, характеризующие меру значимости n -го частного показателя при выполнении k -го упражнения; $k=1, m, I_n$ – частные показатели, определяющие уровень подготовки. При этом соблюдается условие:

$$\sum_{n=1}^S W_n^k = 1 \quad W_n^k \geq 0. \quad (3)$$

Итоговый уровень подготовки определяется по комплексу контрольных упражнений:

$$Z_s = \sum_{k=1}^{k=m} Z_k. \quad (4)$$

Частные показатели нормируются относительно их предельных значений:

$$I_n^H = I_n / I_n^P, \quad (5)$$

где I_n^P – нормированное значение частного показателя; $I_n^P \geq I_n$ и $0 \leq I_n^P \leq 1$ [8, 9].

В процессе исследования был проведен анализ современных тренажеров для подготовки диспетчеров УВД отечественного и зарубежного производства, который позволил выделить общие конструктивные элементы и принципы построения известных тренажеров (рис. 1).

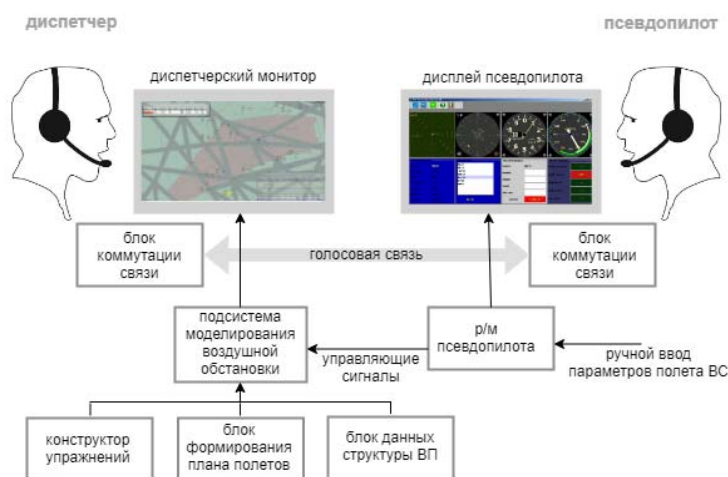


Рис. 1. Обобщенная схема тренажера УВД
Fig. 1. Generalized diagram of ATC simulator

Основным элементом тренажера является рабочее место диспетчера УВД со средствами отображения информации и связи (пульт диспетчера) с заданной степенью достоверности воспроизводящее реальные органы управления и отображения информации. Для моделирования контура «диспетчер-пилот ВС» привлекаются пилоты-операторы (псевдо-пилоты), когда через симуляцию радиосвязи диспетчер передает команды псевдо-пилотам, которые соответствующим образом «управляют» воздушными судами (ВС) и «ведут радиосвязь» с диспетчером. В зависимости от количества ВС, за которых должен работать псевдо-пилот, ввод параметров их движения и радиообмен приводит к очень высокой рабочей нагрузке. Иногда это вызывает задержки или ошибочные ответы пилота. Очевидно, что способность псевдо-пилотов правильно и своевременно реагировать на команды диспетчера имеет решающее значение для качества моделирования. Поэтому требуется хорошая подготовка и достаточное количество псевдо-пилотов. К примеру, в тренажере «Эксперт» для четырнадцати рабочих мест требуется не менее семи псевдо-пилотов.

Известные тренажеры не обеспечивают в полном объеме проведение всех видов тренировок [10]. При традиционном подходе к тренажерной подготовке модульный этап обучения предполагает наличие одного псевдо-пилота и одного инструктора для одного студента, что на практике не всегда осуществимо [11]. Федеральные государственные образовательные стандарты⁵ предусматривают самостоятельную подготовку студентов в объеме до 60% учебного вре-

⁵ Федеральный государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования по направлению подготовки (специальности) 162001 эксплуатация воздушных судов и организация воздушного движения (квалификация (степень) "специалист"), утвержден приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 24 января 2011 г. № 83.

мени, однако существующие подходы к тренажерной подготовке не предусматривают самостоятельные тренировки на тренажере, т.к. в известных тренажерах не реализована инструментальная процедура измерения навыков, полученных обучаемым.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате был сформирован облик перспективного тренажера для подготовки диспетчеров УВД, обеспечивающего весь цикл подготовки за счет поддержки проведения полного автоматизированного обучения, имеющего встроенную голосовую систему, имитирующую ведение радиообмена с экипажами. Перспективный тренажер должен относиться к классу высокоточных тренажеров, полностью имитировать воздушную обстановку, иметь интуитивно понятный интерфейс и базу упражнений. Конструктивно разрабатываться по модульному принципу с возможностью изменения и наращивания количества модулей.

Наиболее сложными задачами на пути реализации данного проекта стали: автоматизация тренажерной подготовки и голосовое управление. Предыдущие исследования показывают, что основные трудности при решении задачи автоматизации тренажерной подготовки специалистов по управлению воздушным движением заключаются в отсутствии инструментов и обоснованной процедуры измерения уровня подготовки [12]. В результате проведенных исследований была предложена адекватная процедура измерения полученных навыков и разработаны сложные алгоритмы управления тренажерной подготовкой, основанные на комплексном критерии [13, 14]. В частности предложено декомпозировать условную задачу по ОВД на отдельные операции, в которых можно выделить количественные значения контролируемых параметров. Отдельная задача представляется как совокупность навыков, результат освоения которых можно выразить количественно. Инструментальная процедура измерения навыков основывается на выделении контролируемых параметров, имеющих количественное выражение.

При решении задачи по разработке голосовой системы был использован метод языкового моделирования как менее ресурсоемкий по сравнению с методом акустического моделирования. Для построения нейронной сети использовалось приложение в Python с библиотекой Speech Recognition. Был использован метод контекстного распознавания речи [15] с транскрибированием определённого сегмента аудиофайла, без транскрибирования полной речи, т.к. радиообмен содержит ограниченное количество фонов. Системе достаточно распознать позывной ВС и подаваемую команду соответствующим фонемам, сравнить их с образцами в словаре и принять наиболее вероятную модель (табл. 1) [16]. Задача состоит в подборе параметров модели $\lambda = \{A, B, p\}$ по максимальному значению вероятности P соответствия заданной последовательности фонов.

Таблица 1
Table 1

Перечень команд в словаре
List of commands in the dictionary

№	Команда	№	Команда	№	Команда	№	Команда
1.	ONE	6.	SIX	11.	CLIMB TO	16.	FLY HEADING
2.	TWO	7.	SEVEN	12.	DESCEND TO	17.	RESUME OWN NAVIGATION
3.	THREE	8.	EIGHT	13.	FLIGHT LEVEL	18.	SIBERIA
4.	FOUR	9.	NINE	14.	TURN RIGHT	19.	AEROFLOT
5.	FIVE	10.	ZERO	15.	TURN LEFT	20.	CORRECTION

Первоначальный словарь содержал 20 команд. Параметры акустического канала: полоса пропускания в пределах 300–3500 Гц с адаптацией к акустической среде по фрагментам шума суммарной длиной не менее трех секунд. Вероятность правильного распознавания составляет – 83–85% при $SNR_3 = 0 \dots 6$ дБ. Программный сегмент моделирования воздушной обстановки был разработан в среде графического программирования Unity 3D на языке программирования C#. Движение ВС на экране монитора воссоздано на основе математических алгоритмов и векторных уравнений. Тренажер позволяет осуществлять тренировку в эшелонировании ВС и управлении ВС по направлению, в том числе выполнение процедуры векторения.

С целью проверки эффективности предложенных решений по сравнению с традиционным подходом к тренажерной подготовке была проверена эффективность автоматизированного тренажера в течение 2019 г. в процессе обучения студентов. В экспериментальную и контрольную группу были отобраны студенты диспетчеры УВД по 35 человек в каждую группу в целях выдерживания коэффициента корреляции выше 0,35. В группы были отобраны в равном количестве студенты мужского и женского пола в возрасте от 22 до 23 лет с одинаковым начальным уровнем подготовки таким образом, чтобы в экспериментальную группу были отобраны испытуемые с соответствующими характеристиками, представляющими генеральную совокупность. В связи с тем, что при проведении эксперимента исследовались поведенческие аспекты, такие, как параметры вербального и невербального поведения, в качестве зависимых переменных были выбраны: точность и время реакции, выраженных через количество ошибок, и время, затраченное испытуемыми на решение поставленных задач. Эффективность тренажера оценивалась по времени освоения процедуры векторения ВС. В качестве регистрируемых параметров были выбраны: погрешность в определении курса ВС $\Delta\psi_{\text{вс}}$ в градусах и время принятия решения t в микросекундах. Перед началом экспериментальной проверки была проведена проверка однородности групп по параметрическому критерию.

В результате было установлено, что после использования специального тренажера значения регистрируемых параметров стали выше в экспериментальной группе. Выборочные дисперсии для оценки погрешности в определении курса ($\Delta\psi_{\text{вс}}$): $S_{x1}^2 = 36,585$ – в экспериментальной группе, $S_{y1}^2 = 27,701$ – в контрольной группе, стандартная ошибка разности арифметических средних: $\sigma_{x-y} = 1,898$, а $t_{\text{эмп.}} = 2,29$ для оценки погрешности в определении курса ($t_{\text{эмп.}} = 2,29 < t_{\text{крит.}} = 1,995$) и $S_{x2}^2 = 29,806$, $S_{y2}^2 = 23,115$, $\sigma_{x-y} = 1,556$, $t_{\text{эмп.}} = 2,205$ соответственно для оценки времени реакции ($t_{\text{эмп.}} = 2,205 < t_{\text{крит.}} = 1,995$). Для доказательства причинности связи между дополнительными тренировками с применением специального тренажера и повышением общего уровня навыков по ОВД была проведена проверка для двух связанных выборок с равным числом измерений в каждой и сделан вывод об эффективности экспериментального воздействия.

По результатам выполнения каждого упражнения фиксировались: $\bar{\delta}_{i,j,k}$ – средняя ошибка определения заданного курса j -м студентом во время выполнения i -го упражнения в k -й день; тренировки; $\bar{t}_{i,j,k}$ – среднее время реакции j -го студента во время выполнения i -го упражнения в k -й день тренировки [17]. В результате были получены средние значения ошибок определения курса и времени реакции:

$$\bar{\Delta}_{k,j} = \sum_{i=1}^{N_k} \bar{\delta}_{i,j,k}, \quad \bar{T}_{k,j} = \sum_{i=1}^{N_k} \bar{t}_{i,j,k}, \quad (6)$$

где N_k – число выполненных упражнений в k -м дне тренировки.

Полученные данные использовались для расчета средней ошибки определения курса ВС и среднего времени реакции всех студентов по дням тренировки. Зависимость времени реакции от количества тренировочных дней k приведена на рис. 2.

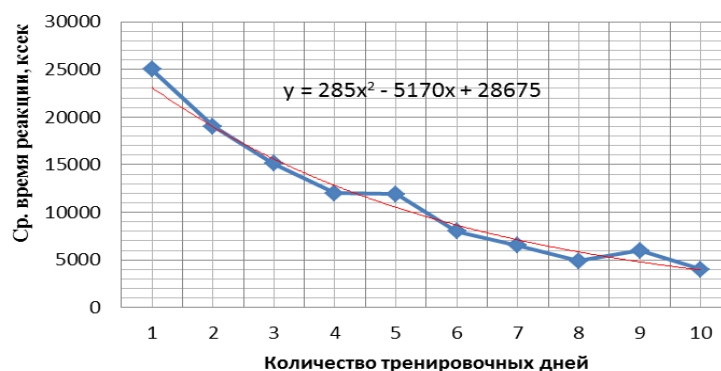


Рис. 2. Зависимость времени реакции от количества тренировочных дней
Fig. 2. Dependence of reaction time on the number of training days

Коэффициент корреляции между временем реакции и числом тренировочных занятий составил -0,934, то есть он обладает высокой силой связи. Эксперимент показал, что после применения автоматизированного тренажера с голосовым управлением ошибки студентов уменьшились на 18,57%.

Впоследствии тренажер был использован для практической подготовки студентов при организации дистанционного обучения в условиях пандемии, т.к. с программной точки зрения тренажер изначально состоял из клиентской и серверной частей, был построен на основе ПК и не требовал дорогостоящей аппаратной составляющей. Это позволило после срочной доработки серверной части использовать тренажер в режиме удаленного доступа для проведения тренировок студентов. В тренировках участвовало 84 студента в течение 1,5 месяцев. Тренажер использовался в полуавтоматическом режиме с привлечением псевдо-пилотов из числа студентов. При этом голосовая поддержка использовалась частично.

В результате была проведена апробация возможностей проведения тренировок как локально с модулей тренажерного центра, так и удаленно через специальную интернет платформу, и предложена схема организации удаленного доступа к автоматизированному модульному тренажеру (рис. 3).

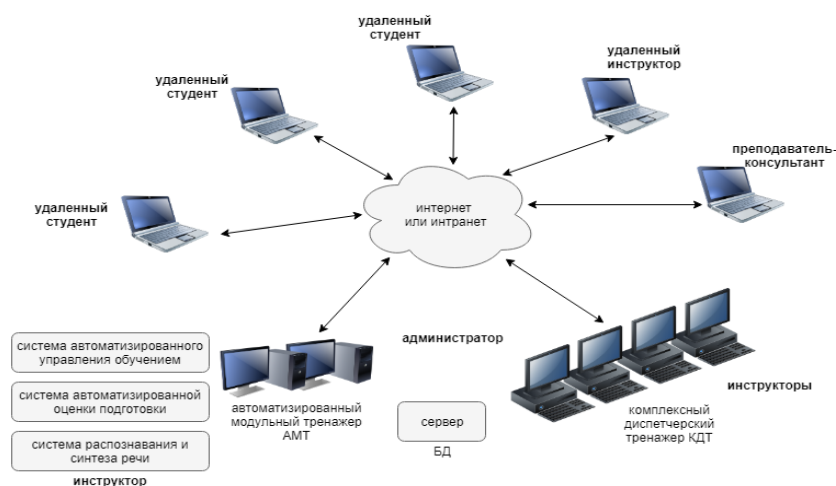


Рис. 3. Организация удаленного доступа к тренажеру
Fig. 3. Organization of remote access to the simulator

Проект показал свою жизнеспособность и возможность проведения удаленных тренировок диспетчеров УВД после соответствующей доработки перспективного тренажера.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследований показано, что из-за отсутствия в известных тренажерах обособленной инструментальной процедуры измерения полученных навыков по ОВД их оценку осуществляет инструктор, который на основании этого выполняет корректирующие действия. При этом инструктору не представляется возможным наблюдать за мыслительными процессами обучаемого и ему сложно контролировать развитие, например, таких компетенций, как ситуационная осведомленность, алгоритмы принятия решений и др. Делать выводы он может лишь из результатов действий обучаемого, что не всегда является следствием своевременных и правильных решений. Порой это ведет к неверным оценочным решениям из-за необходимости оценивать широкий спектр возможных проблем при обучении и причин их возникновения. К ним можно отнести случаи, когда обучаемый не использует инструменты и оборудование, повышающие эффективность ОВД, либо чрезмерно их использует и не уделяет достаточного внимания оценке воздушной обстановки, длительно обдумывает свои действия из-за недостаточности освоения стандартных процедур и т.д. Для полноценной подготовки каждому обучаемому, в идеале, необходим один инструктор, что на практике, как правило, не реализуется по соображениям рентабельности. Поэтому инструктору нужны инструменты для качественной оценки навыков обучаемых. Кроме того, известные тренажеры не приспособлены для тренировок диспетчеров УВД в режиме удаленного доступа, что снижает их эффективность в новых условиях.

Таким образом, направлениями совершенствования тренажерной подготовки диспетчеров по управлению воздушным движением могут являться:

1. Разработка перспективных тренажеров, имеющих голосовую поддержку, с функцией автоматизации оценки навыков по значениям среднеквадратических отклонений характеризующих уменьшение допускаемых погрешностей на основе оценки заданных параметров.
2. Использование перспективных тренажеров как элемента самостоятельной подготовки диспетчеров УВД с контролем со стороны инструкторов, в том числе в режиме удаленного доступа.
3. Организация тренажерной подготовки, основанной на чередовании комплексных и самостоятельных тренировок диспетчеров УВД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Updegrove J.A., Jafer S. Optimization of air traffic control training at the Federal Aviation Administration Academy [Электронный ресурс] // Aerospace. 2017. Vol. 4, iss. 4. 50. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace4040050> (дата обращения 20.08.2020).
2. Борисов В.Е., Карнаухов В.А. Методы формализации тренажерной подготовки диспетчеров управления воздушным движением // «Перспективы развития науки и образования»: материалы международной научно-практической конференции. Тамбов, 30 декабря 2017 г. С. 16–19.
3. Arminena I., Koskela I., Palukka H. Multimodal production of second pair parts in air traffic control training // Journal of Pragmatics. 2014. Vol. 65. Pp. 46–62. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pragma.2014.01.004>
4. Крыжановский Г.А., Цепляев Ю.Ф. К задаче управления процессами профессиональной подготовки авиадиспетчеров для автоматизированных систем управления воздушным движением // Автоматика и телемеханика. 1994. № 6. С. 140–153.
5. Крыжановский Г.А., Купин В.В. Развитие подходов к построению адаптивных автоматизированных систем управления воздушным движением. Часть I. Модели проблемно-

предметной области и деятельности оператора // Вестник Санкт-Петербургского ГУГА. 2016. № 2 (11). С. 38–51.

6. Лебедев А.М., Юганова Н.А. Представление критерия качества функцией, аргументами которой являются контролируемые параметры // Научный Вестник МГТУ ГА. 2009. № 149. С. 176–178.

7. Борисов В.Е., Борсоев В.А., Губерман И.Б. Методика построения программно-аппаратного комплекса для подготовки офицеров боевого управления // Организация воздушного движения и безопасность полетов. 2019. № 8. С. 25–27.

8. Иванов А.Ю., Панкова О.В., Плясовских А.П. Использование искусственного интеллекта в тренажёрных системах обучения руководству полётами на авиационных полигонах // Вестник воздушно-космической обороны. 2014. № 4 (4). С. 108–112.

9. Лапшин Э.В., Кемалов Б.К., Куатов Б.Ж. Проектирование авиационных тренажёров с распараллеливанием вычислительных процессов // Надёжность и качество сложных систем. 2016. № 4 (16). С. 128–141. DOI: 10.21685/2307-4205-2016-4-18

10. Arico P. A passive brain-computer interface application for the mental workload assessment on professional air traffic controllers during realistic air traffic control tasks / P. Arico, G. Borghini, G.Di. Flumeri, A. Colosimo, S. Pozzi, F. Babiloni // Progress in Brain Research. 2016. Vol. 228. Pp. 295–328. DOI: 10.1016/bs.pbr.2016.04.021

11. Reva O. Ergonomic assessment of instructors capability to conduct personality-oriented training for air traffic control (ATC) personnel / O. Reva, S. Borsuk, V. Shulgin, S. Nedbay // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 964. Pp. 783–793. DOI: 10.1007/978-3-030-20503-4_70

12. Коваленко Г.В. Совершенствование профессиональной подготовки летного и диспетчерского составов / Г.В. Коваленко, Г.А. Крыжановский, Н.Н. Сухих, Ю.Е. Хорошавцев. М.: Транспорт, 1996. 319 с.

13. Лапшин Э.В. Исследование информационных процессов, протекающих в тренажерах // Надёжность и качество сложных систем. 2013. № 2 (2). С. 87–93.

14. Горенков А.Н. Современные тренажёрные и моделирующие комплексы в системе профессиональной подготовки специалистов УВД // Транспортное дело России. 2016. № 4. С. 70–73.

15. Иванов А.Ю., Астапов К.А., Плясовских А.П. Некоторые вопросы построения систем голосового управления в тренажёрных комплексах управления воздушным движением гражданской авиации // Научный Вестник МГТУ ГА. 2013. № 198. С. 129–135.

16. Rustamov S. Speech recognition in flight simulator / S. Rustamov, E. Gasimov, R. Hasanov, S. Jahangirli, D. Usikov, E. Mustafayev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering «Aegean International Textile and Advanced Engineering Conference», 2018. Vol. 459. ID 012005. 5 p. DOI: 10.1088/1757-899X/459/1/012005

17. Купин В.В. Количественные характеристики мотивационной готовности активного элемента при управлении воздушным движением // Вестник Санкт-Петербургского ГУГА. 2017. № 4 (17). С. 38–51.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Борисов Владимир Евгеньевич, заведующий кафедрой управления воздушным движением и навигации Ульяновского института гражданской авиации им. Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, ve_borisov@mail.ru.

Борсоев Владимир Александрович, доктор технических наук, заведующий кафедрой навигационного обеспечения полетов и аэронавигационной информации Института аэронавигации, borsoev@aeronav.aero.

Бондаренко Александр Аркадьевич, кандидат технических наук, декан факультета летной эксплуатации и управления воздушным движением Ульяновского института гражданской авиации им. Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, baa69@yandex.ru.

DEVELOPMENT OF ADVANCED VOICE-SUPPORTED SIMULATORS WITH THE FUNCTION OF AUTOMATED ESTIMATION OF AIR TRAFFIC CONTROLLERS SKILLS

Vladimir E. Borisov¹, Vladimir A. Borsoev², Alexander A. Bondarenko¹

¹ *Ulyanovsk Institute of Civil Aviation named after Air Chief Marshal B.P. Bugaev, Ulyanovsk, Russia*

² *Air Navigation Institute, Moscow, Russia*

ABSTRACT

According to the World Health Organization, the number of potential pathogens worldwide is very high, which increases the likelihood of a new pandemic. The impact of the new coronavirus infection (Covid-19) on all spheres of human activity, including the air transport industry, has shown that it is necessary to take into account the possibilities of its functioning under the new conditions. During the research, the possibility of using automated modular training systems for the air traffic controllers training in the remote access mode has been considered. The well-known simulators do not implement a justified instrumental procedure for measuring the acquired skills in air traffic services and the assessment of their development is carried out by the instructor, who reacts to the student's actions on the basis of his experience. It is difficult for the instructor to control the development of a student's individual skills and he has to rely on his own experience. To simulate the controller-pilot contour, pseudo-pilots are involved, manually changing the flight parameters of the aircraft and simulating R/T communication. The well-known simulators do not allow independent training. As a result, a conceptual design was formed and a promising simulator with the function of training automation and voice support was developed. The effectiveness of the proposed solutions was tested in comparison with the traditional approach to simulator training. Eventually it was found that after using a special simulator, students' mistakes decreased. Subsequently, the simulator was used for practical training of students providing the distance learning in circumstances of pandemics (Covid-19). The project showed its viability and the ability to conduct remote training of air traffic controllers, after appropriate refinement of the promising simulator.

Key words: air traffic control, simulator training, voice system, automation.

REFERENCES

1. **Updegrave, J.A. and Jafer, S.** (2017). *Optimization of air traffic control training at the Federal Aviation Administration Academy*. Aerospace, vol. 4, issue 4, 50. DOI: <https://doi.org/10.3390/aerospace4040050> (accessed 20.08.2020).
2. **Borisov, V.E. and Karnaukhov, V.A.** (2017). *Metody formalizatsii trenazhernoy podgotovki dispetcherov upravleniya vozdushnym dvizheniyem* [Methods for formalizing ATC simulator training]. «Perspektivy razvitiya nauki i obrazovaniya»: materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [Materials of the international scientific and practical conference «Perspectives of the science and education development»], pp. 16–19. (in Russian)
3. **Arminena, I., Koskela, I. and Palukka, H.** (2014). *Multimodal production of second pair parts in air traffic control training*. Journal of Pragmatics, vol. 65, pp. 46–62. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pragma.2014.01.004>
4. **Kryzhanovsky, G.A. and Tseplyaev, Yu.F.** (1994). *On professional training of dispatchers for computerized systems of air traffic control*. Avtomatika i telemekhanika, no. 6, pp. 140–153. (in Russian)

5. Kryzhanovsky, G.A. and Kupin, V.V. (2016). *Development of approaches to creating the adaptive automated systems for air traffic control. Part I. The problem domain and operator's activity models*. Vestnik Sankt-Peterburgskogo GUGA, no. 2 (11), pp. 38–51. (in Russian)
6. Lebedev, A.M. and Yuganova, N.A. (2009). *The representation of the performance criterion as a function with the controllable parametric variables as the function argument*. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, no. 149, pp. 176–178. (in Russian)
7. Borisov, V.E., Borsoev, V.A. and Guberman, I.B. (2019). *Metodika postroyeniya programmno-apparatnogo kompleksa dlya podgotovki ofitserov boyevogo upravleniya* [Methods of building a hardware and software complex for combat control training officers]. Air traffic management and flight safety, no. 8, pp. 25–27. (in Russian)
8. Ivanov, A.Yu., Pankova, O.V. and Plyasovskikh, A.P. (2014). *Use of artificial intelligence in training systems of flighting management on air firing ground*. Vestnik vozdushno-kosmicheskoy oborony, no. 4 (4), pp. 108–112. (in Russian)
9. Lapshin, E.V., Kemalov, B.K. and Kuatov, B.Zh. (2016). *Proyektirovaniye aviatsionnykh trenazherov s rasparallelivaniyem vychislitelnykh protsessov* [Designing flight simulators with parallel computing processes]. Reliability & Quality of Complex Systems, no. 4 (16), pp. 128–141. DOI: 10.21685/2307-4205-2016-4-18. (in Russian)
10. Arico, P., Borghini, G., Flumeri, G.Di., Colosimo, A., Pozzi, S. and Babiloni, F. (2016). *A passive brain-computer interface application for the mental workload assessment on professional air traffic controllers during realistic air traffic control tasks*. Progress in Brain Research, vol. 228, pp. 295–328. DOI: 10.1016/bs.pbr.2016.04.021
11. Reva, O., Borsuk, S., Shulgin, V. and Nedbay, S. (2020). *Ergonomic assessment of instructors capability to conduct personality-oriented training for air traffic control (ATC) personnel*. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 964, pp. 783–793. DOI: 10.1007/978-3-030-20503-4_70
12. Kovalenko, G.V., Kryzhanovsky, G.A., Sukhikh, N.N. and Khoroshavtsev, Yu.E. (1996). *Sovershenstvovaniye professionalnoy podgotovki letnogo i dispetcherskogo sostavov* [Improvement of flight crew and ATC professional training]. Moscow: Transport, 319 p. (in Russian)
13. Lapshin, E.V. (2013). *Issledovaniye informatsionnykh protsessov, protekayushchikh v trenazherakh* [The research of information processes occurring in simulators]. Reliability & Quality of Complex Systems, no. 2 (2), pp. 87–93. (in Russian)
14. Gorenkov, A.N. (2016). *Modern simulator and modeling complex in the system of professional training atc*. Transport Business of Russia, no. 4, pp. 70–73. (in Russian)
15. Ivanov, A.Yu., Astapov, K.A. and Plyasovskikh, A.P. (2013). *Some questions of making voice command systems with apply in air traffic control training complexes*. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, no. 198, pp. 129–135. (in Russian)
16. Rustamov, S., Gasimov, E., Hasanov, R., Jahangirli, S., Usikov, D. and Mustafayev, E. (2018). *Speech recognition in flight simulator*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. «Aegean International Textile and Advanced Engineering Conference», ID 012005, 5 p. DOI: 10.1088/1757-899X/459/1/012005
17. Kupin, V.V. (2017). *Kolichestvennyye kharakteristiki motivatsionnoy gotovnosti aktivnogo elementa pri upravlenii vozdushnym dvizheniyem* [Quantitative characteristics of the motivational readiness of an active element in air traffic control]. Vestnik Sankt-Peterburgskogo GUGA, no. 4 (17), pp. 38–51. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Vladimir E. Borisov, Head of the Air Traffic Management and Navigation Chair, Ulyanovsk Institute of Civil Aviation named after Air Chief Marshal B.P.Bugaev, ve_borisov@mail.ru.

Vladimir A. Borsoev, Doctor of Technical Sciences, Head of the Navigation Support of Flights and Aeronautical Information Chair, Air Navigation Institute, borsoev@aeronav.aero.

Alexander A. Bondarenko, Candidate of Technical Sciences, Dean of the Faculty of Flight Operation and Air Traffic Management, Ulyanovsk Institute of Civil Aviation named after Air Chief Marshal B.P. Bugaev, baa69@yandex.ru.

Поступила в редакцию 07.10.2020
Принята в печать 26.11.2020

Received 07.10.2020
Accepted for publication 26.11.2020

УДК 629.7.036.4

DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-6-20-27

USING MODERN CLUSTERING TECHNIQUES FOR PARAMETRIC FAULT DIAGNOSTICS OF TURBOFAN ENGINES

I.J. BURAIMAH¹

¹*National Space Research and Development Agency
Abuja, Federal Republic Nigeria*

The 21st century aviation and aerospace technologies have evolved and become more complex and technical. Turbofan jet engines as well as their cousins, the rocket engines (liquid/solid) have gone through several design upgrades and enhancements during the course of their design and exploitation. These technological upgrades have made engines very complex and expensive machines which need constant monitoring during their working phase. As the demand and use of such engines is growing steadily, both in the civilian and military sectors, it becomes necessary to monitor and predict the behavior of parametric data generated by these complex engines during their working phases. In this paper flight parameters such as Exhaust Gas Temperature (EGT), Engine Fan Speeds (N1 and N2), Fuel Flow (FF), Oil Temperature (OT), Oil Pressure (OP), Vibration and others were used to determine engine fault. All turbo fan engines go through several distinctly different working phases: Take-off phase, Cruise phase and Landing phase. Recording generated parametric data during these different phases leads to a massive amount of in-flight data and maintenance reports, which makes the task of designing and developing a fault diagnostic system highly challenging. It becomes imperative to use modern techniques in data analysis that can handle large volumes of generated data and provide clear visual results for determining the technical status of the engine under investigation/monitoring. These modern techniques should be able to give clear and objective assessment of the object under investigation. Cluster analysis methods based on Neural Networks such as c-means, k-means, self-organizing maps and DBSCAN algorithm have been used to build clusters. Differences in cluster groupings/patterns between healthy engine and engine with degraded performance are compared and used as the bases for defining faults. Fault diagnosis plays a crucial role in aircraft engine management. Timely and accurate detection of faults is the foundation on which maintenance turnaround times, operational costs and flight safety are based. The data used in this paper for analysis was obtained from flight data recorder during one flight cycle. The final decision on a fault is taken by an engineer.

Key word: engine fault diagnostics, parametric data, turbofan jet engines, monitoring, in-flight data handling, neural network, c-means, k-means, dbscan, clustering analysis, cluster pattern, clustering techniques, algorithm, flight parameters, exhaust gas temperature, data analysis, self-organizing maps.

The author expresses his gratitude to Prof. (Dr.) Boris A. Chichkov of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, Russia, for his guidance, support and assistance.

INTRODUCTION

Current research in the development of engine fault diagnostics methods have effectively advanced in several directions with the two most popular. The first method is a combination of traditional rule-based diagnostic method (e.g., expert system) with other AI (artificial intelligence) techniques, such as neural network and fuzzy logic [1 – 3]. The other approach uses models of engine performance and is known as model-based fault diagnostics [4, 5]. Aircraft engine health deterioration can be attributed to a variety of reasons including extreme operating conditions, system malfunction, component or sub-system failure and aging. The most pressing challenges faced by most if not every airline are safety, airworthiness, and operational cost effectiveness. To achieve the above-mentioned goals an effective diagnostic method based on data from the engine should form the bases for designing a diagnostic method. A condition-based maintenance system can be divided into two categories: model based and data driven. Dynamic systems or sub-systems under investigation can sometimes be defined by developing accurate mathematical models [6 – 9]. Mathematical models are used to determine the relationship between different measured signals, interpreting trends and using advanced signal processing methods to detect faults. However, in some cases it is difficult to accurately represent a complex sys-

tem using mathematical models and the data from the system has to be used as the basis for analysis. That is why Data Driven Fault Diagnosis Scheme based on statistical methods, machine learning, and statistical pattern recognition approaches are used as the basis for developing new advanced fault diagnostic system for aircraft engine health management. The proposed content has two basic objectives: to show the implementation of clustering algorithms in detecting engine with degraded performance over healthy engine, and compare cluster patterns formed.

The huge amount of data generated during the use of modern turbojet engines and other propulsion systems, having onboard data recorders, demands for progressive new techniques in processing these parametric data generated during operation. Therefore, it is necessary and appropriate to use neural network-based methods such as fuzzy c-mean, self-organizing maps and others presented in this work for fault diagnosis of turbofan jet engine and propulsion systems with engine parameter monitoring systems onboard.

PROBLEM DESCRIPTION

Clustering is a Machine Learning Technique that involves the grouping of data points. In this paper data points are data got from the engine monitoring system, monitoring the different working parameters of the engine. Given a set of data points, we can use clustering algorithms such as C-means, K-means, DBSACN and Self-Organizing Maps to classify each data point into a specific group. In theory, data points that are in the same group should have similar properties and features (in the case of self-organizing maps), while data points in different groups should have highly dissimilar properties and features. This explanation is the most important in this work as it clearly defines that the data from healthy engines will be similar and have features distinctly unique to them. While data from engine with the degraded engine performance will exhibit highly dissimilar features when compared to those from a healthy engine. Clustering is a method of unsupervised learning and is a common technique for statistical data analysis.

Clustering analysis in this work should allow us to gain a valuable insight from the input data by presenting a visual representation of the dynamic processes occurring in the object under investigation. Data points should fall into groups after clustering algorithm is initiated. It should be noted that a clustering algorithm must meet some requirements which are listed below.

The main requirements that a clustering algorithm should meet are:

- scalability;
- dealing with different types of attributes;
- discovering clusters with arbitrary shape;
- minimal requirement for domain knowledge to determine input parameters;
- ability to deal with noise and outliers.

The significance of the clustering algorithm is to extract value from large quantities of structural and unstructured data. It allows us to segregate the data based on their properties/features and groups them into different clusters depending on their similarities.

FUZZY C-MEANS CLUSTERING

Fuzzy C-means clustering was principally introduced by J.C. Dunn and improved upon by J.C Bezdek [10, 11], and has been built upon for various applications. Fuzzy c-means is a partitive clustering approach where a given data set is divided into K clusters in a way such that each data sample belongs to one of the clusters to some degree. In this paper fuzzy c-means is used to cluster flight parameter data in a way that the data clusters formed are representative of the nominal and fault values of the selected parameter.

In this paper four flight data such as: EGT (exhaust gas temperature), N1 (rotor speed), N2 (rotor speed), and OT (oil-temperature) were used.

The algorithm divides the available data into spherical clouds of data samples in a p -dimensional space. Each cluster is then in its turn represented by its cluster center. The Euclidian distance is used to measure the distance between the cluster centre and all the points that fall within the cluster boundary. General objective of c-means is to obtain a partitioning of a given data set which minimizes an objective function for a fixed number of clusters. Represented by J below:

$$J_m = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^C u_{ij}^m \|x_i - c_j\|^2 \quad (1)$$

where m – is any real number greater than 1

u_{ij} – is the degree of membership of x_j in the cluster j

x_j – it the i^{th} of the d -dimensional measured data

c_j – is the d -dimension center of the cluster

$\|*\|$ – is any norm expressing the similarity between measured data and the center.

Fuzzy partitioning begins through an iterative optimization of the objective function J shown above, with the update of the membership u_{ij} and the cluster center c_j by:

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^C \left(\frac{\|x_i - c_j\|}{\|x_i - c_k\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}}, \quad (2)$$

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^N u_{ij}^m * x_i}{\sum_{i=1}^N u_{ij}^m}. \quad (3)$$

This iteration will stop when

$$\max_{ij} \{ |u_{ij}^{(k-1)} - u_{ij}^{(k)}| \} < \varepsilon, \quad (4)$$

where ε – is a termination criterion between 0 and 1, whereas k are the iteration steps. This procedure converges to a local minimum or a saddle point J_m .

INITIALIZING FUZZY C-MEANS ALGORITHM

To initialize c-means clustering for a set of data, input data is organized into a $M*N$ matrix called U . Flight data from a CF-34/10 turbofan engine was used in the paper. Data set was organized into four parametric data groups: EGT, N1, N2 and Oil temperature. Below there are the initialization steps of the algorithm:

Matlab was used for running fuzzy c-means. Educational Version

Step 1 Initialize $U=[u_{ij}]$ matrix, $U^{(0)}$

Step 2 At k -step: calculate the centers vector $C^{(k)} = [c_j]$ with $U^{(k)}$

$$c_j = \frac{\sum_{i=1}^N u_{ij}^m * x_i}{\sum_{i=1}^N u_{ij}^m}$$

Step 3 Update $U^{(k)}, U^{(k+1)}$

$$u_{ij} = \frac{1}{\sum_{k=1}^C \left(\frac{\|x_i - c_j\|}{\|x_i - c_k\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}}$$

Step 4 If $\|U^{(k+1)} - U^{(k)}\| < \varepsilon$ then STOP; otherwise return to step 2.

Results are presented in the form of dense clusters with the centroid, represented here by (1), at the center of each cluster formation.

Two cases were initiated and their results analyzed. For solid validation of results a SOM operation was carried out using neural network, this gave dimensional correlation of input data after undergoing batch weight/bias rules and performing the mean squared error operation. Results presented are for validation of the process for fault diagnostics of turbofan engines. Case 1 and 2 represent input data from a CF-34/10 engine. In Case 1, parameter registers abnormal or degraded engine performance; results are presented in Figure 1. Case 2 is the normal engine performance (fig. 2).

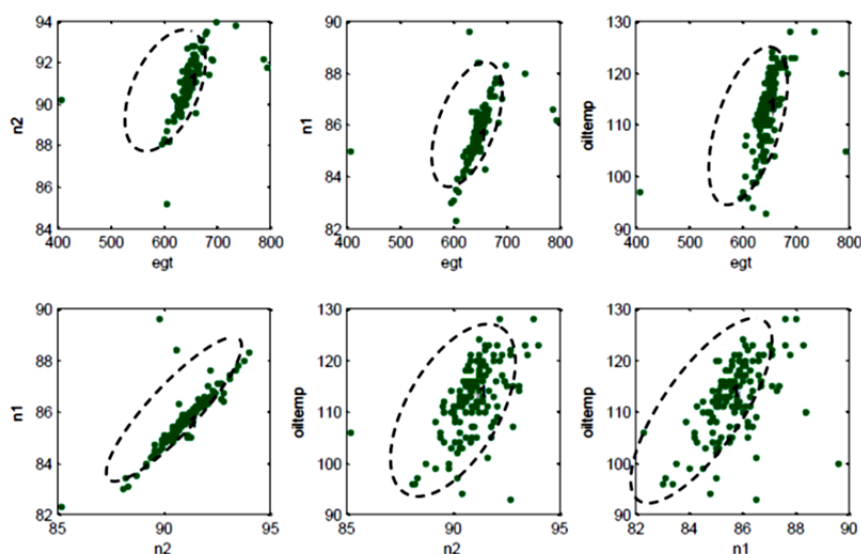


Fig. 1. Results from Case №1 engine parameters, showing clearly heavy scattering of clusters with dependence (oil/n2 and oil/n1), degraded engine performance (faulty)

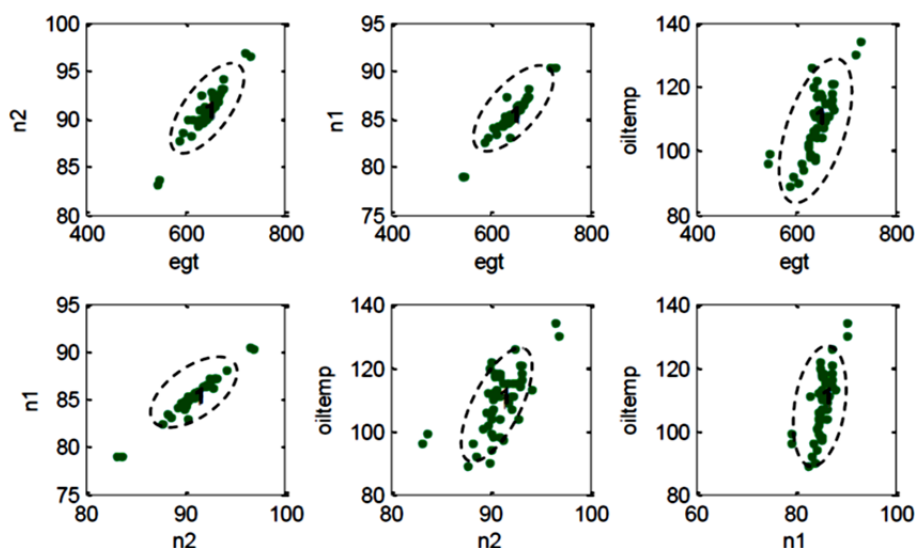


Fig. 2. Results from Case №2 engine parameters, showing clearly compact clusters but slight scattering of dependence oil/n2, performance (healthy)

The results presented in Figures 1 and 2, show that clustering method based on c-means is capable of presenting clear visual representations of input data in the form of clusters with unique patterns that distinguish a healthy engine from an engine with degraded performance. Diagnostic criteria for these results in the cluster compactness.

The SOM procedure carried out in the Neural Network shows result of Case №1 input data. After 200 iterations SOM input plane presented the following result in Figure 3. The same procedure was carried out for Case №2. The map forms a compressed representation of the inputs space, reflecting both the relative density of input vectors in that space, and a two-dimensional compressed representation of the input-space topology.

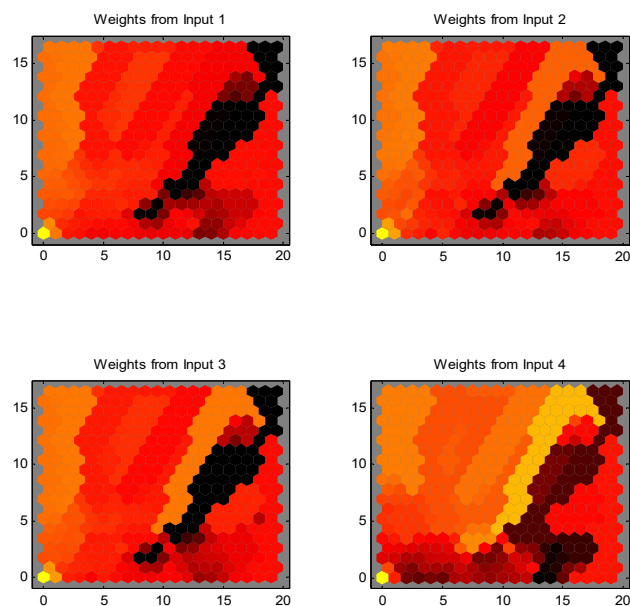


Fig. 3. Visualization of weights for Case №1 (CF34/10) with degraded engine performance (faulty)

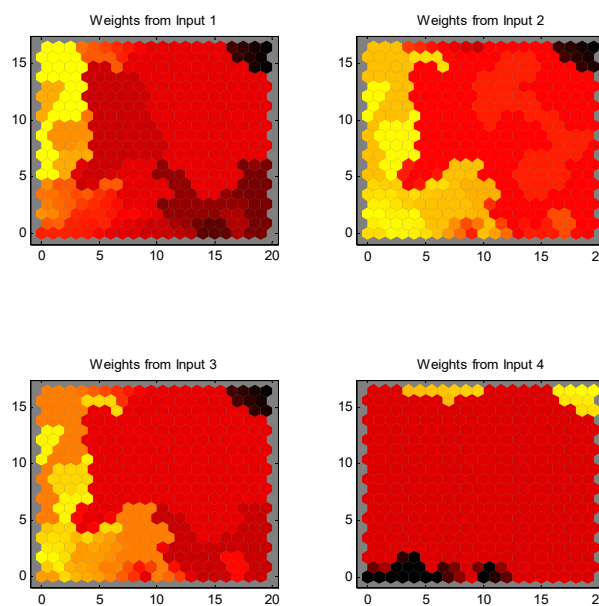


Fig. 4. Visualization of weights for Case №2 (CF34/10) healthy engine (healthy)

The Figures above can also visualize the weights themselves using the weight plane (fig. 3 and 4). There is a weight plane for each element of the input vector (four, in this case). They are the visualizations of the weights that connect each input to each of the neurons. (Lighter and darker colors represent larger and smaller weights, respectively). If the connection patterns of two inputs are very similar, you can assume that the inputs were highly correlated.

Algorithms for the SOM operation went through a weight and bias process and updates according to its learning function after each epoch (one pass through the entire set of input vectors). Training stops when any of these conditions is met: The maximum number of epochs (repetitions) is reached. Performance is minimized to the goal. The maximum amount of time is exceeded. Validation performance has increased more than max fail times since the last time it decreased (when using validation). These steps enable the SOM to classify and cluster the input data correctly.

The results attained from processing the input data from a CF34/10 turbofan engine using fuzzy c-means and self-organizing-maps algorithms, both of which are based on Neural Network, have shown that such methods can be reliably used for fault diagnostics and classifying engine performance.

CONCLUSION

1. The results presented in this paper show that for fault diagnostics of turbofan engine CF34/10, the method c-means clustering algorithm is very capable of capturing and visualizing fault signatures from parametric input data, and representing these results in the form of compact clusters (for healthy) and clusters with higher degree of scattering for engine with degraded performance (faulty).
2. Captured fault signatures were visualized in the form of simple clusters, showing dense regions to mean healthy engine and clusters with a higher degree of scattering to form engine with the degraded engine performance.
3. The reliability of the results is consistent and corresponds with results from the self-organizing-maps which show high level of input weight correlation.
4. Using c-means clustering and SOM to identify engine characteristics was achieved.

REFERNECES

1. **Buraimah, I.J.** (2015). *Primenimosti neyrosetevykh algoritm k otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya aviatsionnykh dvigateley* [Application of the neural network algorithm for determining technical condition of aircraft engine]. Nauchnyye chteniya po aviatsii, posvyashchennyye pamyati N.Ye. Zhukovskogo: sbornik dokladov XII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [12th Russian Scientific and Technical Conference, (technical reading on aviation), Dedicated to the memory of Ghukovski, N.E.], pp. 104–106. (in Russian).
2. **DePold, H.R. and Gass, F.D.** (1999). *The application of expert systems and neural networks to gas turbine prognostics and diagnostics*. ASME. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 121, issue 4, pp. 607–612. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2818515>
3. **Polycarpou, M.M.** (1994). *An on-line approximation approach to fault monitoring, diagnosis, and accommodation*. SAE Technical Paper 941217. DOI: <https://doi.org/10.4271/941217>
4. **Merrigton, G.L.** (1994). *Fault diagnosis in gas turbines using a model-based technique*. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 116, issue 2, pp. 374–380. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2906830>
5. **Gorinevsky, D., Nwadiogbu, E. and Mylaraswamy, D.** (2002). *Model based diagnostics for small-scale turbomachines*. Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control, Las Vegas, NV, USA, vol. 4, pp. 4784–4789. DOI: 10.1109/CDC.2002.1185136
6. **Buraimah, I.J.** (2014). *O primenimosti neyrosetevykh algoritm k otsenke tekhnicheskogo sostoyaniya aviatsionnykh dvigateley* [Using neural network based algorithm to determine technical condition of aircraft engines]. Aviatsiya: istoriya, sovremennost, perspektivy razvitiya: sbornik trudov IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii [4th International Technical and Scientific Conference, 'Aviation: history, current technology, perspective development']. Minsk, Belarus. (in Russian)
7. **Wang, X. and Syrmos, V.L.** (2008). *Fault detection, identification and estimation in the electro-hydraulic actuator system using EKF-based multiple-model estimation*. 16th Mediterranean Conference on Control and Automation, pp. 1693–1698. DOI: 10.1109/MED.2008.4602248
8. **Luo, J., Namburu, M., Pattipati, K., Qiao, L., Kawamoto, M. and Chigusa, S.** (2003). *Model-based prognostic techniques [maintenance applications]*. Proceedings AUTOTESTCON 2003. IEEE Systems Readiness Technology Conference, Anaheim, CA, USA, pp. 330–340. DOI: 10.1109/AUTEST.2003.1243596
9. **Ofsthum, S.C. and Wilmering, T.J.** (2004). *Model-driven development of integrated health management architectures*. IEEE Aerospace Conference Proceedings (IEEE Cat. No.04TH8720). Big Sky, MT, vol. 6, pp. 3692–3705. DOI: 10.1109/AERO.2004.1368185
10. **Bezdek, J.C.** (1981). *Pattern recognition with fuzzy objectives function algorithm*. Springer US, New York, 272 p. DOI: 10.1007/978-1-4757-0450-1

11. Dunn, J.C. (1973). *A fuzzy relative of the ISODATA process and its use in detecting compact, wellseparated clusters*. Cybernetics and System Journal, vol. 3, issue 3, pp. 32–57. DOI: <https://doi.org/10.1080/01969727308546046>

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Engr Buraimah Igbafe Jubril, Principal Engineer in the Department of Engineering Space Systems, National Space Research & Development Agency (NASRDA), jubril.buraimah@nasrda.gov.ng

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ КЛАСТЕРИЗАЦИИ ДЛЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ТУРБОВЕНТИЛЯТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

I.J. Buraimah¹

¹*Национальное агентство космических исследований и разработок
Абуджа, Федеративная Республика Нигерия*

Авиационные и аэрокосмические технологии XXI века эволюционировали и стали более сложными и техническими. Турбореактивные двигатели, а также их собратья, ракетный двигатель (жидкий/твердый) прошли через несколько конструктивных улучшений и усовершенствований в ходе их проектирования и эксплуатации. Эти технологические усовершенствования сделали двигатели очень сложными и дорогими машинами, которые нуждаются в постоянном контроле во время их рабочей фазы. По мере того как спрос и использование таких двигателей неуклонно растут как в гражданском, так и в военном секторах, становится необходимым отслеживать и прогнозировать поведение параметрических данных, генерируемых этими сложными двигателями во время их рабочих фаз. В работе для определения неисправности двигателя используются такие параметры полета, как температура выхлопных газов (EGT), частоты вращения вентиляторов двигателя (N1 и N2), расход топлива (FF), температура масла (OT), давление масла (OP), вибрация и другие. Все турбовентиляторные двигатели проходят через несколько отчетливо различающихся рабочих фаз: взлета, круиза и посадки. Запись генерируемых параметрических данных на этих различных этапах приводит к огромному количеству бортовых данных и отчетов о техническом обслуживании, что делает задачу проектирования и разработки системы диагностики неисправностей чрезвычайно перспективной. Становится необходимым использовать современные методы анализа данных, позволяющих обрабатывать большие объемы генерируемых данных и давать четкие визуальные результаты для определения технического состояния двигателя, являющегося объектом исследования/мониторинга. Эти современные методики должны быть способны дать четкую и объективную оценку исследуемому объекту. Для построения кластеров были использованы методы кластерного анализа, основанные на нейронных сетях таких, как c-means, k-means, самоорганизующиеся карты и алгоритм DBSCAN. Различия в кластерных группировках/паттернах между исправным двигателем и двигателем с пониженной производительностью сравниваются и используются в качестве основы для определения неисправностей. Диагностика неисправностей играет очень важную роль в управлении авиационными двигателями. Своевременное и точное обнаружение неисправностей является основой, на которой базируются сроки выполнения технического обслуживания, эксплуатационные расходы и безопасность полетов. Данные, использованные в работе для анализа, были получены с бортового самописца в течение одного полетного цикла. Окончательное решение о неисправности принимает инженер.

Ключевые слова: диагностика неисправностей двигателей, параметрические данные, турбовентиляторные реактивные двигатели, мониторинг, обработка полетных данных, нейронная сеть, c-means, k-means, DBSCAN, кластерный анализ, кластерный паттерн, методы кластеризации, алгоритм, параметры полета, температура выхлопных газов, анализ данных, самоорганизующиеся карты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бураймах И.Д. Применности нейросетевых алгоритм к оценке технического состояния авиационных двигателей // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуков-

ского: сборник докладов XII Всероссийской научно-технической конференции. Москва, 16–17 апреля 2015 г. М.: ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт». С. 104–106.

2. **DePold H.R., Gass F.D.** The application of expert systems and neural networks to gas turbine prognostics and diagnostics // ASME. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 1999. Vol. 121, iss. 4. Pp. 607–612. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2818515>

3. **Polycarpou M.M.** An on-line approximation approach to fault monitoring, diagnosis, and accommodation // SAE Technical Paper 941217. 1994. DOI: <https://doi.org/10.4271/941217>

4. **Merrigton G.L.** Fault diagnosis in gas turbines using a model-based technique // ASME. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 1994. Vol. 116, iss. 2. Pp. 374–380. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2906830>

5. **Gorinevsky D., Nwadiogbu E., Mylaraswamy D.** Model based diagnostics for small-scale turbomachines // Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control. NV, USA, Las Vegas, 2002. Vol. 4. Pp. 4784–4789. DOI: 10.1109/CDC.2002.1185136

6. **Бураймах И.Д.** О применимости нейросетевых алгоритмов к оценке технического состояния авиационных двигателей // Авиация: история, современность, перспективы развития: сборник трудов IV международной научно-практической конференции. Минск, 22 мая 2013 г. Минск, 2014. С. 87–88.

7. **Wang X., Syrmos V.** Fault detection, identification and estimation in the electro-hydraulic actuator system using EKF-based multiple-model estimation // 16th Mediterranean Conference on Control and Automation, 2008. Pp. 1693–1698. DOI: 10.1109/MED.2008.4602248

8. **Luo J.** Model-based prognostic techniques [maintenance applications] / J. Luo, M. Namburu, K. Pattipati, L. Qiao, M. Kawamoto, S. Chigusa // Proceedings AUTOTESTCON 2003. IEEE Systems Readiness Technology Conference. Anaheim, CA, USA, 2003. Pp. 330–340. DOI: 10.1109/AUTEST.2003.1243596

9. **Ofsthum S.C., Wilmering T.J.** Model-driven development of integrated health management architectures // IEEE Aerospace Conference Proceedings (IEEE Cat. No.04TH8720). Big Sky, MT, 2004. Vol. 6. Pp. 3692–3705. DOI: 10.1109/AERO.2004.1368185

10. **Bezdek J.C.** Pattern recognition with fuzzy objectives function algorithm. New York: Springer US, 1981. 272 p. DOI: 10.1007/978-1-4757-0450-1

11. **Dunn J.C.** A fuzzy relative of the ISODATA process and its use in detecting compact, well separated clusters // Cybernetics and System Journal. 1973. Vol. 3, iss. 3. Pp. 32–57. DOI: <https://doi.org/10.1080/01969727308546046>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Бураймах Игбафе Джубрил, главный инженер отдела инженерных космических систем, Национальное агентство Космических исследований и разработок. Абуджа, Федеративная Республика Нигерия, jubril.buraimah@nasrda.gov.ng

Поступила в редакцию 27.07.2020
Принята в печать 26.11.2020

Received 27.07.2020
Accepted for publication 26.11.2020

УДК 629.7.083

DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-6-28-39

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ИНТЕГРИРОВАННАЯ ПЛАТФОРМА СОПРОВОЖДЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

И.Г. КИРПИЧЕВ¹, Д.В. ПЕТРОВ², Ю.М. ЧИНЮЧИН¹

¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

²ПАО «Научно-производственное предприятие «Аэросила»», г. Ступино, Россия

Рассматриваются вопросы формирования комплекса задач информационного обеспечения и сопровождения процессов разработки, изготовления и последующей массовой длительной эксплуатации вновь создаваемой и перспективной авиационной техники, направленных на дальнейшее развитие инновационных подходов к обеспечению комплексной межотраслевой системы (платформы) послепродажного сопровождения технической и летно-технической эксплуатации гражданских воздушных судов. В статье раскрывается содержание основных задач, ориентированных на обеспечение и управление безопасностью полетов в гражданской авиации России и взаимоувязанных с рекомендациями и директивными требованиями Приложения 19 к Конвенции ИКАО и Руководства по управлению безопасностью полетов. Важнейшим фактором при этом является учет наиболее сложных требований к системе управления безопасностью полетов, связанных с поддержанием летной годности воздушных судов как вида транспорта особого риска применения. Проведен анализ и разработана общая схема Многофункциональной интегрированной платформы в рамках Информационно-аналитической системы сопровождения технической эксплуатации компонентов воздушных судов применительно к научно-производственному предприятию «Аэросила». Далее представлена развернутая интегрированная платформа, реализуемая в данном авиапредприятии и предусматривающая информационное обеспечение по выделенным главным функциональным модулям: «Система управления безопасностью полетов», «Система качества», «Сертификация» по выделенным объектам сертификации. В результате построена общая информационно-аналитическая система с учетом степени ее реализации в условиях авиапредприятия «Аэросила».

Ключевые слова: техническая эксплуатация, воздушные суда, управление безопасностью полетов, многофункциональная интегрированная платформа, функциональные модули, задачи информационного обеспечения.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы произошел ряд существенных изменений в области контроля, регулирования и управления процессами разработки, изготовления и эксплуатации воздушных судов (ВС) в РФ, введены в действие новые международные требования и стандарты в области обеспечения безопасности полетов, происходит широкомасштабное внедрение информационных технологий в процессы сопровождения технической эксплуатации ВС и мониторинга безопасности авиационной деятельности [1, 2, 3].

Создание новой нормативно-правовой базы сертификации разработки, производства и типовой конструкции авиационной техники (АТ) в РФ, введение в действие требований ИКАО о разработке и внедрении системы управления безопасностью полетов (СУБП) в организациях - разработчиках и изготовителях АТ [4], внедрение электронной эксплуатационно-технической документации, системы мониторинга летной годности ВС, государственной системы сбора, анализа и хранения информации о безопасности полетов, системы мониторинга безопасности авиационной деятельности РФ требуют разработки и внедрения новой концепции и технологий, ориентированных на комплексный системный подход по управлению безопасностью полетов в области технической эксплуатации ВС [5, 6].

СУБП организаций-разработчиков и изготовителей гражданских ВС имеют свои особенности, связанные со спецификой процессов разработки, изготовления и сертификации ВС, их составных частей и комплектующих изделий [7].

Основы обеспечения безопасности полетов закладываются на этапе создания авиационной техники. Безопасность типовой конструкции разрабатываемого ВС подтверждается в процессе сертификации завершающимся выдачей сертификата типа (этап разработки) первичного сертификата летной годности экземпляра (этап изготовления), выдачей и продлением сертификата летной годности экземпляра ВС (этап эксплуатации) [8, 9].

СУБП организаций-разработчиков и изготовителей АТ невозможно реализовать без установления устойчивой взаимосвязи с процессами эксплуатации и поддержания летной годности (ПЛГ) посредством системы послепродажного обеспечения сконструированных и произведенных изделий АТ¹ [10]. Это означает, что выявление опасностей и рисков для безопасности полетов (БП), исходящих из деятельности разработчика и изготовителя, их качественную и количественную оценку с целью принятия корректирующих действий следует выполнять на основе эксплуатационных данных (по результатам эксплуатационных наблюдений) [11].

Документами ИКАО и воздушным законодательством РФ определены требования к наличию и функционированию в организациях-разработчиках и изготовителях АТ систем качества, сертификации, послепродажного обеспечения АТ и СУБП [12]. Разработка и внедрение СУБП проводится на основе и с использованием отдельных элементов уже действующих систем. Очевидно, что общим элементом для всех процессов является информация о техническом состоянии (параметрах) ВС и процессах их технической эксплуатации.

Для эффективного решения задач по управлению БП и снижению затрат на создание соответствующих систем необходимы разработка и внедрение интегрированной с системой послепродажного сопровождения технической эксплуатации автоматизированной информационно-аналитической системы в организациях-разработчиках и изготовителях ВС, которая позволила бы значительно повысить существующий уровень качества сбора, обработки, анализа и обобщения информации и обмена информацией во всех элементах авиационной системы для выработки эффективных решений по обеспечению БП при разработке новых типов ВС [13]. Такая система должна обеспечивать непрерывный и всеобъемлющий контроль процессов летно-технической эксплуатации действующего в отрасли парка ВС с целью своевременного принятия решений разработчиками и изготовителями ВС, их систем и комплектующих изделий по локализации и предотвращению особых ситуаций в полете и при техническом обслуживании. Система также должна позволять управлять потоками информации о ВС, отслеживать и минимизировать проектировочные, производственные и эксплуатационные риски.

СУБП базируется на современной методологии, направленной на постоянное повышение БП и основанной на глубоком и всестороннем анализе широкого спектра фактических данных о процессах летной и технической эксплуатации ВС.

В работе [14] изложены основные положения по результатам научных исследований, проведенных в процессе мониторинга летной годности парка ВС РФ в рамках процедур по выдаче (продлению) сертификата летной годности ВС в соответствии с Приказом МТ РФ от 16.05.2003г. № 132 «Об утверждении Федеральных авиационных правил. Экземпляр воздушного судна. Требования и процедуры сертификации»² и процедур оценки аутентичности компонентов ВС на основе разработанной авторами Информационно-аналитической системы мониторинга жизненного цикла компонентов воздушных судов (ИАС МЖЦ КВС)^{3,4}.

¹ Master Minimum Equipment List. Airbus A318 / A319 / A320 / A321 Revision: 21 [Электронный ресурс] // U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration. URL: <https://fsims.faa.gov/wdocs/mmel/a-320%20r21.pdf> (дата обращения 15.09.2020).

² Об утверждении Федеральных авиационных правил. Экземпляр воздушного судна. Требования и процедуры сертификации. Приказ Министерства транспорта РФ от 16.05.2003 г. № 132.

³ ГОСТ Р 54080-2010. Воздушный транспорт. Система технического обслуживания и ремонта авиационной техники. Информационно-аналитическая система мониторинга летной годности воздушных судов. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2012. 20 с.

ИАС МЖЦ КВС представляет собой мощное интеллектуальное средство поддержки и контроля эксплуатации ВС, но ввиду того, что в процессе разработки ставились частные задачи, решаемые конкретными подразделениями и отдельными специалистами авиапредприятий, в настоящее время в РФ наблюдается совокупность не связанных информационно-управляющих систем, отвечающих отдельным требованиям, целям и задачам авиапредприятий. Однако результаты внедрения ИАС и научно-практический задел трудно переоценить. ИАС МЖЦ КВС положена в основу создания единого информационного пространства (ЕИП) сопровождения технической эксплуатации ВС в РФ.

Дальнейшим развитием ИАС МЖЦ КВС стала разработка и внедрение Информационно-аналитической системы мониторинга летной годности ВС (ИАС МЛГ ВС), ориентированной на информационное обеспечение функций государственного контроля и регулирования процессов технической эксплуатации и летной годности ВС. В настоящее время в связи со структурными изменениями, прошедшими в отрасли, и отсутствием нормативной базы и финансирования с использованием ИАС МЛГВС выполняются ее отдельные функции (оценка аутентичности КВС, сверка ЭТД, мониторинг поставщиков АТИ). Вместе с тем, развитие ИАС МЛГ ВС в настоящее время реализуется в авиационной промышленности в рамках разработки и внедрения Многофункциональной интегрированной платформы (МИП) послепродажного сопровождения процессов технической эксплуатации (ПТЭ) воздушных судов.

Главной функцией МИП является обеспечение функционирования единого информационного пространства (ЕИП) и интегрированной информационной среды (ЕИС) (полномасштабного банка) актуализированных данных о фактическом техническом состоянии авиационной техники и параметрах эффективности ПТЭ парка гражданских ВС.

В рамках ЕИП и ЕИС реализуется механизм обеспечения максимальной полноты и необходимой актуализации циркулирующей информации, а также санкционируется доступ к информации со стороны Организаций-участников ИАС.

Единое информационное пространство сопровождения ПТЭ ВС – это совокупность взаимоувязанных интегрированных информационных ресурсов участников, занятых процессами производства (конструирования, изготовления, испытаний) и эксплуатацией объектов авиационной техники (компонентов ВС).

Единая информационная среда – это комплекс аппаратно-программных средств Организаций-участников процесса сопровождения ТЭ ВС, функционирующий в едином информационном пространстве на основе согласованных организационно-технических требований, параметров и форматов информационных пакетов о жизненном цикле компонентов ВС.

В качестве базового авиационного предприятия для реализации МИП определено Научно-производственное предприятие (НПП) «Аэросила» с его продуктовой линейкой.

В соответствии с Приложением 19, дополнение 2, ИКАО^{5,6}, в ноябре 2019 года разработчики и изготовители авиационной техники должны разработать и внедрить систему управления безопасностью полетов⁷. В целях реализации этих требований, а также в целях создания конкурентоспособной системы послепродажного сопровождения АТ, основанной на современных компьютерных технологиях, в НПП «Аэросила» проводится внедрение «Информационно-аналитической системы сопровождения технической эксплуатации компонентов воздушных судов «Аэросила» (ИАС «АЭРОСИЛА»).

⁴ ГОСТ Р 55251-2012. Воздушный транспорт. Контроль автоматизированный технического состояния изделий авиационной техники. Информационно-аналитическая система мониторинга летной годности воздушных судов. Пользовательский модуль «Изготовитель». Общие требования. М.: Стандартинформ, 2013. 8 с.

⁵ Управление безопасностью полетов. Приложение 19 к Конвенции о международной гражданской авиации, 1-е изд., ИКАО, 2013.

⁶ Управление безопасностью полетов. Приложение 19 к Конвенции о международной гражданской авиации, 2-е изд., ИКАО, 2016.

⁷ Руководство по управлению безопасностью полетов (РУБП). Дос. 9859-AN/474, 3-е изд. ИКАО. 2018.

Система обеспечивает на этапах создания ВС информационную поддержку сертификата типа, процедур сертификации экземпляра, а также предоставление авиационным организациям сервисных услуг по сопровождению последующей эксплуатации АТ, а именно:

- авторское сопровождение АТ в эксплуатации;
- послепродажное обслуживание (в том числе гарантийное) АТ в эксплуатации;
- оптимизация затрат и сроков технического обслуживания и ремонта, выполнение до-работок и модернизации, продление ресурса АТ⁸ [15, 16];
- поддержка и актуализация эксплуатационно-технической документации;
- контроль аутентичности компонентов ВС;
- защита изготавливаемой продукции от фальсификации.

В 2018 г. НПП «АЭРОСИЛА» в рамках создания конкурентоспособной системы послепродажного сопровождения авиационной техники была разработана и внедрена Информационно-аналитическая система «АЭРОСИЛА».

ИАС «АЭРОСИЛА» – совокупность аппаратно-программных средств, алгоритмов обработки информационных потоков и нормативно-правовых условий, обеспечивающих принятие решений в сфере сопровождения технической эксплуатации АТ, Системы Управления Безопасностью Полетов, Системы Качества.

В настоящее время подавляющее большинство эксплуатантов авиационной техники и организаций по техническому обслуживанию имеют автоматизированные системы управления технологическими процессами лётной и технической эксплуатации авиационной техники (ЭРЛАН, ЭКСПЛУАТАНТ, ТРИАДА, АМАСИС, АМОС, АСУ ТП и др.).

АСУ ТП поддерживают и содержат всю необходимую актуальную информацию для обеспечения процессов послепродажного сопровождения эксплуатации воздушных судов и могут быть интегрированы с информационными системами изготовителей и разработчиков компонентов ВС посредством разработанных авторами интерфейсов обмена данными.

АСУ ТП эксплуатантов и организаций по техническому обслуживанию (ТО) могут использовать разработчиками и изготовителями АТ для обеспечения процедур сопровождения эксплуатации компонентов ВС однородной номенклатуры. При этом появляется возможность в режиме реального времени обеспечивать мониторинг производственной деятельности организаций по ТО АТ и технического состояния парка ВС (по более 100 параметрам).

Кроме того, система обеспечивает подготовку аналитических и отчетных материалов для внутреннего и внешнего использования по более 50 видам учетных и отчетных форм эксплуатационно-технической документации.

Программное обеспечение, алгоритмы обработки информации, технологии интеграции информационных систем, а также организационные и юридические процедуры отработаны авторами проекта на уровне современных промышленных технологий.

В настоящее время проводятся работы по интеграции информационных систем эксплуатантов авиационной техники и изготовителей компонентов ВС рамках ИАС «АЭРОСИЛА».

НАЗНАЧЕНИЕ И СОДЕРЖАНИЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ИНТЕГРИРОВАННОЙ ПЛАТФОРМЫ

Функционирование информационно-аналитической системы ориентировано по предметным направлениям, определяющим качество, безопасность, легитимность и конкурентоспособность. Система включает в себя ряд функциональных модулей (подсистем): сопровождения

⁸ IATA. Airline Maintenance Cost. Executive Commentary [Электронный ресурс] // An Exclusive Benchmark Analysis (FY2010 data) by IATA's Maintenance Cost Task Force. 2019. URL: <https://www.iata.org/contentassets/bf8ca67c8bcd4358b3d004b0d6d0916f/mctg-fy2018-report-public.pdf> (дата обращения 05.10.2020).

(послепродажного обслуживания - ППО); управления безопасностью полетов (УБП); качества; сертификации, при этом системное управление модулями осуществляется на основе актуализированной информации, поступающей из конкретных источников, обработанной и оптимизированной по взаимно-интегрированным алгоритмам, критериям и ограничениям (рис. 1).

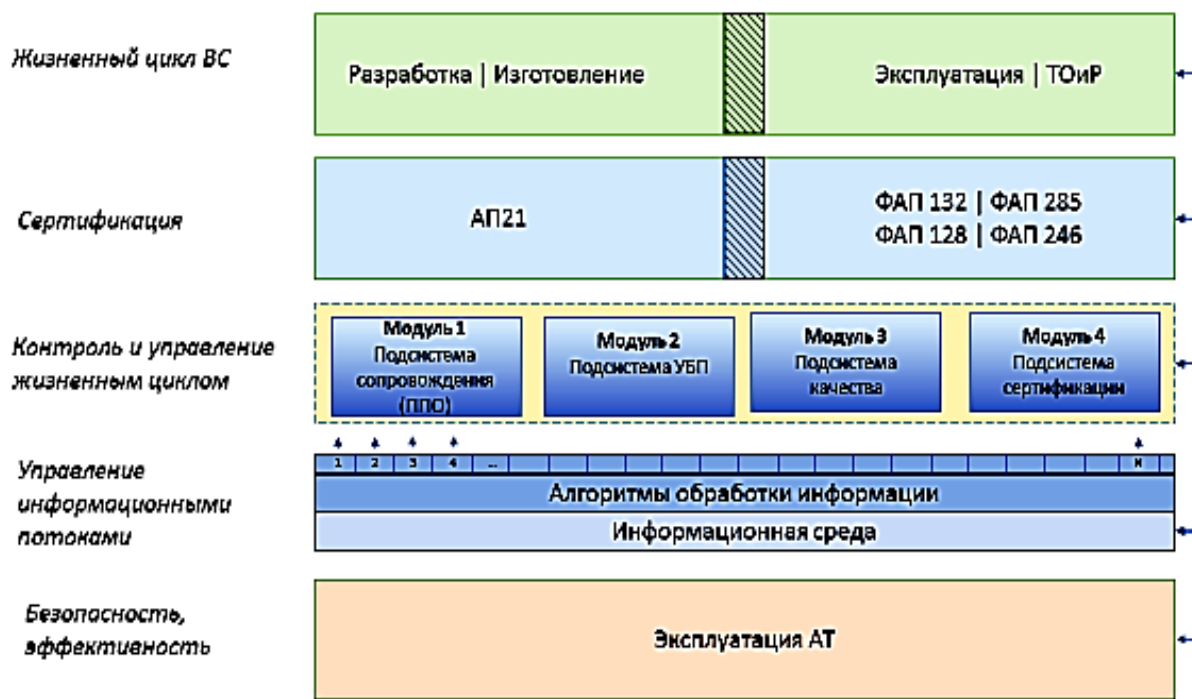


Рис. 1. Общая схема Многофункциональной интегрированной платформы в рамках ИАС
Fig. 1. The general scheme of the multi-functional integrated platform in the IAS

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ МОДУЛЬ «ППО»

Применительно к НПП «АЭРОСИЛА» (рис. 2) Многофункциональная интегрированная платформа послепродажного сопровождения предусматривает информационное обеспечение для решения следующих задач^{9,10,11}:

- обеспечение функций авторского сопровождения на этапах эксплуатации и при ремонте авиационной техники (АТ);
- совершенствование и обеспечение процедур установления ресурсов и сроков службы АТ;
- контроль аутентичности компонентов ВС как продукции разработки и производства НПП «АЭРОСИЛА»;
- защита изготавливаемой продукции от фальсификации;
- обеспечение процессов гарантийного обслуживания;
- предоставление дополнительного сервиса при планировании производства;
- мониторинг поставок;
- поддержка и актуализация эксплуатационно-технической документации для организаций по ТО и ремонту АТ;

⁹ ГОСТ Р 53393-2017 Интегрированная логистическая поддержка. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2018. 10 с.

¹⁰ ГОСТ Р 53394-2017 Интегрированная логистическая поддержка. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2018. 15 с.

¹¹ ГОСТ Р 57105-2016 Интегрированная логистическая поддержка. Анализ логистической поддержки. Требования к структуре и составу базы данных. М.: Стандартинформ, 2016. 12 с.

- оценка аутентичности компонентов ВС в условиях эксплуатации;
- мониторинг технического и ресурсного состояния ВС, находящихся в эксплуатации;
- мониторинг процессов ТО и ремонта АТ;
- мониторинг SPI в системе УБП.

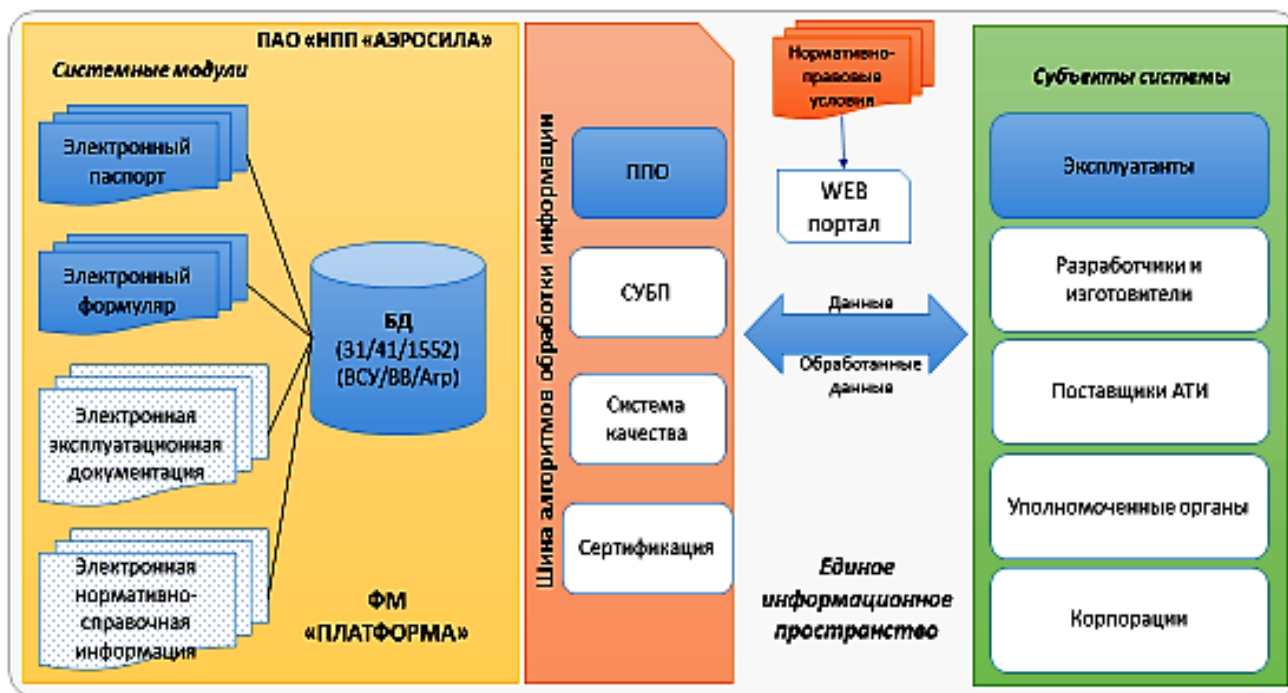


Рис. 2. Многофункциональная интегрированная платформа сопровождения ПТЭ ВС, реализуемая НПП «АЭРОСИЛА»

Fig. 2. Multi-functional integrated support platform for aircraft TOP, implemented by NPP «AEROSILA»

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ МОДУЛЬ «СУБП»

Применительно к НПП «АЭРОСИЛА» функциональный модуль «СУБП» МИП предусматривает информационное обеспечение для решения комплексов задач в рамках¹²:

1. СУБП – Разработка и изготовление ВС (АТ).
2. СУБП – Техническая эксплуатация (ТЭ) ВС.
3. СУБП – Летная эксплуатация (ЛЭ) ВС.

Модуль СУБП обеспечивает информационную поддержку системы управления безопасностью полетов разработчика и изготовителя АТ, а именно:

- встроенную программу аудита разработчика/изготовителя АТ;
- сбор и обработку исходной информации для формирования реестра опасностей и рисков через интеграцию с другими информационными системами предприятия;
- методику оценки опасностей и рисков/наполнение базы рисков и матрицы рисков;

¹² О порядке разработки и применения систем управления безопасностью полетов воздушных судов, а также сбора и анализа данных о факторах опасности и риска, создающих угрозу безопасности полетов гражданских воздушных судов, хранения этих данных и обмена ими (вместе с «Правилами разработки и применения систем управления безопасностью полетов воздушных судов, а также сбора и анализа данных о факторах опасности и риска, создающих угрозу безопасности полетов гражданских воздушных судов, хранения этих данных и обмена ими». Постановление Правительства РФ от 18.11.2014 г. № 1215 (ред. от 15.03.2016).

- формирование профиля риска для организации, их хранение и мониторинг;
- автоматизированный расчет показателей эффективности управления безопасностью (SPI). Алгоритмы расчета интегрированных показателей (уровней холдинг-корпорация-предприятие);

- программу управления процессами совершенствованиями СУБП организации;
- отчеты о реализации задач СУБП.

В качестве основных измеряемых показателей безопасности полетов рекомендуются:

А. Для разработчика и изготовителя ВС:

- абсолютное количество авиационных происшествий (АП), инцидентов или отказов за время эксплуатации ВС данного типа (парка ВС данного типа, эксплуатируемого в авиакомпании);

- относительное количество АП, инцидентов или отказов, приведенное к одному полету (на 1 час полета);

Б. Для изготовителя ВС рекомендуется применение Системы автоматизированного управления качеством «САУК» для выявления частоты проявления каждого опасного отклонения в процессе производства ВС [10].

К числу основных задач СУБП – «ТЭ ВС» относятся задачи, решаемые в рамках Системы поддержания летной годности ВС как основы СУБП:

- структура и содержание Программ ТО и ремонта^{13,14};
- структура и содержание Программ надежности АТ;
- установление и мониторинг ресурсного состояния АТ;
- анализ и оценка эксплуатационной и ремонтной технологичности (легкосъемности, контролепригодности, модульности, взаимозаменяемости, доступности);
- обеспечение уровня обученности авиационного персонала;
- обеспечение производственной и материально-технической базы.

Основными задачами СУБП – «ЛЭ ВС» являются:

- анализ и оценка причин авиационных происшествий и инцидентов;
- анализ и оценка результатов расшифровки бортовой записывающей аппаратуры;
- структура и содержание Руководств по производству полетов;
- проведение работ по измерению массы и определению центра масс (центровки) ВС;
- формирование Программ производства полетов по «ETOPS – EDTO»;
- формирование Программ производства полетов с применением «MMEL» и «MEL».

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ МОДУЛЬ «СИСТЕМА КАЧЕСТВА»

Основными задачами модуля «Система качества» являются [16]:

- формирование перечня процессов, необходимых для системы менеджмента качества (СМК) Организации;
- обоснование последовательности и механизмы взаимодействия процессов;
- определение совокупности критериев и методов, необходимых для обеспечения результативности при их реализации и управлении;
- обеспечение наличия ресурсов и информации для поддержания процессов СМК и их мониторинга;
- осуществление мониторинга, измерения и анализа эффективности процессов СМК.

¹³ ГОСТ 28056-89. Документация эксплуатационная и ремонтная на авиационную технику. Построение, изложение, оформление и содержание программы технического обслуживания и ремонта. М.: Госстандарт СССР, 1990. 32 с.

¹⁴ Методические рекомендации МР-03-001 по одобрению программ технического обслуживания воздушных судов, зарегистрированных в государственном реестре гражданских воздушных судов Российской Федерации. Утв. Начальником УПЛГ ВС Росавиации 01.12.2014.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ МОДУЛЬ «СЕРТИФИКАЦИЯ»

Сертификация – государственная акция, осуществляемая Уполномоченным органом (УО) государства по установлению соответствия объектов предъявляемым государством минимальным требованиям к ним в области обеспечения БП и по выдаче документа (Сертификата) установленного образца, удостоверяющего это соответствие.

Сертификации подлежат:

А. Авиационная техника конкретного типа: воздушные суда; маршевые двигатели ВС; вспомогательные двигатели ВС; воздушные винты; компоненты АТ (комплектующие изделия).

Б. Разработчики АТ.

В. Производители АТ¹⁵.

Г. Эксплуатанты¹⁶.

Д. Организации по ТО АТ¹⁷.

Е. Экземпляр ВС¹⁸.

Ж. Организации по ремонту АТ.

Аттестации подлежит авиационный персонал^{19,20}.

Заявителем на выдачу и получение Сертификата типа на образец авиационной техники конкретного типа является юридическое лицо, подавшее заявку в Федеральное автономное учреждение «Авиационный регистр Российской Федерации» (Авиарегистр России)²¹. Основной задачей при этом является установление соответствия авиационной техники и ее производства требованиям действующих авиационных правил.

Сертификат типа – документ, выдаваемый Разработчику и удостоверяющий соответствие установленной типовой конструкции конкретного образца авиационной техники требованиям Сертификационного базиса. Сертификационный базис – документ, содержащий требования к летной годности и охране окружающей среды, применимые к данному образцу авиационной техники.

Соответствие авиационной техники требованиям сертификационного базиса устанавливается на основании результатов сертификационных работ: инженерных анализов конструктор-

¹⁵ Авиационные правила. Часть 21. Сертификация авиационной техники, организаций разработчиков и изготовителей. М.: ОАО «АВИАИЗДАТ», 2013.

¹⁶ Об утверждении Федеральных авиационных правил. Требования к юридическим лицам, индивидуальным предпринимателям, осуществляющим коммерческие воздушные перевозки. Форма и порядок выдачи документа, подтверждающего соответствие юридических лиц, индивидуальных предпринимателей, осуществляющих коммерческие воздушные перевозки, требованиям федеральных авиационных правил. Приказ Министерства транспорта РФ от 13.08.2015 г. № 246.

¹⁷ Об утверждении Федеральных авиационных правил. Требования к юридическим лицам, индивидуальным предпринимателям, осуществляющим техническое обслуживание гражданских воздушных судов. Форма и порядок выдачи документа, подтверждающего соответствие юридических лиц, индивидуальных предпринимателей, осуществляющих техническое обслуживание гражданских воздушных судов, требованиям федеральных авиационных правил. Приказ Министерства транспорта РФ от 25.09.2015 г. № 285.

¹⁸ Об утверждении Федеральных авиационных правил. Экземпляр воздушного судна. Требования и процедуры сертификации. Приказ Министерства транспорта РФ от 16.05.2003г. № 132.

¹⁹ Об утверждении Федеральных авиационных правил. Требования к членам экипажа воздушных судов, специалистам по техническому обслуживанию воздушных судов и сотрудникам по обеспечению полетов (полетным диспетчерам) гражданской авиации. Приказ Министерства транспорта РФ от 12.09.2009 г. № 147.

²⁰ Об утверждении Федеральных авиационных правил. Требования к образовательным организациям и организациям, осуществляющим обучение специалистов соответствующего уровня согласно перечням специалистов авиационного персонала. Форма и порядок выдачи документа, подтверждающего соответствие образовательных организаций и организаций, осуществляющих обучение специалистов соответствующего уровня согласно перечням специалистов авиационного персонала, требованиям федеральных авиационных правил. Приказ Министерства транспорта РФ от 29.09.2015 г. № 289.

²¹ Об изменении и признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации. Постановление Правительства РФ от 28 ноября 2015 г. № 1283.

ской документации, расчетов, моделирования, анализа опыта эксплуатации авиационной техники и сертификационных испытаний.

Сертификационные работы проводятся в соответствии с действующими методами определения соответствия или методами, разработанными Заявителем и (или) Сертификационными центрами. Указанные методы подлежат одобрению Авиарегистром и указываются в программах сертификационных работ.

На рис. 3 представлена Многофункциональная интегрированная платформа с учетом степени ее реализации в рамках Информационно-аналитической системы НПП «Аэросила» по состоянию на начало 2019 г.

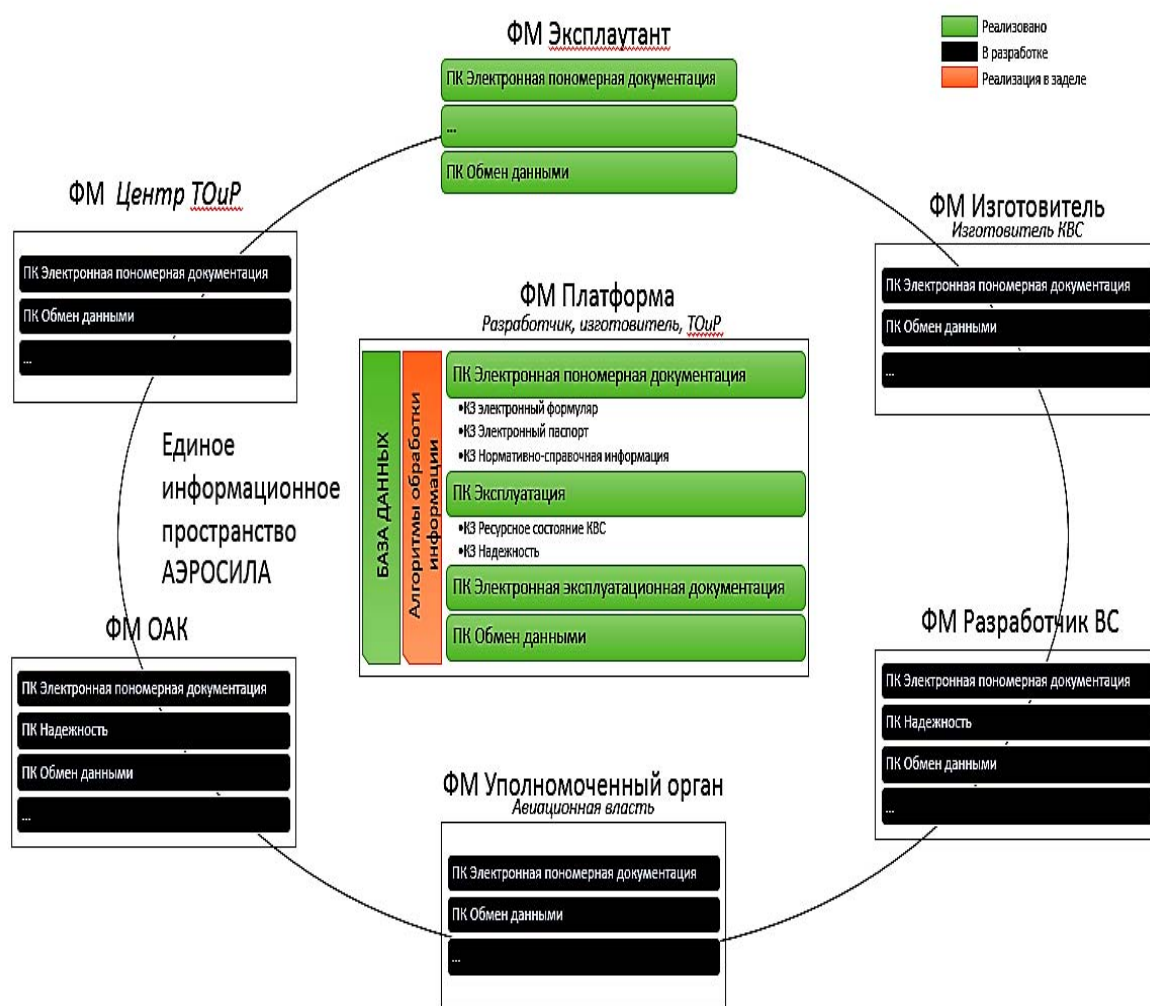


Рис. 3. Информационно-аналитическая система НПП «АЭРОСИЛА»
Fig. 3. Information and analytical system NPP "AEROSILA"

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, рассмотрен новый подход к решению научно-практической проблемы информационного обеспечения и комплексного послепродажного сопровождения основных процессов жизненного цикла гражданского воздушного судна.

Раскрыто содержание наиболее сложных задач по поддержанию летной годности, обеспечению и управлению безопасностью полетов в гражданской авиации России с учетом национальных и международных требований.

Представлены рекомендации по формированию Многофункциональной интегрированной платформы в рамках Информационно-аналитической системы сопровождения технической эксплуатации воздушных судов, действующей в научно-производственном предприятии «Аэросила».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Махитько В.П., Конев А.Н.** Методы анализа информации в системе послепродажного обслуживания воздушных судов // Научный вестник УВАУ ГА (И). 2014. № 6. С. 54–61.
2. **Смирнов Н.Н., Чинючин Ю.М.** Основы теории технической эксплуатации летательных аппаратов: учебник. М.: МГТУ ГА: Инсофт, 2015. 579 с.
3. **Далецкий С.В., Далецкий С.С., Плешаков А.И.** Терминологическое обеспечение технической эксплуатации гражданской авиационной техники // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2016. № 15 (326). С. 40–47.
4. **Любомиров И.С.** Система управления безопасностью полетов в организациях по техническому обслуживанию // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 178. С. 51–57.
5. **Баланчук Е.А., Баланчук Н.Ю.** Оценка рисков в системе управления безопасностью полетов при техническом обслуживании воздушных судов // Идеи К.Э. Циолковского в инновациях науки и техники: материалы 51-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. Калуга, 20-22 сентября 2016 г. С. 187.
6. **Arend D., Yantiss W., Vegega A.** Concept of safety management system embraced by many countries // ICAO Journal. 2006. Vol. 61, no. 6. Pp. 9–13.
7. **Вольсков Д.Г.** CALS-Технологии в основе сертификации компонентов воздушных судов // Вестник УлГТУ. 2014. № 2 (66). С. 46–50.
8. **Зубков Б.В., Прозоров С.Е.** Безопасность полётов: учебник / Под ред. Б.В. Зубкова. М.: МГТУ ГА, 2011. 456 с.
9. **Ахметшин Т.Ф.** Сертификация авиационной техники // Вестник УГАТУ. 2014. Т. 18, № 2 (63). С. 10–18.
10. **Bugaja M.** Aircraft maintenance reserves-new approach to optimization / M. Bugaja, T. Urminskya, J. Rostasa, P. Pechoa // Transportation Research Procedia. 2019. Vol. 43. Pp. 31–40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.12.016>
11. **Книгель А.Я.** Риски авиатранспортной системы и разработчиков воздушных судов // АвиаСоюз. 2015. № 3/4. С. 60–63.
12. **Мельник Д.М.** Принципы интеграции системы управления качеством и системы управления безопасностью полетов в авиационном предприятии // Транспорт Российской Федерации. 2015. № 6 (61). С. 47–50.
13. **Полищук Н.В.** Интегрированная логистическая поддержка и стоимость жизненного цикла воздушного судна // Транспортное дело России. 2017. № 4. С. 112–116.
14. **Кирпичев И.Г., Кулешов А.А., Шапкин В.С.** Основы построения и функционального развития информационно-аналитической системы мониторинга жизненного цикла компонентов воздушных судов // Воздушный транспорт гражданской авиации. 2008. № 36. С. 6.
15. **Wang F.** Aircraft auxiliary power unit performance assessment and remaining useful life evaluation for predictive maintenance / F. Wang, J. Sun, X. Liu, C. Liu // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy. 2020. Vol. 234, iss. 6. Pp. 804–816. DOI: [10.1177/0957650919883718](https://doi.org/10.1177/0957650919883718)
16. **Ицкович А.А.** Управление качеством процессов технической эксплуатации авиационной техники: учебное пособие / А.А. Ицкович, Ю.М. Чинючин, Н.Н. Смирнов, И.А. Файнбург. М.: МГТУ ГА, 2011. 112 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Кирпичев Игорь Геннадьевич, доктор технических наук, профессор кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиадвигателей МГТУ ГА, ig.kirpichev@gmail.com.

Петров Дмитрий Владимирович, ведущий инженер-программист, ПАО «Научно-производственное предприятие «Аэросила»», petrovbox@gmail.com.

Чинючин Юрий Михайлович, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиадвигателей МГТУ ГА, yu.chinyuchin@mstuca.aero.

MULTI-FUNCTIONAL INTEGRATED TECHNICAL SUPPORT PLATFORM OF AIRCRAFT MAINTENANCE

Igor G. Kirpichev¹, Dmitry V. Petrov², Yury M. Chinyuchin¹

¹*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

²*PAO "Research and Production Enterprise "Aerosila", Stupino, Russia*

ABSTRACT

The article discusses the formation of complex tasks of information support processes of development, manufacturing and subsequent mass long-term operation of new and advanced aircraft, aimed at further development of innovative approaches to integrated cross-industry system (platform) after-sales support of technical and flight-technical operation of civil aircraft. The article reveals the content of the main tasks focused on ensuring and managing flight safety in civil aviation of Russia and interrelated with the recommendations and legislative requirements of Annex 19 to the ICAO Convention and the Safety Management Manual. The most important factor in this case is to take into account the most complex requirements for the flight safety management system associated with maintaining the airworthiness of aircraft as a mode of transport of particular risk of use. The analysis was carried out and the General Scheme of the Multifunctional Integrated Platform was developed within the framework of the Information and Analytical Support System for the technical operation of aircraft components in relation to the scientific and production enterprise "Aerosila". The developed integrated platform realized in this air enterprise and providing information support on the allocated main functional modules is presented: the module "Safety Management System"; the module "Quality System"; the module "Certification" on the allocated objects of certification. As a result, a common information and analytical system was built, taking into account the degree of its implementation in the conditions of "Aerosila" air enterprise.

Key words: maintenance, aircraft, flight safety management, multi-functional integrated platform, functional modules, information support tasks.

REFERENCES

1. **Makhitko, V.P. and Konev, A.N.** (2014). *Mathematical models and the quantitative methods of control of aircraft reliability*. Nauchnyy vestnik UVAU GA (I), no. 6, pp. 54–61. (in Russian)
2. **Smirnov, N.N. and Chinyuchin, Yu.M.** (2015). *Osnovy teorii tekhnicheskoy ekspluatatsii letatelnykh apparatov: uchebnik* [Fundamentals of the aircraft technical operation theory: Textbook]. Moscow: MGTU GA: Insoft, 579 p. (in Russian)
3. **Daletskiy, S.V., Daletskiy, S.S. and Pleshakov, A.I.** (2016). *Terminological providing technical operating civil aviation*. Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII Ga), no. 15 (326), pp. 40–47. (in Russian)
4. **Lyubomirov, I.S.** (2012). *Safety management system (sms) for maintenance organizations*. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, no. 178, pp. 51–57. (in Russian)
5. **Balanchuk, E.A. and Balanchuk, N.Yu.** (2016). *Otsenka riskov v sisteme upravleniya bezopasnostyu poletov pri tekhnicheskoy obsluzhivaniy vozdukhnykh sudov* [Risk assessment in the flight safety management system during aircraft technical maintenance]. Idei K.E. Tsiolkovskogo v inno-

vatsiyakh nauki i tekhniki: materialy 51st Nauchnykh chteniy pamyati K.E. Tsiolkovskogo [K.E. Tsiolkovsky's ideas in innovative science and technology: Proceedings of 51st Scientific readings in memory of K. E. Tsiolkovsky], pp. 187. (in Russian)

6. **Arend, D., Yantiss, W. and Vegaga, A.** (2006). *Concept of safety management system embraced by many countries*. ICAO Journal, vol. 61, no. 6, pp. 9–13.

7. **Volskov, D.G.** (2014). *Cals technology as a base of certification aircraft components*. Vestnik UIGTU, no. 2 (66), pp. 46–50. (in Russian)

8. **Zubkov, B.V. and Prozorov, S.E.** (2011). *Bezopasnost poletov. Uchebnik* [Flight safety: Textbook]. Moscow: MGTU GA, 456 p. (in Russian)

9. **Akhmetshin, T.F.** (2014). *Aviation techniques certification*. Vestnik UGATU, vol. 18, no. 2 (63), pp. 10–18. (in Russian)

10. **Bugaja, M., Urminskya, T., Rostasa, J. and Pechoa, P.** (2019). *Aircraft maintenance reserves—new approach to optimization*. Transportation Research Procedia, vol. 43, pp. 31–40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.12.016>

11. **Knivel, A.Ya.** (2015). *Riski aviatransportnoy sistemy i razrabotchikov vozdushnykh sudov* [Risks of the air transport system and aircraft developers]. AviaSoyuz, no. 3/4, pp. 60–63. (in Russian)

12. **Melnik, D.M.** (2015). *Principles of integration of quality management system and flight safety control system in an aviation enterprise*. Transport Rossiyskoy Federatsii, no. 6 (61), pp. 47–50. (in Russian)

13. **Polishchuk, N.V.** (2017). *Integrated logistic support and value of aircraft life cycle*. Transportnoe delo Rossii, no. 4, pp. 112–116. (in Russian)

14. **Kirpichev, I.G., Kuleshov, A.A. and Shapkin, V.S.** (2008). *Osnovy postroyeniya i funktsionalnogo razvitiya informatsionno-analiticheskoy sistemy monitoringa zhiznennogo tsikla komponentov vozdushnykh sudov* [Constructional and functional development basics of an information and analytical system for monitoring the aircraft components life cycle]. Vozdushnyy transport grazhdanskoy aviatsii, no. 36, p. 6. (in Russian)

15. **Wang, F., Sun, J., Liu, X. and Liu, C.** (2020). *Aircraft auxiliary power unit performance assessment and remaining useful life evaluation for predictive maintenance*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, vol. 234, issue 6, pp. 804–816. DOI: [10.1177/0957650919883718](https://doi.org/10.1177/0957650919883718)

16. **Itskovich, A.A., Chinyuchin, Yu.M., Smirnov, N.N. and Faynburg, I.A.** (2011). *Upravleniye kachestvom protsessov tekhnicheskoy ekspluatatsii aviatsionnoy tekhniki: uchebnoye posobiye* [The processes of quality management in aviation equipment maintenance: Tutorial]. Moscow: MGTU GA, 112 p. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTORS

Igor G. Kirpichev, Doctor of Technical Sciences, Professor of Technical Operation of Aircraft and Aircraft Engines Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, ig.kirpichev@gmail.com.

Dmitriy V. Petrov, Senior Software Engineer, PJSC "Scientific-Production Enterprise "Aerosila", petrovbox@gmail.com.

Yuri M. Chinyuchin, Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of Technical Operation of Aircraft and Aircraft Engines Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, yu.chinyuchin@mstuca.aero.

УДК 629.7.071

DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-6-40-52

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗОН ОПЕРИРОВАНИЯ ДАЛЬНЕМАГИСТРАЛЬНЫХ САМОЛЕТОВ

К.А. КУЦ¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации,
г. Санкт-Петербург, Россия

Определение зон оперирования от маршрутных запасных аэродромов для дальнемагистральных самолетов авиакомпании является важным аспектом обеспечения безопасности предстоящего полета. В отечественной и зарубежной методической литературе по планированию полетов, в том числе в инструктивном материале к системам планирования полетов отсутствует единый обоснованный алгоритм построения зон оперирования дальнемагистральных самолетов в том числе и при использовании правил EDTO-ETOPS. Отсутствие методических материалов приводит к «свободному» определению авиакомпаниями значений зон оперирования для своих дальнемагистральных самолетов при построении маршрутов, в частности при определении зон оперирования на маршрут игнорируется уменьшение массы самолета в процессе сгорания топлива. Большой вопрос вызывает и вычисление «первоначальной» массы для определения значения зоны оперирования. В статье выявлены недостатки существующего алгоритма определения зоны оперирования на основании фундаментальных методов определения зоны оперирования. С помощью Microsoft Excel 2019 проведена полиномиальная аппроксимация таблично заданной функции зависимости радиуса зоны оперирования от массы дальнемагистрального самолета. На основе определенных уравнений разработан более совершенный алгоритм определения зон оперирования. Особое внимание в новом алгоритме уделено выбору исходного значения зоны оперирования. Расчеты в статье выполнены для Boeing 777 как для основного типа дальнемагистрального самолета, эксплуатирующегося в авиакомпаниях Российской Федерации. Разработанный алгоритм повышает гибкость прокладки маршрута за счет увеличения радиуса зоны оперирования от маршрутных запасных аэродромов и может быть использован в системах планирования полетов авиакомпаний.

Ключевые слова: зона оперирования, маршрутный запасной аэродром, EDTO, ETOPS, скорость ухода при отказе двигателя OEI, скорость ухода при всех работающих двигателях AEO, дальнемагистральный самолет, Боинг 777.

ВВЕДЕНИЕ

Начало эксплуатации дальнемагистральных самолетов зарубежного производства в авиакомпаниях Российской Федерации в 90-х годах потребовало существенного пересмотра методов и средств планирования полетов [1]. Одним из вопросов, подлежащих методическому разъяснению, был вопрос определения зоны оперирования (ЗО) дальнемагистрального самолета (ДМС) при полете с использованием правил ETOPS и/или EDTO (с 2012 года). В нормативных документах для планирования полетов приведены выражения типа: «каждая точка маршрута должна пролетать не далее X минут полета в штатных условиях стандартной атмосферы от подходящего маршрутного запасного аэродрома»^{1,2}. Понятно, что на карте или в системе планирования при прокладке маршрута не построить «время» от выбранного маршрутного запасного аэродрома (МЗА), и, очевидно, что необходимо «преобразовать» время в единицы расстояния – морские мили Nautical Mile (NM).

Для перевода времени в единицы расстояния эксплуатанты используют специальные таблицы, предоставляемые производителем ДМС, где указаны радиусы ЗО, соответствующее, например, Boeing публикует для каждого типа ДМС отдельное руководство по планированию полетов и летным характеристикам Flight Planning and Performance Manual (FPPM). В руковод-

¹ Приложение 6. Эксплуатация воздушных судов. Часть I. Международный коммерческий воздушный транспорт. Самолеты. 10-е изд. Монреаль: ИКАО, июль 2016.

² Федеральные авиационные правила «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации», утв. Приказом Минтранса РФ от 31 июля 2009 г. № 128.

стве содержатся таблицы соответствия значений времени и единиц расстояния – зона оперирования Area of Operation. Эксплуатант выбирает значение радиуса ЗО для своих типов ДМС и публикует его в своем руководстве по производству полетов, например, у многих авиакомпаний Российской Федерации представлена таблица следующего типа (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Радиусы зон оперирования ДМС авиакомпании Y
Radius of long-range aircraft (LRA) operation areas for Airline Y

Тип ДМС	Время ухода на МЗА	
	60 минут	180 минут
Тип 1 – 2х-двигательный	444 NM	1306 NM
Тип 2 – 4х-двигательный	–	1500 NM
Тип 3 – 2х-двигательный	431 NM	1272 NM

Указанные в табл. 1 фиксированные значения, выбранные эксплуатантом, закладываются в систему планирования полетов и используются для построения маршрутов ДМС. Кроме того, указанные значения радиусов ЗО ДМС откладываются от характерных МЗА на картах прокладки маршрутов Plotting Chart³, выпускаемых по заказу эксплуатанта.

Использование фиксированных значений радиусов ЗО, определенного методом «свободного выбора» значения из таблицы FPPM, имеет ряд существенных методических недостатков, связанных с учетом уменьшения массы ДМС в полете, вызванным сгоранием топлива. Недостатки будут устранены с помощью Microsoft Excel 2019 и полиномиальной аппроксимации таблично заданной функции зависимости радиуса ЗО от массы ДМС, на основе результатов которой разработан усовершенствованный алгоритм определения ЗО.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ РАДИУСА ЗОНЫ ОПЕРИРОВАНИЯ ОТ МАССЫ ДАЛЬНЕМАГИСТРАЛЬНОГО САМОЛЕТА

Определение радиуса ЗО производится путем расчета расстояния, которое пролетит ДМС при возникновении одного из двух критических сценариев: отказа двигателя для двухдвигательных ДМС и разгерметизации для ДМС с количеством двигателей более двух, следовательно, приборные скорости ухода обозначаются как One-Engine Inoperative Speed (OEI) для двухдвигательных ДМС и All-Engine Operative Speed (AEO) для ДМС с количеством двигателей более двух [2]. Выбор оптимальной OEI для двухдвигательного ДМС главным образом зависит от фактора наличия препятствий (рельефа) вдоль возможных траекторий ухода на МЗА. Каждой OEI соответствует заданная (оптимальная) высота ухода на МЗА, которая будет тем выше, чем меньше OEI. Определить оптимальные высоты при подборе OEI можно с помощью номограмм для каждой OEI в FPPM⁴.

Из номограмм FPPM видно, что оптимальная высота полета зависит не только от OEI, но и от массы самолета в точке отказа двигателя – начала снижения для ухода на МЗА с OEI. Логично заметить, что чем больше масса, тем меньше будет оптимальная высота ухода при вы-

³ Jeppesen Plotting Charts [Электронный ресурс]. URL: <http://ww1.jeppesen.com/documents/support/aviation/document/plotting-charts-2010.pdf> (дата обращения 12.10.2020).

⁴ Boeing 777-300ER Flight Planning and Performance Manual: Flight Operations Engineering Boeing Commercial Airplane Group, Seattle, Washington, USA, Document Number: D632W003-WY110, Revision Number: 00, Revision Date: 30 March, 2012.

держивании заданной OEI, а, следовательно, самолет пролетит меньшее расстояние при той же приборной OEI, так как истинная скорость на меньшей высоте будет меньше, а значит радиус ЗО будет больше. Опустим сам вопрос пересчета времени ухода в единицы расстояния в штилевых условиях, так как возможны разные методы, один из которых предложен в статье [3], и рассмотрим готовые таблицы ETOPS Area of Operation из FPPM Boeing 777-300ER (табл. 2). На большинстве маршрутов минимальная безопасная высота GRID MORA в ЗО позволяет использовать максимальную скорость ухода на МЗА. Для Boeing 777-300ER эксплуатанты обычно выбирают максимальную OEI M0.84/320 KIAS. Выберем фрагмент таблицы для наиболее характерных значений времен ухода на МЗА – 60, 90, 120 и 180 минут.

Таблица 2
Table 2

Радиусы зон оперирования ETOPS Boeing 777-300ER на скорости M0.84/320 KIAS в NM⁵
ETOPS Area of Operation radius Boeing 777-300ER on M0.84/320 KIAS speed in NM⁵

Масса в точке отказа двигателя (тонны)	Время ухода на МЗА (минуты)			
	60	90	120	180
360	425	632	839	1252
340	433	643	853	1273
320	439	652	865	1291
300	444	659	875	1306
280	450	668	885	1321
260	456	677	897	1339
240	462	686	910	1358
220	467	694	922	1376
200	472	702	933	1393
180	475	708	940	1405
160	477	712	946	1414
Изменение радиуса (R) ЗО	52	80	107	162

На основании данных таблицы с использованием Microsoft Excel 2019 определим зависимости радиуса ЗО R от массы ДМС в точке отказа двигателя m (рис. 1).

Возможности Microsoft Excel 2019 позволяют автоматически произвести аппроксимацию табличных данных с вычислением уравнения. Наиболее точно описывает указанные графики полином второй степени, уравнения $R=f(m)$ приведены на рис. 1. Степень достоверности такой аппроксимации достаточно высокая: 60 минут – 0,9978; 90 минут – 0,9983; 120 минут – 0,9974; 180 минут – 0,9978. Отметим, что изменение радиуса ЗО при изменении массы от минимальной до максимальной может составлять от 52 NM при 60 минутах и 162 NM при 180 минутах, а отсюда следует, что чем выше время ухода на МЗА, тем больше изменение радиуса ЗО.

⁵ Boeing 777-300ER Flight Planning and Performance Manual: Flight Operations Engineering Boeing Commercial Airplane Group, Seattle, Washington, USA, Document Number: D632W003-WY110, Revision Number: 00, Revision Date: 30 March, 2012.

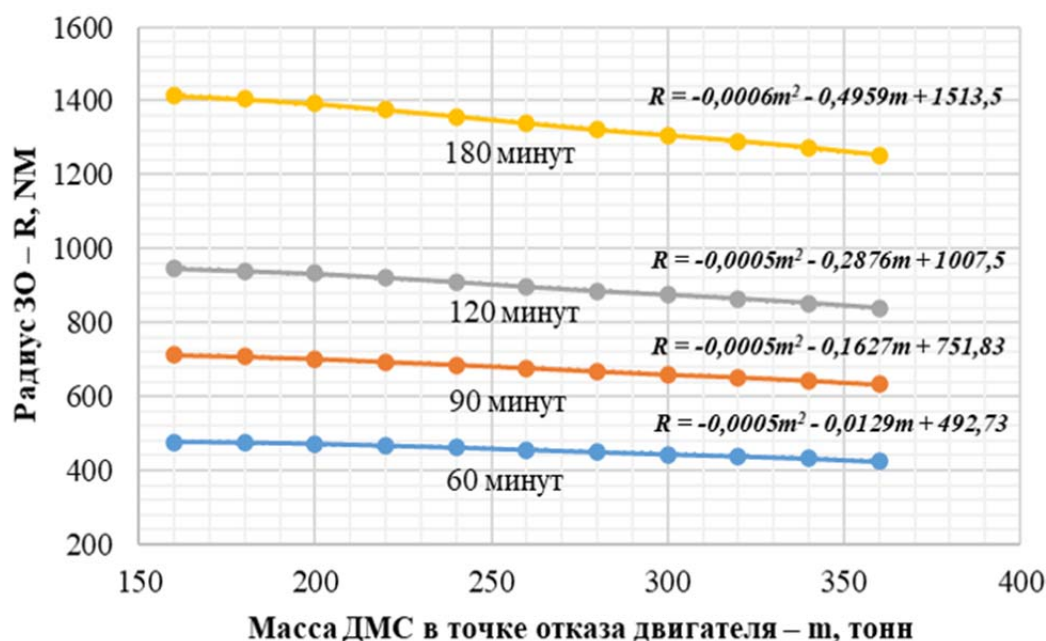


Рис. 1. Графики зависимости радиуса ЗО от массы ДМС в точке отказа двигателя
Fig. 1. Graphs of the Area of Operation radius dependence on the LRA mass at the point of engine failure

Полученные уравнения и графики для Boeing 777-300ER опубликованы впервые и будут использованы далее для определения радиуса ЗО в новом алгоритме. Аналогичные уравнения могут быть вычислены и для других значений ОЕИ или АЕО, времен ухода, а также типов ДМС.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДИУСОВ ЗОН ОПЕРИРОВАНИЯ ДАЛЬНЕМАГИСТРАЛЬНЫХ САМОЛЕТОВ

Алгоритм определения ЗО ДМС является частью более крупного алгоритма планирования полетов, куда входят алгоритмы построения маршрута в воздушном пространстве ОВД и выбора МЗА. Алгоритм планирования полетов формализован в системах планирования полетов, используемых авиакомпаниями таких, как Sabre, Jeppesen JetPlanner Pro, SITA и/или других. Первичным является алгоритм построения маршрута в структуре воздушного пространства [4], затем следует алгоритм подбора МЗА, который в данный момент совмещен с определением ЗО ДМС [5]. Алгоритм циклический и если, например, невозможно подобрать МЗА с указанным сертифицированным для ДМС радиусом ЗО, то он изменяет маршрут в структуре воздушного пространства [6]. Из сложного алгоритма планирования полетов в компьютерной системе выделим алгоритм определения выбора МЗА и определения-построения ЗО ДМС (рис. 2).

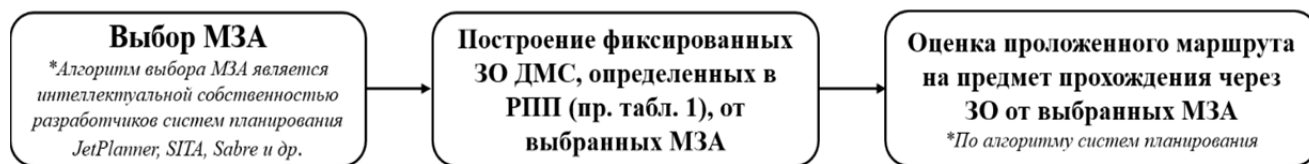


Рис. 2. Существующий алгоритм определения ЗО ДМС
Fig. 2. Existing algorithm for determining AO of LRA

В недостатках существующего алгоритма определения ЗО ДМС нельзя обвинять разработчиков систем планирования или авиакомпании, ведь они вынуждены руководствоваться нормативными документами, такими, как Boeing ETOPS Guide и новым ICAO Doc 10085 «Руководство по EDTO». В Boeing ETOPS Guide⁶ прямо указано, что необходимо брать наибольший полетный вес (в примере 280 тонн) на участке радиуса ETOPS от 60 минут. Каким образом вычисляется данный вес не сказано, что и приводит к непониманию эксплуатантами, какую массу для определения радиуса ЗО ДМС выбирать. Очевидно, что в каждом полете даже расчетная взлетная масса, обозначаемая в системах планирования как Estimated Take-off Weight (ETOW), будет разная, так как заправка и коммерческая загрузка разные. «Свежий» Doc 10085⁷ также не дает никаких разъяснений по определению массы ДМС для расчета ЗО, лишь сказано, что необходимо руководствоваться эксплуатационной документацией ДМС. Получается, что главным недостатком существующего алгоритма является отсутствие учета увеличения радиуса ЗО вследствие изменения массы ДМС, что показано выше.

Основой нового алгоритма является вычисление расчетной массы ДМС в наиболее удаленной точке от каждого МЗА, то есть массы в наиболее удаленной точке возможного отказа двигателя, которая используется для расчета радиуса ЗО. В связи с недостатками существующего алгоритма первая задача, которая подлежит решению является определение первоначального радиуса ЗО, а значит определения первоначальной массы в критической точке. В большинстве случаев в качестве первого МЗА выбирается аэродром вылета, что обусловлено как причинами его пригодности по метеоусловиям и NOTAM, так и по наличию средств обслуживания и/или представительства авиакомпании, поэтому целесообразно определить массу для расчета первоначального радиуса ЗО как разницу между расчетной взлетной массы ETOW и расчетной израсходованной массы топлива за сертифицированное время ухода на МЗА – ΔQ . Его легко вычислить по номограммам и таблицам FCOM и FPPM⁸ или непосредственно в системе планирования полетов.

Масса для определения первоначального радиуса ЗО M_{R0} вычисляется по формуле (1):

$$M_{R0} = ETOW - \Delta Q. \quad (1)$$

По вычисленной из формулы (1) массы M_{R0} с использованием представленных выше таблиц или формул определяется первоначальный радиус ЗО. Затем с использованием системы планирования в горизонтальной плоскости осуществляется построение ЗО с постоянным первоначальным радиусом R_0 от выбранных МЗА [7]. С помощью системы планирования полетов определим точки выхода из ЗО МЗА (рис. 3). Обозначим их как критические точки Critical Point (CP, КТ) и отметим, что определение КТ более целесообразно при построении маршрута ДМС, чем определение равноудаленных точек Equal Time Point (ETP)^{6,7}, так как фактическое положение ETP будет отлично от расчетного для штилевых условий положения, а также по другим причинам, связанным с безопасностью полета ДМС [8].

Система планирования полетов определяет не только КТ, но и расчетные массы ДМС в данных точках $M_{R0}, M_{R1}, \dots, M_{Rn}$, которые в дальнейшем будем использовать для расчета новых радиусов ЗО. Сами КТ, массы в КТ, а также рассчитанные по новым массам радиусы рекомендуется публиковать в рабочем плане полета Operational Flight Plan (OFP, табл. 3). Уточним, что обычно публикуется не масса ДМС, а расчетный остаток топлива на борту.

⁶ ETOPS Guide Volume III «Operational Guidelines and Methods»: Flight Operations Engineering Boeing Commercial Airplane Group, Seattle, Washington, USA, rev. 2, 6 March, 2009. P. 4.33.

⁷ Doc 10085. Руководство по производству полетов с увеличенным временем ухода на запасной аэродром (EDTO). Монреаль: ИКАО, 1-е изд., 2017. С. 3-2. Перевод времени ухода на МЗА в единицы расстояния.

⁸ Boeing 777-300ER Flight Planning and Performance Manual: Flight Operations Engineering Boeing Commercial Airplane Group, Seattle, Washington, USA, Document Number: D632W003-WY110, Revision Number: 00, Revision Date: 30 March, 2012.

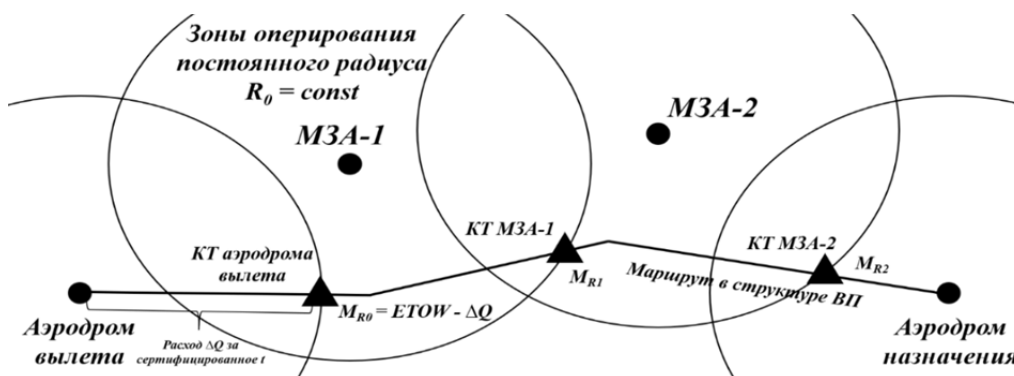


Рис. 3. Первый этап построения ЗО и определение КТ
Fig. 3. First Stage of AO building and CP determining

Таблица 3
Table 3

Пример фрагмента OFP с определением КТ и радиусов ЗО
Example of an OFP fragment with the determination of CP and AO radius

Пункт маршрута	Маршрут ОВД	Эшелон полета	Остаток топлива, кг	Радиусы ЗО Area of Operation
LI717	KERIS 1A	CLB	62 043	
OLBID	R496	FL350	51 354	
ABELO	T631	FL350	49066	
CP EA ULLI	A920	FL350	45 523	Radius 1346 NM ETOPS 180
LASAD	A91	FL390	26 204	
TEPOD	B451	FL390	20 403	
CP EA UIBB	B451	FL390	15 250	Radius 1370 NM ETOPS 180

Колонка 5 табл. 3 с указанием радиусов ЗО может быть опубликована как строкой под CP EA ULLI (ИКАО-код МЗА), так и в любом другом месте OFP, это зависит от системы планирования. Вторым этапом необходимо построить новые радиусы ЗО от МЗА и убедиться, что вновь построенные ЗО покрывают маршрут (рис. 4).

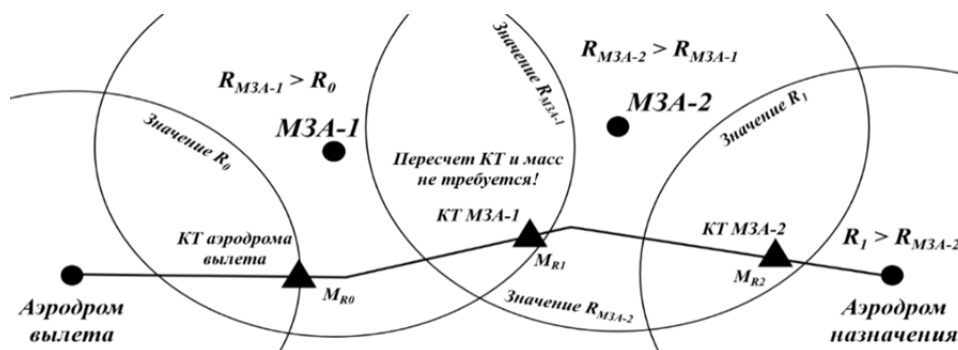


Рис. 4. Второй этап – построение ЗО с новыми значениями радиусов
Fig. 4. The second stage – building AO with new radii values

Можно отметить, что полученные при построении новых ЗО КТ сместятся из-за изменения радиусов ЗО, а значит и массы ДМС в них будут другие, следовательно можно провести еще несколько итераций по увеличению радиуса ЗО, однако это не рекомендуется делать по ряду причин.

1. Добавочное увеличение радиуса ЗО за счет каждой итерации крайне невелико и будет в большинстве случаев не более 1 NM из расчета изменения радиуса 1 NM на тонну массы, что видно из табл. 2. Кроме того, изменения радиуса ЗО не коснутся аэродрома вылета, выбранного в качестве первого МЗА.

2. Допуски, установленные Приложением 6 ИКАО⁹ на работу критически важных систем EDTO, составляют 15 минут, что в единицах расстояния на порядки больше 1 NM.

3. Разработанный алгоритм должен быть понятным не только компьютеру, для которого количество итераций безразлично, но летному и полетно-диспетчерскому составу, который будет выполнять и обслуживать полет ДМС. Например, при публикации начальных КТ в OFP, для экипажа будет понятно, какие значения масс использовались для расчета радиусов ЗО.

Определенные ЗО и КТ, по которым производилось вычисление рекомендуется отображать на полетной карте в электронных полетных планшетах пилотов и на экране навигационных дисплеев. Отображение КТ, включенных в файл маршрута бортового компьютера, на навигационных дисплеях не имеет сложностей и может быть выполнено автоматически при загрузке маршрута по ACARS в отличие от отображения ЗО [9]. Пилотажно-навигационные комплексы большинства эксплуатируемых ДМС, как и электронные планшеты пилотов не имеют возможности автоматического отображения ЗО, но можно это осуществить вручную. На самолетах Boeing это выполняется на странице FIX бортового компьютера: вводится ИКАО-код МЗА и радиус ЗО, что отображает ЗО на навигационном дисплее зелеными линиями. Отображение ЗО от МЗА на навигационном дисплее повышает информационную поддержку экипажа при принятии решения об уходе на МЗА, в частности при полете EDTO-ETOPS, что крайне важно для повышения безопасности полетов ДМС⁷.

4. Итерационный перерасчет положения КТ, масс и радиусов ЗО неоправданно усложняет алгоритм при необходимости выбора меньшей OEI из-за наличия препятствий. Это обусловлено тем, что высота снижения на одном отказавшем двигателе Driftdown Altitude будет тем больше, чем меньше OEI. Например, при OEI 320 KIAS она составляет от 8000 до 21800 ft, а при OEI 260 KIAS от 9800 до 29600 ft в зависимости от массы и температуры¹⁰. В любом случае расчетная Driftdown Altitude не должна быть ниже GRID MORA.

Дополним разработанный алгоритм важными деталями: радиус ЗО зависит не только от массы, но и от выбранной OEI/АЕО. Расчет первоначального радиуса ЗО рекомендуется производить при максимальной OEI, допущенной производителем ДМС (для Boeing 777-300ER M0.84/320 KIAS), даже если в ЗО аэродрома вылета имеются препятствия, требующие уменьшить OEI. Первоначальный расчет и построение ЗО по максимальной OEI необходим по той причине, что на земном шаре в принципе нет маршрутов ДМС (более 3000 NM) на которых в более, чем двух ЗО от МЗА имеются препятствия, требующие уменьшения OEI. Очевидно, что при полете, например, над океаном целесообразно брать максимальную OEI для расчета ЗО.

⁹ Приложение 6. Эксплуатация воздушных судов. Часть I. Международный коммерческий воздушный транспорт. Самолеты. 10-е изд. Монреаль: ИКАО, июль 2016.

¹⁰ Boeing 777-300ER Flight Planning and Performance Manual: Flight Operations Engineering Boeing Commercial Airplane Group, Seattle, Washington, USA, Document Number: D632W003-WY110, Revision Number: 00, Revision Date: 30 March, 2012.

Чаще всего имеет место быть ситуация наличия препятствий в одной из ЗО по маршруту. Например, при полете через Северную Атлантику при выборе МЗА на территории Гренландии (рис. 5).

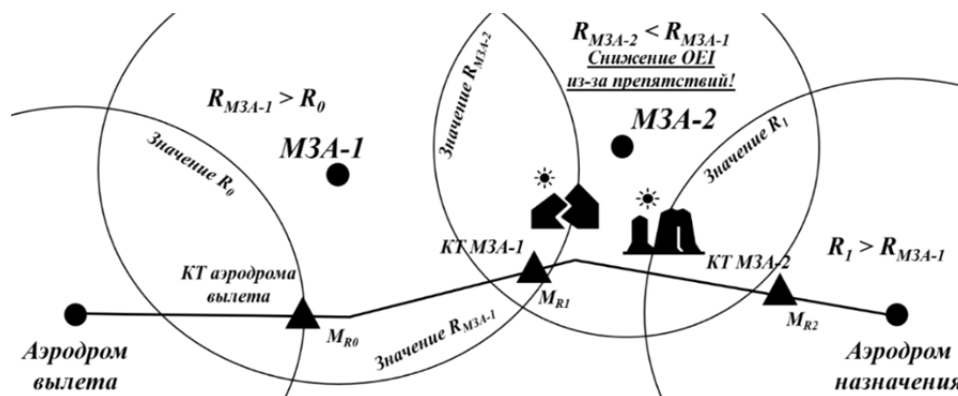


Рис. 5. Вычисление уменьшенных радиусов ЗО при наличии препятствий
Fig. 5. Calculating reduced areas of operation radii in the presence of obstacles

В таком случае следует произвести расчет КТ по максимальной массе, а затем, в ЗО от МЗА, где имеются препятствия расчет радиуса произвести по уменьшенной ОЕИ. Отображение уменьшенной ЗО крайне важно для экипажа, так как он будет осуществлять уход на МЗА на сниженной ОЕИ, выдерживая необходимый запас высоты над препятствиями¹¹.

В теории и практике полетно-диспетчерского обслуживания ДМС может сложиться следующая ситуация: система планирования полетов и/или полетный диспетчер, как оператор данной системы обнаружит, что фиксированные ЗО (табл. 1) от выбранных МЗА не покрывают маршрут, следовательно планировать такие МЗА нельзя и существует три варианта решения данной проблемы.

1. Подбор других МЗА – не всегда возможно.
2. Изменение или удлинение маршрута – экономически не выгодно.
3. Увеличение сертифицированного времени ухода на МЗА – экономически не выгодно.

Новый алгоритм позволит решить эту ситуацию без потерь за счет точного выбора первоначального радиуса и увеличения радиусов ЗО от выбираемых МЗА (рис. 6).

В числе прочего можно разобрать случаи, когда первый МЗА не является аэродромом вылета, однако при таком раскладе также рекомендуется дополнительно использовать ЗО от аэродрома вылета для первоначального расчета радиуса. Радиус ЗО первого МЗА будет увеличен, если он находится далее по маршруту, чем аэродром вылета за счет того, что в КТ от первого МЗА ДМС будет иметь меньшую массу, чем в КТ от аэродрома вылета, который в указанном случае не используется в качестве МЗА. В случае, если первый МЗА находится до аэродрома вылета, что крайне редко, то его ЗО будет уменьшена соответственно массе в КТ от данного МЗА, изначально определенной по первоначальному радиусу (рис. 7).

¹¹ ETOPS Guide Volume III «Operational Guidelines and Methods»: Flight Operations Engineering Boeing Commercial Airplane Group, Seattle, Washington, USA, rev. 2, 6 March, 2009. P. 4.33.

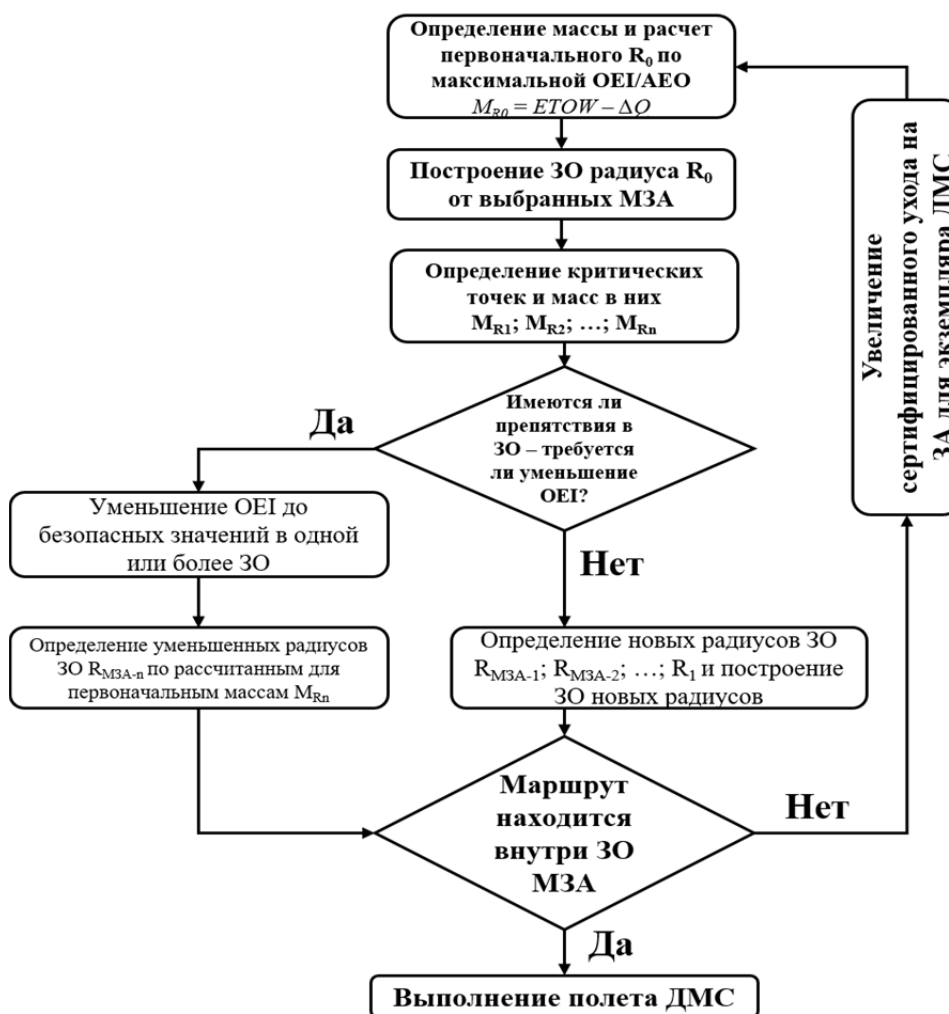


Рис. 6. Новый алгоритм определения ЗО ДМС
Fig. 6. The new algorithm for determining AO of LRA



Рис. 7. Расчет радиусов ЗО при аэродроме вылета, не являющимся МЗА
Fig. 7. Calculation of AO radii at the departure aerodrome that is not en route alternate aerodrome

Из рис. 7 видно, что КТ таких МЗА, публикуемые в OFP, будут располагаться соответственно ближе или дальше границ ЗО от данных МЗА.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный алгоритм имеет ряд преимуществ, основным из которых является использование обоснованных значений радиусов ЗО при планировании полета ДМС. Авиакомпаниям все чаще сталкиваются с проблемами выбора МЗА на кратчайшем маршруте [10]. Так, разработанный алгоритм поможет не только решить проблему выбора кратчайшего маршрута Москва – Якутск авиакомпании Аэрофлот при утверждении порогового времени EDTO 90 минут для Boeing 737-800, но и оптимизировать маршрут при существующем ограничении 60 минут [11]. Дороговизна сертификации ДМС авиакомпаний для полетов EDTO-ETOPS вынуждает их идти на нарушения и подвергать угрозе безопасность полетов [12]. Так, в 2019 году Росавиация лишила авиакомпанию Nordwind права выполнять полеты по ETOPS на своем флоте Boeing 777¹². Новый алгоритм позволит значительно оптимизировать полеты через Северную Атлантику при использовании порогового времени 90 минут для двухдвигательных ДМС и при существующих 60 минутах, что позволит снизить расходы даже при введенных ограничениях сертификата эксплуатанта [13].

Предложенный алгоритм может стать альтернативой постоянному увеличению сертификационного времени ухода на МЗА [14]. Изначально траектории в Северной Атлантике подразумевали использование ЗО ETOPS минимум 120 минут, что требовало дополнительной подготовки экипажа [15]. В 90-х и двухтысячных годах FAA последовательно принимало решения о еще большем увеличении сертификационного времени (до 330 минут для Boeing 777¹³), что позволило авиакомпаниям выполнять полеты практически без МЗА [16], но также встретило и сопротивление летного состава, который был против временного увеличения ЗО ДМС и считал такое увеличение небезопасным [17].

Дальнемагистральные перевозки наиболее подвержены экономическому кризису, зачастую становятся убыточными и авиакомпании вынуждены покрывать затраты на них за счет среднемагистральных рейсов, так как этот сегмент перевозок имеет наиболее длительный период восстановления [18, 19, 20]. Разработанный алгоритм позволит оптимизировать затраты авиакомпании на эксплуатацию ДМС в условиях экономического кризиса, например, за счет сокращения сертифицированного времени ухода на запасной аэродром.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абрамов Б.А., Акопян К.Э., Шапкин В.С.** Проблемы эксплуатации воздушных судов иностранного производства // Научный Вестник МГТУ ГА. 2011. № 163. С. 14–23.
2. **Коваленко Г.В., Микинелов А.Л., Чепига В.Е.** Летная эксплуатация. Ч. 1: учебное пособие для вузов / Под ред. Г.В. Коваленко. 2-е изд. Санкт-Петербург: Наука, 2016. 462 с.
3. **Кузнецов С.В., Марасанов Л.О., Перегудов Г.Е.** Научно-практические аспекты производства полетов с использованием RVSM, PBN, CATII и CATIII, EDTO/ETOPS, TCAS, EGPWS и EFB // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 1. С. 177–185.
4. **Рудельсон Л.Е.** Алгоритмические задачи автоматизации планирования использования воздушного пространства // Научный Вестник МГТУ ГА. 2010. № 159. С. 113–120.

¹² Nordwind увеличит полетное время части рейсов из-за ограничения сертификата Росавиацией [Электронный ресурс] // Aviation Explorer-содружество авиационных экспертов. URL: <https://www.aex.ru/news/2019/3/26/195473> (дата обращения 29.07.2020).

¹³ Boeing 777 разрешили летать 330 минут по ETOPS [Электронный ресурс] // Авиатранспортное обозрение-Деловой авиационный портал ATO.RU. URL: <http://www.ato.ru/content/boeing-777-razreshili-letat-330-minut-potops> (дата обращения 15.07.2020).

5. **Abdelghany A., Abdelghany K., Azadian F.** Airline flight schedule planning under competition // *Computers and Operations Research*. 2017. Vol. 87. Pp. 20–39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.05.013>
6. **Shaolin H.** The flight path programming with time constraint // *Proceedings of the 24th Chinese Control Conference*, 2005. Vols 1 and 2. Pp. 1339–1340.
7. **Данилин П.Е., Кочнева Е.В., Кузнецов А.Г.** Горизонтальные аспекты построения плана самолета // *Труды МИЭА. Навигация и управление летательными аппаратами*. 2011. № 3. С. 58–63.
8. **Куц К.А.** Противоречия правил EDTO-ETOPS // *Проблемы летной эксплуатации и безопасность полетов*. 2020. № 14. С. 119–127.
9. **Маркелов В.В.** Реализация построения маршрутных траекторий для отображения на бортовых многофункциональных индикаторах / В.В. Маркелов, М.О. Костишин, И.О. Жаринов, В.А. Нечаев // *Информационно-управляющие системы*. 2016. № 1 (80). С. 40–49. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2016.1.40
10. **Orhan I., Kapanoglu M., Karakoc T.H.** Planning and scheduling of airline operations // *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*. 2010. Vol. 16, no. 2. Pp. 181–191.
11. **Щербаков Л.К.** О проблемных вопросах запасных аэродромов ДФО [Электронный ресурс] // *Aviation Explorer-содружество авиационных экспертов*. URL: <https://www.aex.ru/docs/4/2019/4/3/2903/> (дата обращения 15.07.2020).
12. **Murat Afsar H., Espinouse M., Penz B.** Building flight planning for an airline company under maintenance constraints // *Journal of Quality in Maintenance Engineering*. 2009. Vol. 15, no. 4. Pp. 430–443. DOI: <https://doi.org/10.1108/13552510910997788>
13. **Kaiser M., Schultz M., Fricke H.** Enhanced jet performance model for high precision 4D flight path prediction // *ATACCS '11: Proceedings of the 1st International Conference on Application and Theory of Automation in Command and Control Systems*, 2011. Pp. 33–40.
14. **Mashford J., Marksjö B.** Airline base schedule optimization by flight network annealing // *Annals of Operations Research*. 2001. Vol. 108. Pp. 293–313. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1016027516013>
15. **Whelan C.** Operating in the North Atlantic MNPS airspace // *The Journal of Navigation*. 1999. Vol. 52, no. 1. Pp. 11–27. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0373463398008091>
16. **Пэнди М.** Новые правила FAA относительно полетов ETOPS // *Проблемы безопасности полетов*. 2008. № 1. С. 13а.
17. **Proctor P.** Airline pilots coalition fights 207-min. ETOPS plan // *Aviation Week & Space Technology*. 2000. Vol. 152, no. 12. P. 52.
18. **Опрышко Ю.В.** Моделирование величины эксплуатационных затрат дальнемагистрального самолета // *Конкурентоспособность в глобальном мире: экономика, наука, технологии*. 2017. № 11 (58). С. 764–778.
19. **Dožic S., Kalić M.** Three-stage airline fleet planning model // *Journal of Air Transport Management*. 2015. Vol. 46. Pp. 30–39.
20. **Мезенцев Ю., Эстрайх И.** Оптимальное распределение флота и проблема планирования полетов для авиакомпании // *Труды Российской Высшей школы Академии наук*. 2018. № 3 (40). С. 74–90. DOI: <http://dx.doi.org/10.17212/1727-2769-2018-3-74-90>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Куц Константин Анатольевич, аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, pilotkuts@ya.ru.

IMPROVING THE ALGORITHM FOR DETERMINING THE AREAS OF OPERATION OF LONG-RANGE AIRCRAFT

Konstantin A. Kuts¹

¹ Saint-Petersburg State University of Civil Aviation, Saint-Petersburg, Russia

ABSTRACT

The determination of operation area from en-route alternates for long-range airline aircraft is an important aspect of ensuring safety of the upcoming flight. In the domestic and foreign methodological literature on flight planning, including the guidance material for flight planning systems, there is no single reasonable algorithm for constructing operation areas of long-range aircraft, including the use of the EDTO-ETOPS rules. The lack of methodological materials leads to the «free» values determination of areas of operation by airlines for their long-range aircraft while building routes, in particular, when determining the areas of operation on the route, the decrease in the aircraft weight during fuel combustion is ignored. A big question is also the «initial» mass calculations to determine the value of operation areas. The article identifies shortcomings of existing algorithm for identifying the areas of operation based on the fundamental methods for determining area of operation. Microsoft Excel 2019 has been used to perform a polynomial approximation of the table-specific function of the dependence of operation radius on the mass of a long-range aircraft. Based on the certain equations, more advanced algorithm to determine areas of operation has been developed. The new algorithm pays special attention to the selection of the original value of operation area. The calculations in this article are made for the Boeing 777 as the main type of long-range aircraft operated by airlines in the Russian Federation. The developed algorithm increases the flexibility of the route by increasing the radius of operation areas from en-route alternates and can be used in flight planning systems of airlines.

Key words: area of operation, en-route alternate, EDTO, ETOPS, one-engine inoperative speed OEI, all-engine operative speed AEO, long-range aircraft, Boeing 777.

REFERENCES

1. Abramov, B.A., Akopyan, K.E. and Shapkin, V.S. (2011). *Foreign-built aircraft operation problems*. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, no. 163, pp. 14–23. (in Russian)
2. Kovalenko, G.V., Mikelov, A.L. and Chepiga, V.E. (2016). *Letnaya ekspluatatsiya. Chast 1: uchebnoye posobiye dlyya VUZov* [Flight operation. Part 1: Tutorial for universities], in Kovalenko G.V. (Ed.). 2nd ed. St.Petersburg: Nauka, 462 p. (in Russian)
3. Kuznetsov, S.V., Marasanov, L.O. and Peregudov, G.E. (2017). *Scientific and practical aspects of flight operations with RVSM, PBN, CATII, CATIII, EDTO/ETOPS, TCAS, EGPWS, EFB*. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 1, pp. 177–185. (in Russian)
4. Rudelson, L.E. (2010). *Algorithmic problems of automatization of planning of use of air space*. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, no. 159, pp. 113–120. (in Russian)
5. Abdelghany, A., Abdelghany, K. and Azadian, F. (2017). *Airline flight schedule planning under competition*. Computers and Operations Research, vol. 87, pp. 20–39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.05.013>
6. Shaolin, H. (2005). *The flight path programming with time constraint*. Proceedings of the 24th Chinese Control Conference, vols 1 and 2, pp. 1339–1340.
7. Danilin, P.E., Kochneva, E.V. and Kuznetsov, A.G. (2011). *Horizontal aspects of the flight plan generation*. Trudy MIEA. Navigatsiya i upravleniye letatelnyimi apparatami, no. 3, pp. 58–63. (in Russian)
8. Kuts, K.A. (2020). *Contradictions of edto-etops regulations*. Problemy letnoy ekspluatatsii i bezopasnost poletov, no. 14, pp. 119–127. (in Russian)
9. Markelov, V.V., Kostishin, M.O., Zharinov, I.O. and Nechaev, V.A. (2016). *Forming route trajectories for airborne multi-function displays*. Information and Control Systems, no. 1 (80), pp. 40–49. DOI: 10.15217/issn1684-8853.2016.1.40. (in Russian)

10. Orhan, I., Kapanoglu, M. and Karakoc, T.H. (2010). *Planning and scheduling of airline operations*. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, vol. 16, no. 2, pp. 181–191.
11. Scherbakov, L.K. (2019). *O problemnykh voprosakh zapasnykh aerodromov DFO* [About problematic issues of Far East Airfields] Aviation Explorer-sodruzhestvo aviatsionnykh ekspertov. Available at: <https://www.aex.ru/docs/4/2019/4/3/2903/> (accessed 15.07.2020). (in Russian)
12. Whelan, C. (1999). *Operating in the North Atlantic MNPS airspace*. The Journal of Navigation, vol. 52, no. 1, pp. 11–27. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0373463398008091>
13. Murat Afsar, H., Espinouse, M. and Penz, B. (2009). *Building flight planning for an airline company under maintenance constraints*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, vol. 15, no. 4, pp. 430–443. DOI: <https://doi.org/10.1108/13552510910997788>
14. Kaiser, M., Schultz, M. and Fricke, H. (2011). *Enhanced jet performance model for high precision 4D flight path prediction*. ATACCS '11: Proceedings of the 1st International Conference on Application and Theory of Automation in Command and Control Systems, pp. 33–40.
15. Mashford, J. and Marksjö, B. (2001). *Airline base schedule optimization by flight network annealing*. Annals of Operations Research, vol. 108, pp. 293–313. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1016027516013>
16. Pandey, M. (2008). *Novyye pravila FAA otnositelno poletov ETOPS* [New FAA rules regarding ETOPS flights]. Problemy bezopasnosti poletov, no. 1, p. 13a. (in Russian)
17. Proctor, P. (2000). *Airline pilots coalition fights 207-min. ETOPS plan*. Aviation Week & Space Technology, vol. 152, no. 12, p. 52.
18. Opryshko, U.V. (2017). *Modelirovaniye velichiny ekspluatatsionnykh zatrat dalnemagistralnogo passazhirskogo samoleta* [Modeling the value of long-range aircraft operating costs]. Konkurentosposobnost v globalnom mire: ekonomika, nauka, tekhnologii, no. 11 (58), pp. 764–778. (in Russian)
19. Dožic, S. and Kalić, M. (2015). *Three-stage airline fleet planning model*. Journal of Air Transport Management, vol. 46, pp. 30–39.
20. Mezentsev, U. and Estraykh, I. (2018). *An optimal fleet assignment and flight scheduling problem for an airline company*. Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences, no. 3 (40), pp. 74–90. DOI: <http://dx.doi.org/10.17212/1727-2769-2018-3-74-90>. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Konstantin A. Kuts, Post Graduate Student, Saint-Petersburg State University of Civil Aviation, pilotkuts@ya.ru.

Поступила в редакцию 10.09.2020
Принята в печать 26.11.2020

Received 10.09.2020
Accepted for publication 26.11.2020

УДК 629.7.067

DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-6-53-64

ФОРМИРОВАНИЕ ЧАСТНЫХ КРИТЕРИЕВ ЭФФЕКТИВНОСТИ А-СДМ С УЧЕТОМ ИНТЕРЕСОВ УЧАСТНИКОВ ПРОЦЕССА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ДИНАМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКЕ

Г.Н. ЛЕБЕДЕВ¹, В.Б. МАЛЫГИН²

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва, Россия*

²*Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

Работа выполнена при материальной поддержке РФФИ (грант 19-08-00010)

Рассматривается задача совместного управления производственным процессом на авиапредприятиях (СДМ) в динамически изменяющихся условиях возникновения нештатных ситуаций, вносящих изменения в план действий. В производственном процессе в силу разной направленности решаемых задач решение может потребовать перебора как большого, так и малого количества возможных вариантов решения. В статье представлен конкретный пример подобной ситуации, затрагивающей традиционные три службы авиационного комплекса, имеющие каждый свои интересы в общем производственном процессе. Решением такой задачи является единственный вариант в пользу общего производственного процесса. Для этого введен ряд обозначений и допущений, перечень которых может дополняться. Определены динамические приоритеты для каждого участника процесса. Оптимизация совместного принятия решений может быть достигнута как простым перебором вариантов решения, так и при помощи генетического алгоритма, который позволяет за меньшее число итераций в реальном масштабе времени получить субоптимальное, отвечающее требованиям участников процесса решение. В приведённом примере рассматривается ситуация, возникающая на реальном предприятии из-за плохих метеорологических условий. Так, экспертным путем назначаются динамические приоритеты на основе мультипликативной формы для задержанных рейсов с учетом интересов участников процесса, формируются частные критерии для ранжирования рейсов на каждом шаге перепланирования, применяется генетический алгоритм. В результате получено четыре варианта решения «сбойной» ситуации, возникшей в результате воздействия внешних факторов. Первые три варианта соответствуют интересам трех заинтересованных сторон, а четвертый – консолидированный. Все варианты решения оказались различными, что говорит о необходимости применения объективного и обоснованного аппарата принятия решения при совместном управлении производственным процессом. Предлагаемый математический аппарат обладает такой способностью и имеет перспективы внедрения.

Ключевые слова: совместное принятие решений (СДМ), безопасность полетов (БП), генетический алгоритм (ГА).

ВВЕДЕНИЕ

Существует ряд негативных факторов, способных затруднить производственную деятельность в рамках А-СДМ служб управления воздушным движением, аэропортовых служб и авиакомпаний. К ним в первую очередь относятся сложные погодные условия, технические отказы оборудования, падение спроса на авиаперевозки и ряд других факторов. При этом закрытие по погодным условиям крупных регионов страны в данной статье не рассматривается.

Так, закрытие аэропорта в результате грозовой деятельности на полчаса может привести к существенному увеличению потока прибывающих воздушных судов (ВС), что создаёт угрозу безопасности полетов при управлении воздушным движением. Воздушные суда выбиваются из расписания и вынуждены тратить больше топлива, аэропорты сталкиваются с проблемой отсутствия стоянок для прибывающих ВС, так как вылет с закрытого аэродрома тоже не производился. При определённых условиях становится велика вероятность возникновения коллапса [1]. В подобных случаях, а также во многих других типах сбойных ситуаций, требуется оперативное, оптимальное перепланирование [2–5, 6, 7] использования воздушных судов, мест стоянок в аэропортах для сохранения общего расписания выполнения полётов.

Для решения этой задачи требуется учитывать:

- необходимость сохранения расписания с учетом задержек и намеченных дополнительных рейсов;
- непредсказуемые нарушения в балансе числа занятых воздушных судов авиакомпаний;
- множество критериев учета интересов авиакомпаний, аэропортов и управления воздушным движением [8–13];
- большую размерность задачи по числу ситуаций вследствие задержек рейсов и соответствующего реагирования со стороны служб управления воздушным движением и аэропорта.

В статье рассмотрена конкретная задача перепланирования задержанных рейсов на фоне выполнения штатного расписания при возникновении нелётной погоды в аэропорту или аэроузле. Для решения используется генетический алгоритм, где специально формируются динамические приоритеты для ранжирования рейсов и выбора «элиты» в целях устранения задержек в обслуживании при допущениях, приведенных в [4].

С учетом разнообразия действий и ряда влияющих негативных факторов введем обозначения:

M – всего аэропортов, включая аэропорты, закрытые по метеоусловиям;

$i = 1 \dots M$ – номер аэропорта при вылете;

$j = 1 \dots M$ – номер аэропорта прилета;

L_i – общее число мест стоянок на летном поле i -го аэропорта;

l_i – число свободных мест стоянок на летном поле в i -м аэропорту;

d_i – число свободных для выполнения полета воздушных судов в i -м аэропорту;

ζ_j – число свободных мест стоянок в j -м аэропорту;

S_j – число свободных ВС для вылета из аэропорта j .

Параметры задержанных рейсов:

$p = 1 \dots N$ – номер задержанного рейса, где N – общее число задержанных рейсов.

τ_p – время задержки p -го рейса;

X_p – число пассажиров p -го рейса;

r_{ij} – расстояние между аэропортом i и аэропортом j ;

$r_{\max}$ – максимальное расстояние между двумя аэропортами.

Остальные параметры:

n_k – число задержанных и незапланированных рейсов на k -м шаге планирования, где k – номер шага планирования в задаче ликвидации отставания от расписания;

b_p – априорная важность каждого рейса,

где $b_p = \begin{cases} 1 & \text{при } p \neq R \\ b_{\max} & \text{при } p = R \end{cases}$, а $b_{\max}$ – максимальная важность для рейса;

q – номер заинтересованной стороны в устранении отставания;

$q = 1$ – номер варианта решения в интересах управления воздушным движением;

$q = 2$ – номер варианта решения в интересах аэропорта;

$q = 3$ – номер варианта решения в интересах авиакомпании.

ПРИНЯТЫЕ ДОПУЩЕНИЯ И ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ

Поставленная задача решается при следующих условиях:

1. Процесс перепланирования относится только к задержанным рейсам на фоне выполнения базового расписания остальными рейсами.

2. Все задержанные рейсы разбиваются на пары прилёта и вылета в двух аэропортах. При этом время вылета стремится к времени прилета по паре задержанных рейсов, а число свободных мест стоянок и свободных ВС сохраняется.

3. Под аэропортами $AЭ_i$ или $AЭ_j$ понимаются транспортные узлы, которые образуют полностью связанную сеть взаимодействия друг с другом по принципу «каждый с каждым». Это

означает, что каждый $AЭ_j$ ожидает задержанного прилетного рейса из $(M-1)$ аэропортов $AЭ_i$ и предлагает заявку принять задержанный рейс наряду с остальными.

4. Каждый $AЭ_i$ характеризуется четырьмя параметрами: значениями l_i и d_i в качестве пункта вылета и значениями ζ_i и S_j в качестве пункта прилёта для принятия общего решения о составе принимаемых задержанных рейсов из разных аэропортов.

5. На динамические приоритеты задержанных рейсов влияют три заинтересованные стороны:

- при $q=1$ заинтересованность служб управления воздушным движением в минимизации сбоев в расписании, в исключении возмущения потока движения воздушных судов, в снижении общего времени задержки выполнения базового расписания;

- при $q=2$ заинтересованность аэропорта в сохранении работоспособности, в отсутствии дефицита мест стоянок для прибывающих ВС, отсутствие скопления ВС на «предварительном старте» (очереди) на вылет;

- при $q=3$ заинтересованность авиакомпании в сокращении времени пребывания ВС на земле, в увеличении времени полета по маршруту.

6. При этих условиях требуется:

- разработать с учетом высокой размерности задачи численной оптимизации эффективный генетический алгоритм выбора первоочередных задержанных рейсов на первых шагах «эволюции»;

- сформировать с учетом многокритериальности задачи правила назначения динамических приоритетов каждого рейса по нескольким частным критериям для их ранжирования, а также общий критерий отбора лучших вариантов «потомков» на очередном шаге эволюции;

- сформировать процедуру получения множества «приоритетных» рейсов для их последующего «скрещивания» и «мутации»;

- привести пример решения задачи оперативного планирования и оценить число шагов оптимизации в зависимости от числа M и длительности нелётной погоды на одном из аэродромов.

Предлагаемый подход к решению задачи состоит в последовательном выполнении следующих действий:

1. Первоначально на первом шаге планирования для $AЭ_j$, закрытого из-за нелётной погоды, формируется заявка на вылет в остальные $M-1$ аэропортов в виде трёх ранжированных по разным критериям списков задержанных рейсов. Эти списки попадают в каждый $AЭ_i$ для их последующего объединения и анализа.

2. Решается главная задача формирования первоначального списка прилёта для $AЭ_j$, имеющего свободные стоянки, из полученных трёх вариантов заявок по $M-1$ аэропортам. В каждой заявке может содержаться как один, так и несколько задержанных рейсов из $AЭ_i$ (табл. 1).

Максимальное число Q анализируемых вариантов, составленных из этих заявок, можно оценить по формуле:

$$Q = 3^{M-1}. \quad (1)$$

Таблица 1
Table 1

Картина распределения задержанных рейсов на момент возобновления полетов
Picture of the distribution of delayed flights at the time of flight resumption

K	i=1	i=2	...	j-1	j+1	M _n
q=1	П ₁ , П ₂ ...П _n	П _{n+1} , П _{n+2} ...П _{2n}	...	П _{(j-2)n+1} , П _{(j-2)n+2} ...П _{(j-1)n}	П _{jn+1} , П _{jn+2} ...П _{jn}	П _{(M-1)n+1} , П _{(M-1)n+2} ...П _{(M-1)n+n}
q=2	П ₁ , П ₂ ...П _n	П _{n+1} , П _{n+2} ...П _{2n}	...	П _{(j-2)n+1} , П _{(j-2)n+2} ...П _{(j-1)n}	П _{jn+1} , П _{jn+2} ...П _{jn}	П _{(M-1)n+1} , П _{(M-1)n+2} ...П _{(M-1)n+n}
q=3	П ₁ , П ₂ ...П _n	П _{n+1} , П _{n+2} ...П _{2n}	...	П _{(j-2)n+1} , П _{(j-2)n+2} ...П _{(j-1)n}	П _{jn+1} , П _{jn+2} ...П _{jn}	П _{(M-1)n+1} , П _{(M-1)n+2} ...П _{(M-1)n+n}

Как видно из табл.1, распределение задержанных рейсов производится с учетом различных интересов. Каждый рейс имеет свой собственный приоритет P_p , где $p = 1 \dots M_n$.

Выражение 1 означает, что при числе $M > 10$ количество вариантов задачи может варьироваться от 10^4 до 10^6 , что делает невозможным использование метода полного перебора для больших значений M .

3. Из полученного множества вариантов выбирается вариант комплексирования первоочередных рейсов прилёта, число которых равно l_j свободных стоянок на летном поле АЭ. Для этого используется специальный генетический алгоритм с учётом следующих примечаний:

- первоначальными «предками» являются три представителя (по числу интересов), содержащие приоритетные рейсы из всех списков, а число элементов в каждом представителе равно l_j ;

- число блоков (укрупнённых элементов), на которые делится каждый представитель, для сокращения вычислений может быть равно либо $(M-1)$, если $M-1 \ll l_j$, либо взято равным постоянному числу $V = 2 \div 4$, чтобы блок содержал не один рейс;

- блоки «скрещиваются» для получения «потомков», а для замены рейсов одного и того же аэропорта на другие применяется «мутация». При последующем «скрещивании» этих блоков необходимое число «пострадавших» аэропортов может отсутствовать. При этом количество шагов ГА увеличивается незначительно;

- после каждого шага планирования, который завершается выполнением задержанного рейса, количество таковых быстро сокращается. При малой размерности задачи целесообразно использовать полный перебор анализируемых вариантов вместо ГА;

- главной операцией ГА является отыскание наилучшего варианта, удовлетворяющего общему критерию, который учитывает требования всех заинтересованных сторон.

4. После назначения очередности всем рейсам в АЭ аналогично решается задача для остальных $M-1$ аэропортов на первом шаге оптимизации, после которого в новом состоянии окажутся все параметры аэропортов и сократится число необслуженных рейсов. При этом время ожидания, как отдельный параметр, будет увеличиваться.

На новом шаге потребуется повторение перечисленных действий, а число таких шагов согласно исследованиям подобного рода задач [4, 6, 14, 15] обычно невелико и соответствует числу задержанных рейсов из одного аэропорта.

Формирование первоначальной «элиты» задержанных рейсов одного аэропорта осуществляется при назначении специальных динамических приоритетов с выполнением численной оптимизации на нескольких шагах планирования.

В отличие от известного аддитивного критерия назначения приоритетов мультипликативная форма свёртки множества учитываемых показателей рассчитывается по формуле [4]:

$$P_p = \max (Y_{1p} + m_1) \dots (Y_{Cp} + m_C) \dots (Y_{wp} + m_w), \quad (2)$$

где P_p – вычисляемый динамический приоритет;

$C = 1 \dots w$ – номер учитываемого показателя;

W – общее число показателей;

$Y_{Cp} = \frac{\lambda_c}{\lambda_{max}}$ – нормированное безразмерное значение показателя,

здесь λ_c – значение показателя рейса в физических единицах, λ_{max} – максимальное значение показателя;

m_C – коэффициент значимости показателя C , назначаемого экспертом.

Проведенные исследования [9, 15] подтверждают утверждение о том, что:

- мультипликативная форма эффективнее аддитивной. Действительно, если хотя бы один из множителей в формуле (2) невелик, приоритет сразу уменьшится. Поэтому формула (2) позволяет избежать «узкие места» в системе;

- относительная значимость каждого множителя определяется значением весового коэффициента m_C , чем m_C меньше, тем выше влияние показателя λ_C , а при $m_C \rightarrow \infty$ это влияние исчезает.

Пользуясь этим обстоятельством, можно рассмотреть варианты назначения приоритетов для разных заинтересованных сторон, изменяя нужным образом коэффициенты m_C для следующего полного перечня показателей:

$$\lambda_w = (b_p, \tau_p, x_p, r_p, d_i, l_i, S_j, \zeta_j); w=8.$$

При $q=1$ (интересы организации воздушного движения) получаем следующие приоритеты:

$$P_p = \max b_p \left(\frac{\tau_p}{\tau_{max}} + m_1 \right) \left(\frac{x_p}{x_{max}} + m_2 \right) \left(\frac{r_{min}}{r_{max}} + m_3 \right). \quad (3)$$

Выражение (3) означает, что ситуация на лётном поле в аэропорту в меньшей степени затрагивает интересы организации воздушного движения, поэтому коэффициенты $m_5, m_6, m_7, m_8 \rightarrow \infty$.

Значение остальных перечисленных в (3) множителей можно истолковать следующим образом:

- априорная важность b_p действует как масштабный коэффициент;
- наиболее значимыми являются первый и второй множители, поэтому значения коэффициентов m_1 и m_2 минимальны, и в качестве экспертной оценки им можно присвоить значения $m_1 = 0,1$, и $m_2 = 0,1$. Последний множитель подчёркивает актуальность времени полёта, т.е., чем меньше расстояние r_p до аэропорта назначения, тем раньше освободятся ВС для выполнения следующего рейса. Аналогично предыдущим коэффициентам значение m_3 можно принять равным $0,4 \div 1$.

При $q=2$ (интересы аэродромных служб) получаем следующие приоритеты:

$$P_p = \max b_p \left(\frac{1}{1+l_i} + m_4 \right) \left(\frac{\zeta_i}{L_i} + m_5 \right) \left(\frac{r_{min}}{r_p} + m_3 \right) \left(\frac{\tau_p}{\tau_{max}} + m_1 \right). \quad (4)$$

Объясняется формула (4) следующим образом:

- наиболее значимыми являются два показателя l_i – число свободных мест стоянок на лётном поле в i -м аэропорту и ζ_j – число свободных мест стоянок в j -м аэропорту. Чем меньше l_i и больше ζ_j , тем лучше для аэропортовых служб. По аналогии с коэффициентами формулы (3) присвоим им значения $m_4 = 0,1$ и $m_5 = 0,1$. Третий и четвертый множители формулы (4) введены для учета возможности быстрого получения свободных ВС для избежания дополнительных затрат на обслуживание задержанных пассажиров в аэровокзале и т.п.

Значения m_3 и m_1 в формуле (4) можно принять равными $0,4 \div 1$.

При $q=3$ (интересы авиакомпаний) получаем следующие приоритеты:

$$P_p = \max b_p \left(\frac{d_i}{L_i} + m_6 \right) \left(\frac{1}{1+S_j} + m_7 \right) \left(\frac{r_{min}}{r_p} + m_3 \right), \quad (5)$$

где значения m_6 и m_7 минимальны, $m_6 = m_7 = 0,1$, а $m_3 = 0,4 \div 1$.

Главное внимание уделяется коэффициенту использования воздушных судов как отношение полётного времени к времени стоянки на перроне аэропорта. Также важна и априорная значимость рейса.

Используя формулы (3–5), получаем множество «предложений» по выбору нужной группы задержанных рейсов. Для выбора наилучшего варианта необходим единый критерий $\mathcal{F}_p$, учитывающий все восемь показателей λ_w . Их значимость зависит от сбалансированного мнения

экспертов, однако в первом приближении все значения $m_{1 \div 8} = 0,1$. Подставив значения в формулу с описанными ранее операторами, имеем:

$$\mathcal{F}_p = \max \left(\frac{\tau_p}{\tau_{max}} + 0,1 \right) \left(\frac{x_p}{x_{max}} + 0,1 \right) \left(\frac{r_{min}}{r_{max}} + 0,1 \right) \left(\frac{d_i}{L_i} + 0,1 \right) \left(\frac{1}{1+l_i} + 0,1 \right) \left(\frac{1}{1+s_j} + 0,1 \right) \left(\frac{\zeta_i}{L_i} + 0,1 \right) \quad (6)$$

При наличии множества «пострадавших» аэропортов начинаем производить выбор с закрытого по метеоусловиям, а далее по уменьшению расстояния между аэропортами. Такой подход соответствует хорошо зарекомендовавшему себя в похожих задачах минимаксного критерия выбора [10, 13]. В первую очередь отслеживаются наиболее сложные ситуации, сложившиеся после определённого воздействия. Данный подход в определённых ситуациях может снижать размерность задачи, что позволяет перейти к полному перебору вариантов решения.

ПРИМЕР ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЗАДЕРЖАННЫХ РЕЙСОВ

В качестве примера рассмотрим решение задачи малой размерности по числу задержанных рейсов для четырёх аэропортов ($M = 4$). По условию аэропорт M_1 был закрыт на приём по погодным условиям. В каждом аэропорту имеется ограниченное количество мест стоянок L_i :

$$L_1=8, L_2=8, L_3=7, L_4=7.$$

По плану было необходимо выполнить тринадцать пар рейсов двадцатью шестью воздушными судами, из них три пары между M_1 и M_2 и по две пары между остальными аэропортами. В начальном состоянии имелось по одной свободной стоянке в каждом аэропорту $l_1 = 1, l_2 = 1, l_3 = 1, l_4 = 1$.

После закрытия аэропорта M_1 задержано три пары рейсов между M_1 и M_2 , две пары между M_1 и M_3 , две пары между M_1 и M_4 . Оставшиеся шесть пар рейсов выполняются по плану. Ситуация представлена на рис 1,

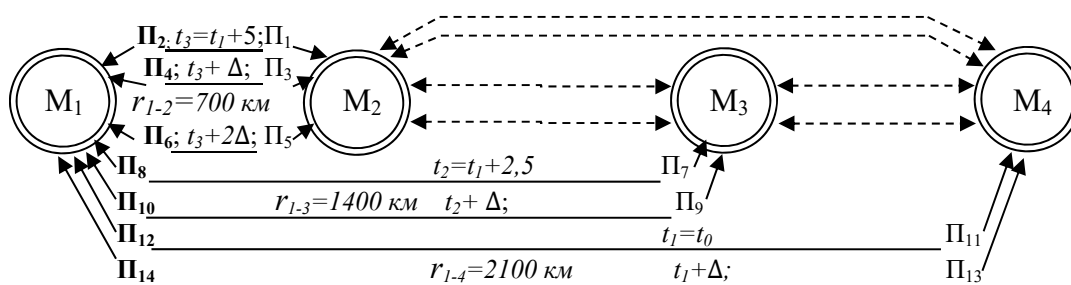


Рис. 1. Ситуация с задержками рейсов по аэропорту M_1
Fig. 1. The situation with flight delays at M_1 airport

где t_1, t_2, t_3 , – время вылета по расписанию соответственно из аэропортов M_4, M_3, M_2 ;

Δ – время между соседними рейсами.

Каждый рейс обозначен расчётным приоритетом Π_p , нечётные номера Π_1, Π_3 , и т. д. обозначают вылетные рейсы из M_1 , а четные (наиболее актуальные) – прилётные (выделены жирным шрифтом на рис.1). Два рейса – Π_5 и Π_6 имеют приоритет $\textcircled{R}$, т. е. $b_5 = b_6 = 2$, для остальных рейсов $b_p = 1$.

После закрытия аэропорта M_1 в связи с метеорологическими условиями считаем, что в течение 7–8 часов на этот аэропорт полёты выполняться не могут, а из него – могут с определёнными ограничениями. Так предположим, что через 3–4 часа после прекращения прилёта из M_1 удалось выпустить рейсы Π_7 и Π_{13} в M_3 и M_4 соответственно, что крайне важно, т.к. увели-

чило количество свободных стоянок в M_1 . Итак, новые значения количества свободных мест стоянок в аэропортах через 3–4 часа будут $l_1 = 3, l_2 = 1, l_3 = 0, l_4 = 0$.

Исходные данные для вычисления приоритетов задержанных рейсов для M_1 представлены в табл. 2.

Таблица 2
Table 2

Данные по прилетающим рейсам в аэропорт M_1
Data on arriving flights to M_1 airport

p	b_p	$\tau_p, \text{ч}$	$x_p, \text{пас.}$	$r_p, \text{км}$	d_i	l_i	S_i	ζ_i
2	1	3,2	200	700	3	1	3	3
4	1	2	300	700	3	1	3	3
6	2	0,8	200	700	3	1	3	3
8	1	5	200	1400	2	0	3	3
10	1	3,5	300	1400	2	0	3	3
12	1	7,5	200	2100	2	0	3	3
14	1	6	300	2100	2	0	3	3

Для формирования первоначальной «элиты» задержанных рейсов вычислим динамические приоритеты с учетом каждой из заинтересованных сторон, затем ранжируем полученные варианты. В табл. 3 представлены результаты вычислений множителей формулы (3) по приоритетам семи рейсов с учетом интересов организации ВД.

Таблица 3
Table 3

Результаты вычислений приоритетов при $q = 1$
The results of the calculations are prioritized at $q=1$

P_p^q	b_p	$0,1 + \frac{\tau}{8}$	$0,1 + \frac{x}{300}$	$\frac{700}{r} + 0,4$	ИТОГ
P_2^1	1	0,5	0,7	1,4	0,5
P_4^1	1	0,75	1,1	1,4	0,7
P_6^1	2	0,2	0,7	1,4	0,24
P_8^1	1	0,7	0,7	0,9	0,45
P_{10}^1	1	0,5	1,1	0,9	0,55
P_{12}^1	1	1,0	0,7	0,75	0,42
P_{14}^1	1	0,85	1,1	0,75	0,6

По итогам вычислений видно, что в тройку рейсов с наибольшим приоритетом (по убыванию) входят P_4, P_{14} и P_{10} . Полученный результат объясняется влиянием факторов сбоя в организации воздушного движения.

В табл. 4 представлены результаты вычислений множителей формулы (4) по приоритетам предыдущих семи рейсов с учетом интересов аэропортовых служб.

Таблица 4
Table 4

Результаты вычислений приоритетов при $q = 2$
The results of the calculations are prioritized at $q=2$

P_p^q	$0,1 + \frac{1}{1+l_i}$	$0,1 + \frac{\zeta_j}{7}$	$0,4 + \frac{700}{r}$	$0,4 + \frac{\tau}{7}$	ИТОГ
P_2^2	0,6	0,5	1,4	0,8	0,33
P_4^2	0,6	0,5	1,4	0,65	0,27

Продолжение таблицы 4
Continuance of Table 4

Π_6^2	0,6	0,5	1,4	0,5	0,21
Π_8^2	1,1	0,5	0,9	1,11	0,54
Π_{10}^2	1,1	0,5	0,9	0,9	0,44
Π_{12}^2	1,1	0,5	0,75	1,3	0,52
Π_{14}^2	1,1	0,5	0,75	1,15	0,46

В итоге произведённых вычислений (табл. 4) выделена тройка рейсов с наибольшим приоритетом (по убыванию) Π_8 , Π_{12} , Π_{14} . Полученные результаты объясняются влиянием на сбойную ситуацию ресурсов аэропорта.

В табл. 5 представлены результаты вычисления множителей формулы (5) по приоритетам предыдущих семи рейсов с учетом интересов авиакомпаний.

Таблица 5
Table 5

Результаты вычислений приоритетов при $q = 3$
The results of the calculations are prioritized at $q=3$

Π_p^q	δ_p	$0,1+\frac{d_i}{7}$	$0,1+\frac{1}{1+s_j}$	$0,4+\frac{700}{r}$	ИТОГ
Π_2^3	1	0,5	0,35	1,4	0,22
Π_4^3	1	0,5	0,35	1,4	0,22
Π_6^3	2	0,5	0,35	1,4	0,49
Π_8^3	1	0,4	0,35	0,9	0,14
Π_{10}^3	1	0,4	0,35	0,9	0,14
Π_{12}^3	1	0,4	0,35	0,75	0,2
Π_{14}^3	1	0,4	0,35	0,75	0,2

Аналогично предыдущим вычислениям из табл. 5 выделяем три рейса с большими приоритетами, это Π_6 , Π_4 и Π_2 .

В итоге на три свободных места аэропорта M_1 на первом шаге решения претендуют все семь рейсов – (Π_2 , Π_4 , Π_6 из M_2), (Π_8 , Π_{10} из M_3) и (Π_{12} , Π_{14} из M_4), при этом каждый имеет собственный объективный приоритет. По формуле $C_7^3 = \frac{7!}{3!4!}$ получаем 35 возможных сочетаний вариантов решения.

Используя обобщённый критерий $\mathcal{F}_p$ (6), определим группу из трех рейсов с максимальной суммой по этому критерию. Данные вычислений представлены в табл.6.

Таблица 6
Table 6

Результаты вычислений обобщённых приоритетов по задержанным рейсам
The results of the calculations of generalized priorities for delayed flights

Π_p	δ_p	$0,1+\frac{\tau}{8}$	$0,1+\frac{x}{300}$	$\frac{r_{min}}{r_{max}}+0,1$	$\frac{d_i}{L_i}+0,1$	$\frac{1}{1+l_i}+0,1$	$\frac{1}{1+s_j}+0,1$	$\frac{\zeta_i}{L_i}+0,1$	$\mathcal{F}_p$	$\mathcal{N}_2$
Π_2^{1-3}	1	0,5	0,7	1,1	0,85	0,6	0,35	0,5	0,19	2
Π_4^{1-3}	1	0,75	1,1	1,1	0,85	0,6	0,35	0,5	0,21	1
Π_6^{1-3}	2	0,2	0,7	1,1	0,85	0,6	0,35	0,5	0,18	4
Π_8^{1-3}	1	0,7	0,7	0,5	0,4	1,1	0,35	0,5	0,13	7
Π_{10}^{1-3}	1	0,5	1,1	0,5	0,4	1,1	0,35	0,5	0,145	5
Π_{12}^{1-3}	1	1,0	0,7	0,45	0,4	1,1	0,35	0,5	0,14	6
Π_{14}^{1-3}	1	0,85	1,1	0,45	0,4	1,1	0,35	0,5	0,185	3

В результате вычислений (табл. 6), не используя ГА, удаётся найти лучшую комбинацию выполнения задержанных рейсов в M_1 – это P_4 , P_2 и P_{14} .

В табл. 7 представлены шаги планирования прилета и вылета после возобновления полетов на M_1 .

Таблица 7
Table 7

Планирование прилета и вылета с момента нормализации условий полета
Arrival and departure planning from moment the flight conditions are normalized

Пошаговое решение	l_1	l_2	l_3	l_4	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_8	p_9	p_{10}	p_{11}	p_{12}	p_{14}
1	3	1	0	0		P_2		P_4								P_{14}
	0	3	0	1	P_1		P_3		P_5					P_{11}		
2	3	0	0	1						P_6	P_8		P_{10}			
	0	1	2	0								P_9				
3	1	1	1	0											P_{12}	
	0	1	1	1												

Из табл. 7 видно, что при заявленных исходных данных достаточно трех шагов для решения задачи с помощью простого перебора вариантов. Основным ограничением при решении задачи является наличие стоянок в аэропортах для приёма ВС. Преимуществом данного алгоритма является объективность, позволяющая решать подобные задачи автоматически без участия человека-оператора. В качестве недостатка следует отметить субъективный характер назначения коэффициентов значимости показателей m_c , но при использовании алгоритма на практике данный недостаток может легко корректироваться.

В динамической обстановке при организации совместного управления авиационным комплексом для ликвидации негативных последствий сбойных ситуаций требуется использовать систему планирования по текущему состоянию. Системообразующей компонентой такого планирования является приоритетное обслуживание, включая высокий рейтинг отдельных рейсов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведённых исследований можно сделать следующие выводы.

1. Для назначения первоочерёдности задержанных рейсов предлагается ранжировать их множество с помощью частных динамических приоритетов при объективном учете интересов различных участников процесса.
2. При выборе окончательного варианта задержанных рейсов предложена комплексная мультипликативная форма критерия его значимости, позволяющая использовать восемь частных показателей.
3. Произведённые расчеты показали, что при совместном принятии производственных решений требуется объективная оценка общего состояния. Например, в одинаковых условиях интересы трёх различных представителей процесса существенно отличаются от консолидированного решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жильцов И.Е., Митрофанов А.К., Рудельсон Л.Е. Оценка пропускной способности в задаче совместного планирования потоков воздушных судов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 2. С. 83–95. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-2-83-95

2. Михайлин Д.А. Экспертная оценка опасности полета группы воздушных судов при их сближении с помощью программы-диспетчера // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 5. С. 116–130. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-5-116-130
3. Михайлин Д.А. Нейросетевой алгоритм безопасного облета воздушных препятствий и запрещенных наземных зон // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 4. С. 18–24. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-18-24
4. Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б. Формирование частных критериев эффективности А-CDM с учетом интересов участников процесса принятия решений в динамической обстановке // Научный Вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22, № 6. С. 44–54. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-6-44-54
5. Михайлин Д.А., Аллилуева Н.В., Руденко Э.М. Сравнительный анализ эффективности генетических алгоритмов маршрутизации полета с учетом их различной вычислительной трудоемкости и многокритериальности решаемых задач [Электронный ресурс] // Труды МАИ. 2018. № 98. 22 с. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90386> (дата обращения 23.09.2020).
6. Зайцев А.В., Талиманчук Л.Л. Интеллектуальная система принятия решений для оценки научной деятельности на основе многоагентной системы // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2008. № 7. С. 85–88.
7. Луговая А.В., Коновалов А.Е. Совместное принятие решения о потоках прилета и вылета ВС при организации воздушного движения // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 4. С. 78–87. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-78-87
8. Борсоев В.А. Принятие решения в задачах управления воздушным движением. Методы и алгоритмы / В.А. Борсоев, Г.Н. Лебедев, В.Б. Малыгин, Е.Е. Нечаев, А.О. Никулин, Тин Пхон Чжо / Под ред. Е.Е. Нечаева. М.: Радиотехника, 2018. 415 с.
9. Никулин А.О. Система совместного принятия решений как эффективный инструмент организации работы аэропорта в условиях пиковых нагрузок // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 5. С. 43–55. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-43-55
10. Никулин А.О., Попов А.А. Внедрение процедур А-CDM в аэропорту Шереметьево // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 221. С. 68–80.
11. Нечаев Е.Е., Никулин А.О. Анализ работы системы «СИНХРОН» аэропорта Шереметьево в сложных метеорологических условиях // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 6. С. 31–42. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-6-31-42
12. Габейдулин Р.Х. Задача динамического регулирования потоков воздушного движения задержками вылетов воздушных судов // Труды ГосНИИ АС. Сер. Вопросы авионики. 2018. № 2. С. 39–53.
13. Рудельсон Л.Е. Программное обеспечение автоматизированных систем управления воздушным движением. Ч. I. Системное программное обеспечение. Кн. 2. Операционные системы реального времени: учебное пособие. М.: МГТУ ГА, 2008. 96 с.
14. Соболев Е.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука, 1981. 110 с.
15. Игнащенко Е.Ю., Панков А.Р., Семенихин К.В. Минимаксно-статистический подход к повышению надежности обработки измерительной информации // Автоматика и телемеханика. 2010. № 2. С. 76–91.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Лебедев Георгий Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры систем автоматического и интеллектуального управления Московского авиационного института (национальный исследовательский университет), kaf301@mail.ru.

Малыгин Вячеслав Борисович, начальник тренажерного центра кафедры управления воздушным движением МГТУ ГА, mbv898@ya.ru.

CREATING PRIVATE CRITERIA FOR A-CDM EFFECTIVENESS TO TAKE INTO ACCOUNT THE INTERESTS OF DECISION-MAKING PARTICIPANTS IN A DYNAMIC ENVIRONMENT

Georgy N. Lebedev¹, Vyacheslav B. Malygin²

¹*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

²*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

The study was conducted with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, grant № 19-08-00010

We consider the problem of collaborative decision making of the production process at airlines (CDM) in dynamically changing conditions of occurrence of emergency situations that make changes in the action plan. In the production process, due to the different orientation of the tasks to be solved, the solution may require a large or small number of possible variant solutions. The article presents a concrete example of such a situation affecting the conventional three services of the aviation complex, each with its own interests in the overall production process. The solution to this problem is the only option in favor of the overall production process. For this purpose, several designations and assumptions have been introduced, the list of which can be supplemented. Dynamic priorities are defined for each participant of the process. Optimization of collaborative decision-making can be achieved either by a simple search for solutions, or by using a genetic algorithm that allows you to get a suboptimal solution that meets the requirements of the participants in the process using a smaller number of iterations in real time. In this example, we consider a situation that occurs in a real enterprise due to bad weather conditions. Thus, dynamic priorities are assigned based on a multiplicative form for delayed flights, considering the interests of participants in the process, private criteria are formed for ranking flights at each step of rescheduling, and a genetic algorithm is applied. As a result, we obtained four solutions to the disruption caused by external factors. The first three options correspond to the interests of three parties concerned, and the fourth one is consolidated. All the solutions were different, which indicates the need for an objective and reasonable decision-making apparatus for joint management of the production process. The proposed mathematical apparatus has this ability and prospects for implementation.

Key words: collaborative decision-making (CDM), flight safety, genetic algorithm (GA).

REFERENCES

1. Zhiltsov, I.E., Mitrofanov, A.K. and Rudelson, L.E. (2018). *Air space capacity assessment regarding the problem of the collaborative management of air traffic flows*. Civil Aviation High Technologies, vol. 21, no. 2, pp. 83–95. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-2-83-95. (in Russian)
2. Mikhaylin, D.A. (2017). *Flight expert risk assessment of aircraft group at their proximity using a program-manager*. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 5, pp. 116–130. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-5-116-130. (in Russian)
3. Mikhaylin, D.A. (2017). *Neural network algorithm safe overflight aerial obstacles and prohibited land areas*. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 4, pp. 18–24. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-18-24. (in Russian)
4. Lebedev, G.N. and Malygin, V.B. (2019). *Formation of private performance criteria a-cdm taking into account the interests of the participants in the decision-making process in a dynamic environment*. Civil Aviation High Technologies, vol. 22, no. 6, pp. 44–54. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-6-44-54. (in Russian)
5. Mikhaylin, D.A., Alliluyeva, N.V. and Rudenko, E.M. (2018). *Comparative analysis of the effectiveness of genetic algorithms the routing of the flight, taking into account their different computational complexity and multicriteria tasks*. Trudy MAI, no. 98, 22 p. Available at: <http://trudymai.ru/published.php?ID=90386> (accessed 23.09.2020). (in Russian)
6. Zaytsev, A.V. and Talimanchuk, L.L. (2008). *Intellektualnaya sistema prinyatiya resheniy dlya otsenki nauchnoy deyatel'nosti na osnove mnogoagentnoy sistemy* [Intelligent decision-

making system to evaluate scientific activity based on a multi-agent system]. *Neurocomputers*, no. 7, pp. 85–88. (in Russian)

7. **Lugovaya, A.V. and Kononov, A.E.** (2017). *Collaborative decision-making on the inbound and outbound air traffic flow in air traffic management*. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 4, pp. 78–87. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-78-87. (in Russian)

8. **Borsoyev, V.A., Lebedev, G.N., Malygin, V.B., Nechayev, Ye.Ye., Nikulin, A.O. and Tin Pkhon Chzho.** (2018). *Prinyatiye resheniya v zadachakh upravleniya vozдушnym dvizheniyem. Metody i algoritmy* [Decision making in air traffic management tasks. Methods and algorithms], in Nechaev Ye.Ye. (Ed.). Moscow: Radiotekhnika, pp. 351–415. (in Russian)

9. **Nikulin, A.O.** (2018). *The system of collaborative decision making as an effective tool for the organization of the airport operation in peak loads*. Civil Aviation High Technologies, vol. 21, no. 5, pp. 43–55. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-5-43-55. (in Russian)

10. **Nikulin, A.O. and Popov, A.A.** (2015). *Implementation procedures A-CDM at the airport Sheremetyevo*. Civil Aviation High Technologies, no. 221, pp. 68–80. (in Russian)

11. **Nechaev, E.E. and Nikulin, A.O.** (2018). *The Analytical treatment of the system «SYN-CHRON» at Sheremetyevo airport in adverse weather conditions*. Civil Aviation High Technologies, vol. 21, no. 6, pp. 31–42. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-6-31-42. (in Russian)

12. **Gabeydulin, R.Kh.** (2018). *The dynamic air traffic flow management by assigning ground flight delays*. Trudy GosNII AS. Seriya: Voprosy avioniki, no. 2, pp. 39–53. (in Russian)

13. **Rudelson, L.E.** (2008). *Programmnoye obespecheniye avtomatizirovannykh system upravleniya vozдушnym dvizheniem. Chast I. Sistemnoye programmnoye obespecheniye. Kniga 2, Operatsionnyye sistemy realnogo vremeni. Matematicheskiye modeli: uchebnoye posobiye* [Software for automated air traffic control systems. Part I. System software. B2. Real-time operating systems. Mathematical models: Tutorial]. Moscow: MGTU GA, 96 p. (in Russian)

14. **Sobol, E.M. and Statnikov, R.B.** (1981). *Vybor optimalnykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriyami* [Selection of optimal parameters in tasks with many criteria]. Moscow: Nauka, 110 p. (in Russian)

15. **Ignashchenko, E.U., Pankov, A.R. and Semenikhin, K.V.** (2010). *Minimax-statistical approach to increasing reliability of measurement information processing* // *Avtomatika i Telemekhanika*, no. 2, pp. 76–91. (in Russian)

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Georgy N. Lebedev, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Automatic and Intellectual Management Systems Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), kaf301@mail.ru.

Vyacheslav B. Malygin, Head of the Training Center of the Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, mbv898@ya.ru.

Поступила в редакцию
Принята в печать

07.08.2020
26.11.2020

Received
Accepted for publication

07.08.2020
26.11.2020

УДК: 656.025

DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-6-65-83

TRANSPORTATION OF PERISHABLE GOODS BY AIR: HANDLING PROBLEMS AT RUSSIAN AIRPORTS

I.O. POLESHKINA¹

¹*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

The article deals with the problems of perishable goods handling process at Russian airports on delivery in international supply chains (ISC). The investigation was carried out on the basis of operational analysis. The initial stage of the study, which was performed applying statistical analysis, revealed that the major category of perishable goods which establish air transportation demand into Russia is the fresh exotic fruits. The investigation was performed taking the mango supply chain as an example, due to its non-standard thermal and storage requirements. The second stage resulted in the perishable goods airport handling quality criteria set formation: the number of mandatory cargo while handling operations, the required time for these operations, the amount of paper work, the number of multi-temperature chambers at the airport and their area, ULD temperature storage system availability. The study revealed that about 90% of perishable goods, which are imported to Russia, are handled at the airports of Moscow aviation hub because other airports in Russia lack the temperature storage facilities infrastructure. This restriction raises the price of perishable goods logistics on the territory of the country considerably as well as reduces their quality. Four international airports of strategic importance outside the borders of the central federal district which have the potential of forming central hubs for perishable goods handling as well as processing of transit and transfer flows were chosen in the context of this study. Among them are the airports of Novosibirsk, Vladivostok, Yekaterinburg and Krasnoyarsk. The airports of Moscow aviation hub were offered specialization on the subject of perishable goods export-import flow handling. The materials received from airlines, major cargo terminals at Russian airports, transport companies, specialized international air transport enterprises and logistics associations were exploited as the data for this study. The research registered that the deterrence to the speed of supply chain operation is the time of cargo ground service at Russian airports which considerably exceeds the cargo ground service time in the exporting country. The delays are connected with the poor development of perishable goods handling cargo terminals and also with loads of paper work because the system of electronic workflow and automated checking of markings doesn't exist. The model of electronic workflow in the International Supply Chain which utilizes pre-flight and pre-loading preliminary information about the cargo was offered. Block Chain system for checking the correct presentation of documents at all stages of the supply chain was introduced which reduces the total time of cargo ground handling process.

Key words: air transportation, cargo delivery technology, perishable goods, international supply chains, mango supply chains, marking of goods, airport cargo ground handling, electronic documentation, Block Chain Technology.

INTRODUCTION

At the time of the world's coronavirus pandemic spread and further termination of international passenger flights as a necessary measure, the airlines faced a burning issue of finding new sources of income. Under these conditions, most airlines, especially large ones, have taken the path of increasing the volume of cargo transportation. Pursuing this goal, passenger airplanes started being used for cargo transportation. According to the Federal Air Transport Agency, at the end of April 2020, seven airlines got the right to transport cargo in the passenger cabin. Aeroflot, Ural Airlines, Russia, Icarus, Nordwind, Azur Air, Royal Flight and S7 are among these companies. The cargo is allowed to be transported in the cabin on the condition that there are no passengers and the cargo centering rules and weight restrictions established by the aircraft designers are observed.

The increased capacity of airlines makes the competition in the air cargo market more enhanced. The competition is not only on cost but also on quality of the provided service, speed of delivery, compliance to the conditions of detention of goods in transit, security of goods. While transporting goods by air the mandatory participants in the supply chains are the airports that provide shipment services and deliver goods to the consignee in the destination country. The airlines and airports establish close and long-lasting business relations which in the end, effect the profitability of the both sides. On the one hand, quality and the airlines service cost determine the demand on cargo transportation and

consequently the demand on the cargo handling in the cargo terminal of the airport, which services the airline. On the other hand, the quality and cargo handling service cost at the airport effect the consignor's choice of the airline. To win in the rivalry for the freight traffic, the airlines and airports should join their efforts, giving consignors, while sending the freight, the required aggregation of quality level and cost. The airports authorities should not only consider airlines but consignors as well, as the source of main income.

According to the IATA data about 35% of international supply chains turnover in value and less than 1% in physical volume is delivered by air transport. It is determined by the high added value of the goods delivered by air transport. The high cost of the goods determines the rigid requirements of the consignors to the undamaged state of the goods while air delivery process.

The main category of goods which have the constant demand for air transportation are the goods which have the higher requirements to the delivery speed, such as pharmaceutical goods, animals, perishable goods, the goods of electronic commerce and post. The growing demand for air transportation comes from pharmaceutical goods, but its international turnover hasn't still reached any considerable volume. According to IATA, it makes 1,9% of the world's airlines turnover. At the same time we can observe a rapid growth of transporting volumes from electronic commerce goods and perishable goods. In 2016 the demand for perishable goods transporting increased by 140000 tons due to the increased volume of deliveries to China and it continued its growth in 2018. The annual growth has made up 6,17%¹. According to the experts' esteems it is the perishable goods that are the drivers in the airlines turnover growth [1]. The greatest share of the whole perishable goods volume delivered to Russia by air is fresh fruit.

There is an objective necessity to buy foodstuff which can't be produced on the territory of the given country in some other countries as well as the science and innovation goods which are effectively used in the foodstuff production on the territory of the importing country. The current policy, which is implemented by the government of the Russian Federation, is aimed at the foodstuff goods import substitution. However, the consumption basket of the Russian citizenry contains some exotic fruit such as mango, avocado, papaya, guava which are impossible to produce on the territory of our country. The mentioned above fruits have a very short storage period, so speed and delivery conditions are the crucial factors while choosing their transporting method. The safety of perishable products has an impact on the income of all participants in the supply chain and also on people's health. According to the esteems of the World Health Organization, about 20% of perishable goods spoil during their transportation because of the cold chain breakage. The sale of perishable food products in developed countries, gives food retailers up to 40% of the profit, and in Russia the situation is approximately similar (37.8%)², but the losses of the goods in this category caused by the failures in supply chains reach more than 65% [2, 3]. It is possible to reduce the perishable goods loss share at the expense of the delivery time reduction and extension of the life span on the store shelves. These conditions make the air transportation in the international supply chains more preferable, especially in intercontinental communication [4].

Perishable goods make nearly 10% of the airlines total turnover and consequently it relates to the goods handling process in the airport terminals [5]. According to the leading airlines esteems the segment of perishable goods has a significant potential for their international transportation demand growth. One of the strategic goals for the airlines and airports is to remain competitive in this segment. For instance, according to the data received from Los Angeles airport, only fresh fruits, vegetables and

¹ World ACD and Technavio Global Report on Perishable GoodsD. Available at: https://www.iata.org/contentassets/4e4d3b50f3614011aef57357e594801e/perishables_track.pdf (accessed 10.03.2020).

² Retail chains selling food and related products (FMCG) in Russia 2015. General business characteristics, regional analysis, industry development strategy. RBC Research. Available at: http://alfabank.rbc.ru/media/research/file/FMCG_%D1%81%D0%BF%D0%B5%D1%86%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%B8%D1%8F.pdf (accessed 10.03.2020).

nuts make 15% in the weighing terms of the goods processing whole volume. The profit which airlines receive having transported this group of goods is insignificant because these goods don't have high added value. According to the Lufthansa airline it only makes a few percent for 1\$ of the transported goods. However, this group of products allows airlines to earn additional profit from cheap passenger flights by filling the cargo compartment of a full passenger flight [6].

The organization of a coordinated science-based technology for the functioning of supply chains by all its participants will significantly increase their efficiency [7 – 9]. The closest cooperation should be reached between airlines and airports, as the quality of the service which they provide determines the demand for the transportation of perishable goods by air. According to the IATA esteems the goods spend at the airport from 30% to 50% of their transportation time. Technical and technological facilities of airports determine the goods preservation while being transported. The processing time of perishable goods handling extension at the airport leads to their reorientation to sea transport. The advent of new perishable goods storage technologies which apply specialized gaseous medium makes it quite possible. The last decade of years showed the redirection of large volumes of perishable goods different types from air transportation to the delivery by sea [10]. However, utilization of such technologies reduces the quality of goods, that's why the delivery rate by air extension especially at the airport handling stage will make it possible to return a certain part of this segment.

Russian airports lack the sufficient facilities and technological equipment to handle this category of goods. The main problem of perishable goods handling process in airports is the different temperature regime of storage and certain types of goods incompatibility, which requires a big number of multi temperature chambers. According to the IATA not a single airport in Russia has the status of the airport with specialized facilities to process perishable goods as well as the phytosanitary-inspection service. The situation has changed after modernization of the Moscow Cargo at Sheremetyevo International Airport, but the airport hasn't passed the Certification of compliance yet. As a result, 90% of airlines perishable goods turnover in international flights is handled at the Moscow aviation hub, mainly at Sheremetyevo International Airport, which limits the development of international supply chains for perishable products within Russia.

METHODS OF RESEARCH

This research has been carried out on the basis of the international supply chain perishable goods delivery technology analysis by air transport. The analysis is based on a process approach, since the number of participants in the supply chain may vary depending on the number of mediators, and the number of operations and processes that must be implemented for the supply chain to function is a relatively constant value [11]. The SCOR-model which is based on the principles of indivisibility of cargo and information flows as well as on functional integration was used for making analysis. Taking this model as a core the scheme of perishable goods processes indivisibility and interconnection was made up; the criteria of perishable goods at the destination airport technological operations effectiveness estimation were worked out; the factors which reduce the quality of goods while handling at the airport were determined; the best technological solutions of the most problematic processes were studied.

At the initial stage, with the help of statistical analysis the main categories of perishable goods which show the demand for air transporting while being delivered in Russia were revealed. Further on they examined the requirements of International and Russian Standards to their transportation and the reasons why these requirements while handling the goods at the airports of Moscow aviation hub are broken. The following criteria for fruits processing technologies at the airport analysis were used: the number of compulsory while-handling operations, the time necessary for these operations, meeting the standards requirements to the storage and handling conditions, the amount of paper work. The research was carried out using the mango from Brazil by-air delivery example, as fresh fruits make the biggest share of perishable goods delivered to Russia by air, while mango is the most particular to the delivery

conditions. The second stage of investigation dealt with the analysis of technological facilities for perishable goods handling at the largest airports in Russia, the main centers which have strategic importance for the hubs which service transit air transport flows development. Some technological solutions aimed at the quality and periods of perishable goods handling increase in the cargo terminals at Russian airports were offered.

The materials from Russian airlines, largest cargo terminals in Russia which have the strategic importance for the perishable goods supply chains development, transport companies, ICAO (The International Civil Aviation Organization), IATA (The International Air Transport Association) and TIATA (The International Air Cargo Association), FIATA (International Federation of Freight Forwarder Association), ACA (Airport Council Association), ACI (Airports Council International) were used, the results of the scientific research and the results of the interviews which were carried out by the author with the airports and airlines cargo terminals authorities were published.

PERISHABLE GOODS WHICH MAKE A DEMAND FOR AIR TRANSPORTATION TO RUSSIA AND THE INDUSTRY STANDARDS

After having conducted the analysis of the international supply chain it is possible to pick out the following categories of perishable goods which make a potential demand for air transportation.

- vegetable products: fresh fruits, berries, vegetables, and herbs, except the heavy, cheap vegetables and fruits that can easily be transported by sea, they make up the largest share of perishable goods delivered to Russia, and make the most strict requirements for the conditions of transportation;
- animal products: animal genetic material, incubator eggs, fertilized eggs, refrigerated meat and poultry, refrigerated fish, refrigerated caviar;
- processed products: expensive frozen fruits and vegetables, meat and sausage products, cheeses;
- live plants, flowers, seedlings, tubers, seeds;
- live fish planting material (fry, under yearlings, etc.);
- food additives: enzymes, ferments, dye stuff, etc.

The Russian market is ranked fifth in the world in terms of food imports. The share of import among all consumed agricultural products and food is more than 35%. Food products and agricultural raw materials (group 01-24 of Commodity Nomenclature of Foreign Economic Activity) are one of the key commodity groups imported to the Russian market, whose share in total imports in 2017 and 2018 is 12.7% and 12.5%, respectively. In monetary terms this group import volume amounted to \$ 29.74 billion in 2018, compared to \$ 28.95 billion in 2017. According to Russian Statistics Committee - Rosstat, imported food products make up 27% of the total retail food products turnover. The government of the Russian Federation conducts an active import substitution policy, however, the import of several products is an objective necessity dictated by the peculiarities of the country's natural and climatic conditions. "Fruit and nuts" is the most significant category of food products imported to Russia, its share in the total volume of food and agricultural products in 2018 made up 17,14% of the total import structure in the monetary expression, and in 2019 it made up 46,2% of the total vegetable products import volume. If nuts are not related to the perishable goods category and can be delivered by sea then fruits are much more sensitive to the period of delivery. Air transport is used for the delivery of exotic fruits which bring the most rigid demands to the terms and period of delivery such as: persimmon, dates, avocado, fig, mango and mangostan, pine apples, kiwi fruit, guava, pawpaw, which are delivered all the year round or seasonally. The total volume of the fruits importation in this category amounted to 6,6% (332,1 thousand tons) in 2018. Since this category of perishable goods establishes greatest demand for delivery by air it is exactly this category which was studied in this research.

The basic volume of exotic fruits comes from Costa Rica, Israel, Brazil, Peru and Iran.

The largest part of the exotic fruits delivered to Russia is processed at the airports of Moscow aviation hub, mostly at Sheremetyevo International Airport and partly at Moscow Domodedovo Airport and a minor part is delivered at Pulkovo Airport in Saint Petersburg. Such international fruit direction control is connected with infrastructural restrictions in Russian airports. Concentration of incoming flows in the central region leads to the rise in prices of the internal logistics of fruits. In 2003, the members of the perishable goods market felt the urgent necessity to work out international standards and regulations for perishable goods delivery. The Cool Chain Association was created with the exactly this purpose. At present, this association works in close cooperation with the International Air Transport Association (IATA) and The International Air Cargo Association (TIACA). The main document, which determines the perishable goods delivery technology requirements by air transport at international level, is the current version of industry standard of IATA Perishable Cargo Regulation [12]. The purpose of this standard is to create the common regulations of perishable goods transportation for all participants of the air transportation market, to improve the speed of technological processes, to increase the quality and transparency of the delivery process, to upgrade the communicational processes between the members of supply chains. Besides, the IATA publishes expert examination results of the main airlines that control the live animals and perishable goods transportation (LAPB). In addition to the mentioned above document, the IATA worked out an additional standard "Temperature Control Regulation" for temperature controlled goods. The latter standard reflects the requirements to the prior cargo handling at the airport as well as to transporting, refrigerating, to temperature control during delivery by road and preserving the goods value added. The IATA standard reflects the innovative international practices of technical and technological solutions used by airlines and airports. There is no practice of developing such standards at the national level.

There are Federal Aviation Rules that function in Russia. "The General Rules for passengers, baggage and cargo air transportation and the requirements for passengers, shippers, and consignees servicing" adopted by the Ministry of Transport, No. 82 of 28.06.2007 is one of them. The "Manual on Domestic Airlines of The USSR Cargo Transportation" (Cargo Transportation Guide-85)" adopted by the Ministry of Civil Aviation of the USSR on August 20, 1984 N31/I is among them. However, the national rules assume the regulations for perishable goods service conditions during the air delivery process, in accordance with the terms of contracts between the shipper and the airline. Meanwhile, according to the guidelines, perishable goods are ready for transportation in case the sender submits quality certificates or certificates of the fixed form. As a rule, perishable goods are transported by direct flights. In exceptional cases, with the prior consent of the transfer airport, it is possible to accept perishable goods with one overload on the way.

The experience of Russian and international airlines shows that the most difficult thing to determine in the supply chain is the level of losses at the stage of transporting, as they are often connected with the infringements at the previous stages of the supply chains. In this regard, the ISO 22000 standard-"Food and Food Safety Management System – Requirements for Any Organizations in The Supply Chain" – is applied at the international level for food products. The national standard: "The System of Food Products Safety Management. Requirements for Organizations Involved in The Food Production Chain" - GOST R ISO 22000-2007 was worked out in Russia. Another international standard is HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Points), which is the food stuff quality control system. Standard GOST51705.1-2001 – Food Products Quality Management Based on The HACCP (Hazard Analysis and Critical Control Points) principles operate on the national level. Enterprises located on the territory of the Russian Federation have the independent right to choose the standard for the food safety management system development.

According to the IATA manual, the most rigorous requirements to the temperature regime have fresh fruits and vegetables, as some of them increase the respiration intensity (climacteric fruits) when temperature rises, which leads to the increased amount of carbon and further production spoilage. Be-

sides, fruit require separate storage due to the different intensity of ethylene release and sensitivity to its concentration (tabl. 1). Taking these biological peculiarities as a basis the IATA worked out compatibility and incompatibility tables for different fruit and vegetables.

Table 1

Temperature storage conditions for fresh fruit delivered to the International Supply Chain by air

Perishable goods	Temperature storage conditions	Temperature effect on respiration intensity
Avocado	+5,0...+12,0	yes
Guava	+4,5	yes
Mango	+10,0...+13,0	yes
Mangostan	+4,0...+8,0	yes
Raspberry	-0,5...0,0	yes
Strawberry	0,0	yes
Papaya	+7,0	yes

The majority of perishable goods delivered by air have the range of temperature storage from 0-+5°C, while exotic fruit require a higher temperature conditions and separate storage conditions. Therefore a high quality perishable goods servicing at the airport requires a certain amount of separate temperature chambers with an adjustable storage regime. Besides, according to the WHO esteems, a frequent temperature impairment happens on the runway during loading-unloading processes at the airports as well as while unloading the motor transport at the ramp.

TECHNOLOGICAL CAPABILITIES FOR PERISHABLE GOODS HANDLING PROCESS AT THE AIRPORTS OF RUSSIA

The airlines have managed to work out the methods for products cooling and refrigerating which make it possible to deliver the goods more cost-beneficially in a special packaging. The temperature conditions in the cargo compartment on board a plane are provided by circulation of cold external air. The temperature is set by the captain of the aircraft. The problems arise in case the goods which require different temperature conditions are placed in the cargo hold of the plane. To maintain different temperature conditions, delivery is carried out in specialized aviation refrigerated containers, which completely solve this problem. A more complex issue is maintaining the temperature regime at all stages of cargo handling at the airport. The main advantage of perishable goods delivery by air is the rate of transportation however, this benefit reduces because of the technological shipping process extension. According to the experts' esteems the most problematic link in the perishable goods International Supply Chain is the ground handling at the airport of shipment and destination airport.

The complexity of perishable goods handling process organization at an airport is conditioned by the following peculiarities:

- A short expiring period;
- Seasonal transport volumes;
- Different requirements to temperature storage and transportation conditions for different categories of perishable goods;
- The process of phytosanitary control and customs procedure;
- The necessity of using ULD (unit load device) with temperature control;
- The goods quality dependence on great number of supply chain participants, (fig. 1).

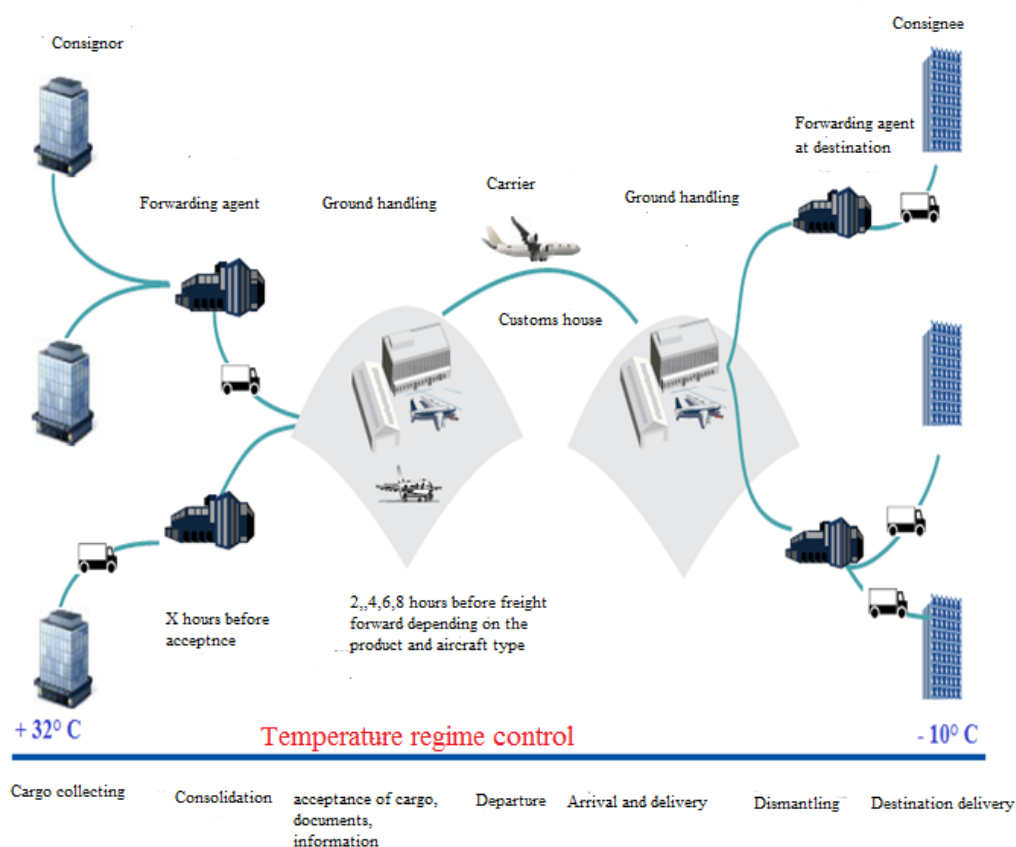


Fig. 1. Participants of perishable goods international supply chain

The following parameters have a great impact on the perishable goods quality while being handled at the airport [13]:

- the cargo quality status at the time of shipment is controlled according to certificates and quality certificates, but it's often impossible to detect the violations of the goods maintenance conditions at the previous stages when the goods are loaded to be transported by air, so all responsibility falls on the load carrier or the airport;
- the cargo preparation for storage and transportation - the system of cargo refrigerating;
- the packaging and packing are chosen by the consignor of goods;
- the temperature and storage conditions, including the ones at the airport;
- the humidity conditions of storage and transportation, including the ones at the airport;
- air circulation and ventilation in the sites of cargo storage and transportation;
- air purity and sanitary condition in the storage chambers and vehicles capacity, including the ones at the airport;
- the ways of products distribution in them;
- storage and transportation period.

When transporting perishable goods, the climatic conditions of the shipment and transportation areas should also be taken into account as the external temperature while unloading the aircraft and internal temperature in the cargo terminal of the airport depend on these conditions. The requirements to the vehicles used on the territory of the airport are put forward taking climatic conditions into account. Pursuing this purpose, according to the IATA manual, it is recommended to use ULD containers with temperature regulation. At the same time the total time of the flight and ground handling of perishable goods at the airport shouldn't exceed 48 hours.

The Moscow Cargo Terminal at Sheremetyevo International Airport meets the most complete requirements of international standards of technological equipment for processing perishable products. The terminal area is 42,300 m², the throughput capacity is 380 thousand tons per year, and the volume of transit cargo handling in 2017 was 445.2 thousand tons. After modernization, the terminal is equipped with 26 multi-temperature chambers for perishable goods storage with a total volume of 3,845 m³. In addition, an automated ULD container storage and processing zone has been put into operation, which is equipped with 60 thermal cells with the temperature kept in the range of +4...+8 °C and an online monitoring system for temperature sensor readings. The terminal also has thermal equipment to work on the ramp. Together with Air Bridge Cargo, the Moscow Cargo Terminal allows you to arrange the delivery of transfer cargo within 48 hours, as it is required by the IATA standard.

At other airports of the Moscow Aviation Hub the situation is worse. The area of cargo terminal of Domodedovo airport is 13600 m², its throughput capacity is 200 thousand tons per year. The terminal is equipped with two temperature chambers: a freezing chamber with temperature range -13...-20⁰ and a cooling chamber with temperature range +2...+8⁰, which doesn't allow you to store incompatible goods separately. Moreover, some perishable goods which require a higher temperature storage conditions can't be processed in this airport (exotic fruits, medical products). The terminal doesn't have the ULD storage system with temperature maintenance. The similar situation takes place in the cargo terminal of Vnukovo Moscow International Airport which area equals to 13000 m², total storage area is 4560 m² and throughput capacity is 150 thousand tons per year. The cargo terminal is equipped with a freezing chamber which total area is 256,3 m². According to the Federal Air Transport Agency, other airports on the territory of the Russian Federation do not have the equipment to maintain various temperature storage conditions. Seventeen airports are supplied with thermal chambers. The infrastructure for handling temperature cargo at Russian airports availability analysis is shown in Figure 2.

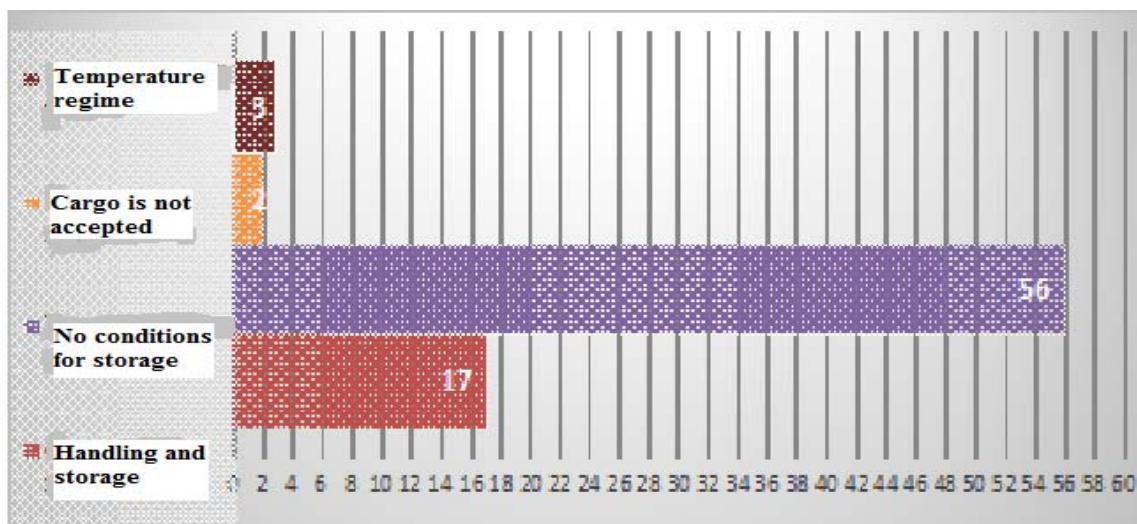


Fig. 2. The number of international airports in Russia which have technical and technological facilities for perishable goods handling process

The logistics efficiency of perishable goods delivered in Russia by air increase can be reached by creating several hubs on the territory of the country which will make it possible to unload the Moscow Aviation Hub, which currently handles about 90% of the perishable goods total volume. In this regard, it is advisable that Moscow Aviation Hub airports specialize in servicing export-import flows, and the processing of transit and transfer flows should be concentrated in several major international airports outside the Central region. This direction of airport infrastructure develop-

ment conforms to the Decree of the President of the Russian Federation dated May 07, 2018 "On National Goals and Strategic Objectives For The Development Of The Russian Federation For The Period Up To 2024", as one of the priority tasks which defines "the development of transport corridors "West-East" and "North-South" for cargo transportation, also through the establishment of central cargo multimodal transport and logistics centers. It is proposed to use the country's busiest airport cargo terminals, which have the greatest potential for processed cargo flow increase and development of ground infrastructure as central hubs. The dynamics of cargo handling volumes at the largest airports in Russia is shown in Table 2.

Table 2

Volumes of cargo handling dynamics at the largest Russian airports
in international and domestic traffic in tons*

Airports	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Moscow (Sheremetyevo)	197 782,50	178 167,50	231 249,90	293 972,50	617 368,80	329 817,20
Moscow (Domodedovo)	162 163,03	133 182,65	119 039,44	122 862,35	240 708,34	105 862,72
Moscow (Vnukovo)	37 195,93	36 707,12	44 153,22	58 493,98	125 208,90	48 890,91
Saint Petersburg (Pulkovo)	25 360,00	22 535,00	25 381,00	28 751,00	54 990,00	27 411,00
Novosibirsk (Tolmachevo)	25 073,10	19 670,10	16 962,20	22 012,50	49 281,80	26 558,90
Vladivostok (Knevichi)	28 930,00	21 455,77	21 642,10	23 317,20	49 172,24	21 441,61
Khabarovsk (New)	29 173,52	22 621,23	22 580,50	24 075,79	43 694,60	19 404,90
Yekaterinburg (Koltsovo)	22 190,95	18 366,75	20 045,82	19 340,27	36 852,06	17 196,81
Krasnoyarsk (Yemelyanovo)	16 041,40	12 877,71	12 483,21	13 852,29	31 013,64	15 448,14
The total amount of cargo handled by the largest airports in Russia	543 910,43	465 583,83	513 537,39	606 677,88	1248 290,38	612 032,19
The cargo handled at Russian airports total volume share, %	70,3	68,5	70,3	73,0	81,0	80,0
The total volume of goods processed at Russian airports	773 377,87	679 621,76	730 606,50	831 070,48	1 540 755,93	764 606,27

* Calculated by the author on the basis of the data from Federal Air Transport Agency (Rosaviatsiya)

The table data, allows us to conclude that it is advisable to develop the airports of Novosibirsk, Vladivostok, Yekaterinburg and Krasnoyarsk as transfer hubs. According to Federal Air Transport Agency, all these airports have facilities for processing and storing perishable products, but they do not have the ability to maintain different temperature regimes. Characteristics of cargo terminals are shown in Table 3.

Table 3

Characteristics of airport cargo terminals for creating perishable cargo transfer hubs*

Index	Novosibirsk airport	Vladivostok airport	Yekaterinburg airport	Krasnoyarsk airport
Warehouse area	6 733,3 m ²	5 425,8 m ²	14 000 m ²	6 265,0 m ²
Freezing chamber volume/capacity	220,3 m ² (t +15...-18 °C)	20 m ³ (t -18...-20 °C)	22 m ² (t 0...-20 °C)	40m ² (t -18...-20 °C)
Cooling chamber area		Three chambers 8 m ² (t -5...+8 °C)	137,2 m ² (t +2...+8 °C)	80 m ² (t 0...+8 °C)
ULD storage with temperature maintenance	No	No	No	No

*The data was submitted by airports authorities

In addition to the absence of separate multi temperature chambers the storage problems often arise due to the low quality of information exchange system. Technological scheme in the International Supply Chain of perishable goods transportation by air includes the following stages (fig. 3):

1. Reservation of the goods cargo capacity only after coordination with the carrier the possibility of this cargo type transportation. Documents: air waybill, safety Declaration.
2. Passing through phytosanitary/veterinary control. Documents: phytosanitary/ veterinary certificate. When sending plants from the territory under quarantine, you must obtain a permission to send an individual shipment and quarantine documents.
3. Obtaining Customs permit for cargo transportation (clearance of cargo). Documents: customs declaration.
4. Unloading of cargo from the vehicle that delivered the cargo to the airport, presenting the cargo for transportation. Documents: confirmation that the cargo won't lose its quality during the set time of transportation; invoice indicating the temperature of the cargo when loading into the vehicle.
5. Weighing and volume measurement.
6. Marking of cargo.
7. Storage and keeping custody with liability on the territory of the airport and having pre-flight check. Documents: power of delivery, air invoice with the seal confirming the check.
8. Transportation charge.
9. Completion of cargo loading on the departure flight (consolidation of cargo, pallets and containers formation).
10. Transportation from the warehouse to the aircraft stand.
11. Loading.
12. Cargo berthing.

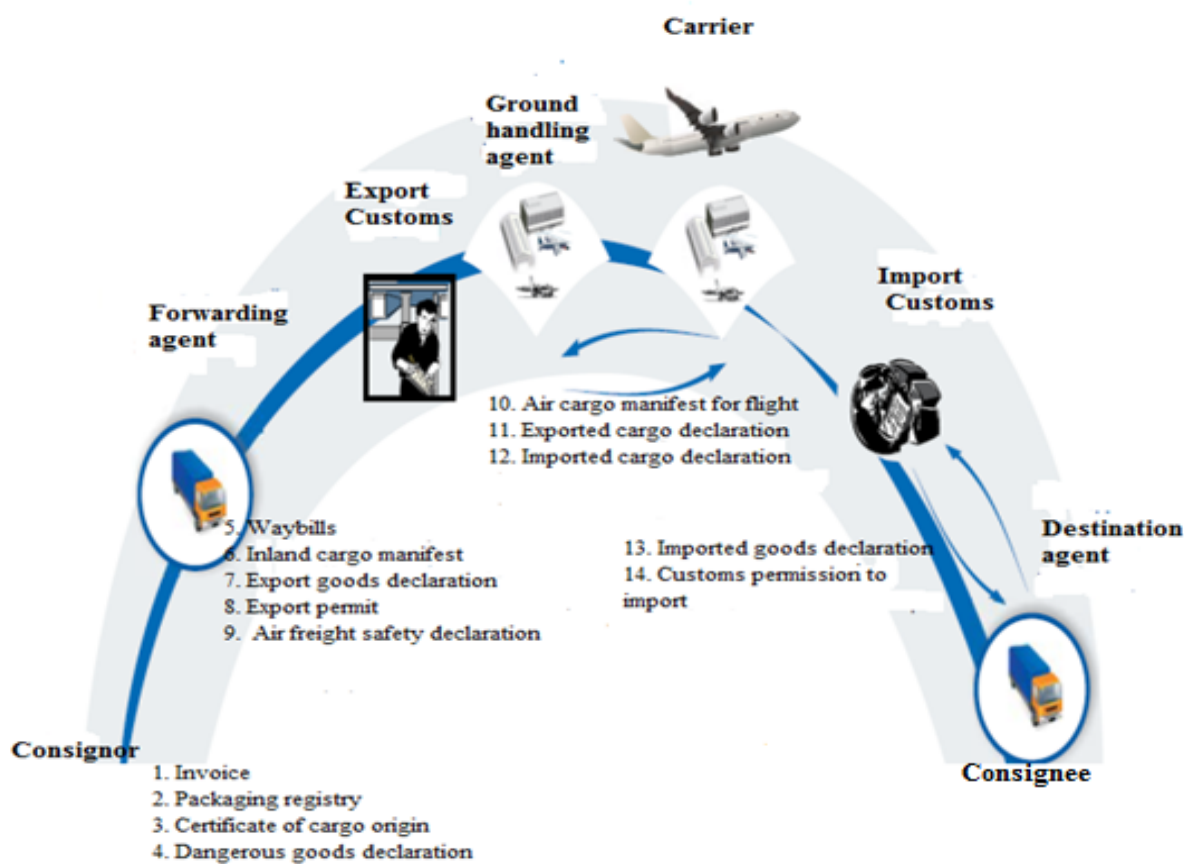


Fig. 3. Documents which must be processed while shipping perishable goods via International Supply Chain³

The long procedure of registration and cargo dispatch leads to the fact that the cargo doesn't spend more than 30% of the total delivery time on the plane, the remaining time is spent on cargo processing at the airport terminals, paperwork, and customs control [4]. This time expenditure can and should potentially be reduced.

According to the World Bank 2018 assessments, Russia is the 75-th among 160 countries by the quality of logistics service. The composite score of Logistics Performance Indicator, – LPI is 2,76. For comparison, Russia has been left behind by such countries as: India (the 44-th), LPI makes 3,18; Bulgaria is the 52nd, (3,03); Brazil is the 56th (2,99); Columbia is the 58th (2,94); Kazakhstan is the 71st (2,81). Among the six indicators used for LPI formation, the lowest one in 2018 in Russia was the quality of Customs service - 2,42 (the 97th position), further is the quality of international supplies - 2,64 (the 96th position) and tracking shipments in the supply chain - 2,65 (the 97th position). The time spent on Customs clearance doesn't depend on the quality of the airport infrastructure, however, the cargo safety during this procedure is determined by the availability of necessary infrastructure of warehouses for temporary storage, as the results show this infrastructure is not developed enough. The average time of imported goods delivery in the supply chain by air transport at the distance of 2646 kilometers equals to 5 days. Considering, that according to IATA standards, this time must be equal to 48 hours. The average time of Customs clearance with the physical inspection makes 4 days. The top position belongs to the index of delivery timeliness-3,31 (the 66th position), Figure 4.

³ Air Freight: A Market Study with Implications for Landlocked Countries. Transport Papers. The World Bank Group, 2019. 115 p.

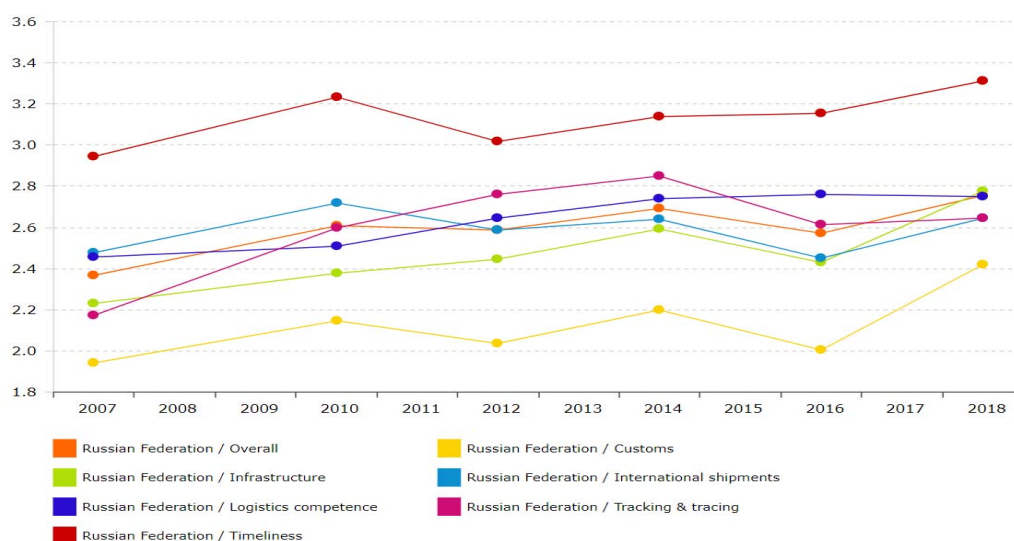


Fig. 4. Logistics effectiveness dynamics index (LPI) and its indicators in Russia⁴

Survey of the “Moscow Cargo” specialists carried out by the author of this study revealed that the average time of perishable goods handling at the airport makes 5 hours and 15 minutes disregarding the Customs clearance time. Relying on specialists’ esteems the average Customs clearance time should make 2 hours. All that exceeds 6 hours is considered to be ineffective⁵. Exceeding the time of customs clearance operations and passing phytosanitary control at Russian airports leads to a delay of cargo in warehouses which increases the cost of products and often leads to its damage due to the lack of a sufficient number of multi-temperature temporary storage warehouses.

As far as the majority of perishable goods in International Supply Chain is handled at Sheremetyevo International Airport, it provided the data for analysis of the perishable goods handling time taking the lot of mango as an example, because it has the highest temperature storage regime, which can be maintained by the temperature chambers with adjustable storage regime.

Mango belongs to the category of climacteric fruits, which respiration intensity increases while ripening. Ethylene production at the initial stage of storage causes a sharp increase of respiration intensity. Climacteric fruits have a good ability to ripening and it is widely used in logistics. Fruits collected at the stage of medium maturity are delivered only by air transport. On average, the acceptable shelf life of mango at an optimal temperature of +12...+14°C and relative humidity of 90-95% is 30 days. Extreme cooling of mango in the initial stage of ripening occurs at temperatures below +12° C. As the ripening stage increases, the mango resistance to lower temperatures increases, but cooling below +10°C is not recommended. Since mango is harvested at the stage of incomplete ripening, the stage of its ripening is mandatory in the supply chain, which occurs at the temperature of +15.5...+30°C, the optimal temperature is +20...+22°C [14].

There are enough multi temperature chambers for separate storage of perishable goods in the modernized cargo terminal Moscow Cargo at Sheremetyevo International Airport. Temperature chambers in temporary storage warehouses at Moscow Domodedovo Airport and Vnukovo Moscow International Airport maintain the temperature of +2...+4°C, since most imported berries, fruits and vegetables are processed at exactly this temperature, and specially allocated warehouses are not provided. Storing mango at this temperature for more than a day leads to its hypothermia, loss of ripening ability and spoilage.

⁴ International LPI. Country Score Cards [Электронный ресурс] // World Bank. Available at: <https://lpi.worldbank.org/international/scorecard/line/254/C/RUS/2018#chartarea> (accessed 20.12.2019).

⁵ Perishable Cargo Regulation. International Air Transport Association. Montreal. Geneva, 2015. 232 p.

The research showed that the average time of mango supply chain operation in Russia is from 12 to 55,5 days at the permissible storage time of 30 days, which is determined by the delays in mango handling at the destination airport. The flight time and the time of mango processing at Sheremetyevo International Airport makes up from 47,5 hours to 10 days (tabl. 3), while the IATA standard defines the time limit of 48 hours [12 – 13]. The most problematic operations while processing the cargo at the airport are Customs clearance, phytosanitary and quarantine checks because of low quality document exchange between the consignor of goods and airport services. As soon as the goods arrive at the destination airport, the cost of each cargo handling hour increases dramatically, since it reduces the life cycle of the goods on the store shelves [15 – 16].

Table 4

Flight time and the time of mango processing at Sheremetyevo International Airport

№	Process	Time of performance in hours	Quality impact
1	Flight to Sheremetyevo International Airport	17,5	High
2	Airplane unloading at Sheremetyevo International Airport	1 – 2	Medium/high
3	Customs clearance and phytosanitary checks	5 – 7 2	High
4	Quarantine control performed by Federal Service for Veterinary and Phytosanitary Surveillance (for sub quarantine goods) and obtaining quarantine permission	20 – 120	High
5	Unpalletization at Sheremetyevo International Airport	3 – 6	High
6	Storage at the temporary storage warehouse	1 – 3	High

*Author's personal calculations

The most often delays and disturbances in perishable goods handling process at the airport happen because of [17–18]:

- The cargo is not declared as perishable (marking mistake);
- The cargo is stored in inappropriate temperature conditions;
- The cargo is delivered in inappropriate packaging;
- Some technical delays occur while handling the cargo;
- The wrong performance of loading and freezing (doesn't follow instruction).

PROPOSALS FOR IMPROVEMENTS OF PERISHABLE GOODS GROUND-BASED HANDLING TECHNOLOGY AT THE AIRPORT

The main criteria for perishable goods International Supply Chain functioning is the speed of handling. The longest delays happen during ground handling of cargo at the destination airport [19]. Exporting countries which are aimed at stimulation of outgoing cargo flows, invest much money into development of ground infrastructure and modern informational technologies application, which allow them to reach the optimal time for operations performance. It is connected with the necessity to develop new markets and increase export volumes. As far as perishable goods export volume from Russia is insignificant, the infrastructure for handling this category of cargo in Russian airports remains low and has poor support from the government. Due to this fact the ground handling rate of perishable goods international supply chain functioning slows down in cargo terminals of Russian airports. As the crite-

tion for evaluation of airport facilities for perishable goods supply chains handling, it is possible to use the number of multitemperature chambers at the airport, their area, the temperature storage system ULD availability, the amount of time which perishable goods are at the airport. The following is offered to solve these problems:

1. Establish additional cargo areas with specialized temperature chambers for separate storage of goods which require different temperature conditions and are incompatible due to biological peculiarities in the cargo terminals of the appointed airports (central hubs) which process the perishable goods International Supply Chain, the airports of Novosibirsk, Vladivostok, Yekaterinburg and Krasnoyarsk.

2. Create the systems of temperature storage ULD at the selected airports taking into account the prognostic demand for their handling.

3. Organize 24-hour operation of all services which are involved into ground handling of perishable goods at the airport (Customs house, representation of Federal Service for Veterinary and Phytosanitary Surveillance, phytosanitary control laboratories).

4. Use the experience of the leading airport cargo terminals on electronic cargo certification while receiving the safety declaration (eCSD).

5. Implement the digital system of document circulation (compiling the digital invoice), which will allow to synchronize the electronic freight and processing of import documents. The model of material and information flows organization in International Supply Chain applying EDI (Electronic Data Interchange) and scanned documents is shown in Figure 8.

6. Simplify customs clearance for cargo flights at destination airports by implementing pre-flight preliminary information about the cargo (ACI) in accordance with the framework of standards (SAFE) of the World Customs Organization and Pre-Loading Advance Cargo Information (PLACI). Application of this information is only possible on having the digital (electronic) document circulation between all the members of International Supply Chain.

7. Implement the Block-Chain system to follow all operations in the International Supply Chain. This technology allows to fix information about every displacement of cargo in the cloud system by means of creating a corresponding note [20 – 22]. Such type of notes is impossible to be broken or changed as they have decentralized structure of storage system. The principle of the system operation is the following: each member of the supply chain receives the information about any displacement of the cargo, but the process itself is not monitored. This system will simplify the process of documents check and finding errors in these documents mainly when checking the marking and customs clearance.

The introduction of pre-shipment advance cargo information will allow customs authorities to: focus on more detailed verification of high-risk shipments safety; reduce delays in customs clearance for low-risk shippers; flexibly adapt to different models of international supply chain organization while ensuring a comparable level of security; simplify the process of goods displacement in global supply chains which are characterized by complex cross-border and multimodal transport.

The implementation of the Block Chain system combined with modern technologies will simplify the process of document circulation as well as the quality of required shipment conditions observed by each member [23]. Linux Foundation Company organized a project for perishable goods transportation quality analysis. To achieve this goal they created a network of sensors which were attached to the products and recorded a wide range of telemetric parameters such as: time, location, temperature, humidity, knocks and slopes. Sensors of such kind make a 100% precise record of delivery conditions breakage time and identify the agent in the supply chain, who is responsible for the breakage [4].



Fig. 5. Electronic workflow organization with synchronization of electronic freight and registration of import documents according to WCO recommendations

The governments of many countries such as France, South Korea, Australia, have already started spending hundreds of millions of dollars on implementation of these technologies and increasing transportation transparency. According to the esteems of the largest technological IBM Corporation, as soon as this technology is implemented by the majority of market participants, shippers will be able to reduce the actual cost of physical transportation by about 20% [24], by filtering unreliable carriers and eliminating the risks of cargo damage throughout the supply chain [25].

REFERENCES

1. Shaw, S. (2016). *Airline Marketing and Management*. 7th ed. New York: Routledge, 364 p.
2. Kienzlen, M. *Sales and shrink by department*. Where is My Shrink. Available at: <http://wheresmyshrink.com/shrinkbydepartment.html> (accessed 10.10.2019).
3. Lemma, Y., Kitaw, D. and Gatew, G. (2014). *Loss in perishable food supply chain: an optimization approach literature review*. Scientific & Engineering Research, vol. 5, issue 5, pp. 302–311.
4. Poleshkina, I.O. and Vasileva, N.V. (2020). *Use of blockchain technology as supply chain management system involving air transport*. Civil Aviation High Technologies, vol. 23, issue 2, pp. 72–86. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-2-72-86
5. Chaudhuri, A., Dukovska-Popovska, I., Subramanian, N., Chan, H. and Bai, R. (2018). *Decision-making in cold chain logistics using data analytics: a literature review*. International Journal of Logistics Management, vol. 29, no. 3, pp. 839–861. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJLM-03-2017-0059>
6. Baxter, G. and Srisaeng, P. (2018). *Cooperating to compete in the global air cargo industry: the case of the DHL Express and Lufthansa Cargo A.G. Joint Venture Airline 'AeroLogic'*. Infrastructures, vol. 3, issue 1, p. 7. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures3010007>

7. Sales, M. (2016). *Aviation logistics. The dynamic partnerships of air freight and supply chain*. Great Britain: Kogan Page Limited, 196 p.
8. Yakavenka, V., Mallidis, I., Siamas, I. and Vlachos, D. (2016). *A decision support system for cold supply chain network design*. Proceedings of 11th MIBES Conference, Heraklion, Crete, Greece, 22-24 June, pp. 545–555. Available at: <http://mibes.teilar.gr/proceedings/2016/Yakavenka-Mallidis-Siamas-Vlachos-Iakovou.pdf> (accessed 08.10.2019).
9. Apte, A. (2010). *Supply chain networks for perishable and essential commodities: design and vulnerabilities*. Operations and Supply Chain Management, vol. 3, no. 2, pp. 26–43. DOI: <http://dx.doi.org/10.12660/joscmv3n2p26-43>
10. Terry, L. (2014). *Perishable logistics: cold chain on a plane*. Inbound Logistics. 20.01.2014. Available at: <https://www.inboundlogistics.com/cms/article/perishable-logistics-cold-chain-on-a-plane/> (accessed 13.09.2019).
11. Poleshkina, I.O. (2018). *Problems of food security in the regions of the far north of Russia*. Economy of Region, vol. 14, issue 3, pp. 820–835. DOI: 10.17059/2018-3-10. (in Russian)
12. Pelletier, W., Chau, K.V. and Bucklin, R.A. (2018). *Analysis of air cargo temperature during transportation operations*. Transactions of the ASABE, no. 61 (2), pp. 723–732. DOI: 10.13031/trans.12524
13. Sergeeva, A. (2019). *World mango market: consumption continues to grow steadily, exceeding \$ 65 billion in 2018*. Index Box. Available at: <http://www.indexbox.ru/news/mirovoj-rynok-mango/> (accessed 11.11.2019). (in Russian)
14. Brecht, J.K. (2017). *Mango postharvest best management practices manual*. IFAS Extension University of Florida, 73 p.
15. Vega, H. (2008). *The transportation costs of fresh flowers: a comparison between Ecuador and major exporting countries*. Working Paper 06. Center for Transportation Policy, Operations, and Logistics. School of Public Policy, George Mason University, 41 p.
16. Taiti, C. and Marone, E. (2016). *Sometimes a little mango goes a long way: a rapid approach to assess how different shipping systems affect fruit commercial quality*. Food Analytical Methods, no. 9 (3), pp. 691–698. DOI: 10.1007/s12161-015-0240-5
17. Sirisaranlak, P. (2017). *The cool supply chain management for cut flowers*. 8th International Science, Social Science, Engineering and Energy Conference, pp. 446–453.
18. Reid, M.S. (2009). *Handling of cut flowers for export*. Proflora bulletin. Available at: https://ucanr.edu/sites/Postharvest_Technology_Center_/files/231308.pdf (accessed 10.10.2019).
19. Tozi, L.A. and Muller, C. (2006). *The viability of air transportation for perishable agricultural produce*. Journal of the Brazilian Air Transportation Research Society, vol. 2, issue 2, pp. 83–96.
20. Panyukova, V.V. (2018). *International experience of using blockchain technology in supply chain management*. Economica. Nalogi. Pravo, vol. 11, no. 4, pp. 60–67. DOI: 10.26794/1999-849X-2018-11-4-60-67. (in Russian)
21. Dobrovnik, M., Herold, D.M., Furst, E. and Kummer, S. (2018). *Blockchain for and in logistics: what to adopt and where to start*. Logistics, vol. 2, issue 3, p. 18. DOI: 10.3390/logistics2030018
22. Hackius, N. and Petersen, M. (2017). *Blockchain in logistics and supply chain : trick or treat?*. Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL), 18 p. Available at: <https://doi.org/10.15480/882.1444> (accessed 12.10.2019).
23. Wang, S. and Qu, X. (2019). *Blockchain applications in shipping, transportation, logistics, and supply chain*, in Qu X., Zhen L., Howlett R., Jain L. (eds.). Smart Transportation Systems 2019. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol. 149, pp. 225–231. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-8683-1_23

24. Woods, R. (2017). *New kids on the blockchain: effect on perishables market*. Air Cargo World: The Source for Air Freight and Logistics. Available at: <https://aircargoworld.com/allposts/new-kids-on-the-blockchain-effect-on-perishables-market/> (accessed 23.09.2019).

25. Kshetri, N. (2018). *Blockchain's roles in meeting key supply chain management objectives*. International Journal of Information Management, vol. 39, pp. 80–89. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2017.12.005

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Irina O. Poleshkina, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Associate Professor of The Chair of Transportation Organization on Air Transport, Moscow State Technical University of Civil Aviation, ipoleshkina@mstuca.aero.

ПЕРЕВОЗКА СКОРОПОРТЯЩИХСЯ ГРУЗОВ ВОЗДУШНЫМ ТРАНСПОРТОМ: ПРОБЛЕМЫ ОБРАБОТКИ В РОССИЙСКИХ АЭРОПОРТАХ

И.О. Полешкина¹

¹*Московский государственный технический университет гражданской авиации
(МГТУ ГА), г. Москва, Россия*

В статье рассмотрены проблемы обработки скоропортящихся грузов в российских аэропортах при доставке в международных цепях поставок (МЦП). Исследование проведено на основе операционного анализа. На первом этапе с помощью статистического анализа было выявлено, что основной категорией скоропортящихся товаров, предъявляющих спрос на воздушные перевозки при поставке в Россию, являются свежие экзотические фрукты. Исследование проводилось на примере цепи поставок манго, так как он предъявляет нестандартные требования к температурному режиму хранения. На втором этапе был сформирован набор критериев для оценки качества обработки скоропортящихся грузов в аэропортах: число обязательных операций при обработке груза, время выполнения этих операций, количество оформляемых документов, количество мультитемпературных камер в аэропорту, их площадь, наличие системы температурного хранения ULD. Исследование показало, что около 90% скоропортящихся грузов, поставляемых в Россию, обрабатывается в аэропортах МАУ из-за отсутствия необходимой инфраструктуры температурных складов в остальных аэропортах страны. Данное ограничение существенно удорожает логистику скоропортящихся грузов по территории страны и снижает их качество. В рамках данного исследования были выбраны четыре международных аэропорта за пределами ЦФО, имеющие стратегическое значение и потенциал для формирования центральных хабов по обслуживанию скоропортящихся грузов и обработке транзитных и трансферных потоков. Среди них аэропорты Новосибирска, Владивостока, Екатеринбурга и Красноярска. Для аэропортов МАУ предложена специализация на обслуживании экспортно-импортных потоков скоропортящихся грузов. В качестве данных для проведения исследования были использованы материалы авиакомпаний, крупнейших грузовых терминалов российских аэропортов, транспортных компаний, специализированных международных организаций воздушного транспорта и логистических ассоциаций. Исследование показало, что сдерживающим фактором повышения скорости работы ЦП является время наземного обслуживания грузов в аэропортах России, которое значительно превосходит время обслуживания в стране-экспортере. Задержки связаны с неразвитостью инфраструктуры грузовых терминалов для обработки скоропортящихся грузов и сложностью процедур документального оформления из-за отсутствия систем электронного документооборота и автоматизированной проверки маркировки. Предложена модель формирования электронного документооборота в МЦП с применением предполетной и предгрузочной предварительной информации о грузе и внедрение системы BlockChain для проверки правильности оформления документов на всех стадиях в цепи поставок, что позволит сократить общее время наземного обслуживания грузов.

Ключевые слова: воздушный транспорт, технология доставки грузов, скоропортящиеся грузы, международные цепи поставок, цепи поставок манго, маркировка грузов, наземное обслуживание грузов в аэропорту, электронный документооборот, технология BlockChain.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Shaw S.** Airline marketing and management, 7th ed. New York: Routledge, 2011. 364 p.
2. **Kienzlen M.** Sales and shrink by department [Электронный ресурс] // Where is My Shrink. URL: <http://wheresmyshrink.com/shrinkbydepartment.html> (дата обращения 10.10.2019).
3. **Lemma Y., Kitaw D., Gatew G.** Loss in perishable food supply chain: an optimization approach literature review // Scientific & Engineering Research. 2014. Vol. 5, iss. 5. Pp. 302–311.
4. **Полешкина И.О., Васильева Н.В.** Технология BLOCKCHAIN как инструмент управления цепями поставок с участием воздушного транспорта // Научный Вестник МГТУ ГА. 2020. Т. 23, № 2. С. 72–86. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-2-72-86
5. **Chaudhuri A.** Decision-making in cold chain logistics using data analytics: a literature review / A. Chaudhuri, I. Dukovska-Popovska, N. Subramanian, H. Chan, R. Bai // International Journal of Logistics Management. 2018. Vol. 29, no. 3. Pp. 839–861. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJLM-03-2017-0059>
6. **Baxter G., Srisaeng P.** Cooperating to compete in the global air cargo industry: the case of the DHL Express and Lufthansa Cargo A.G. Joint Venture Airline ‘AeroLogic’ // Infrastructures. 2018. Vol. 3, iss. 1. P. 7. DOI: <https://doi.org/10.3390/infrastructures3010007>
7. **Sales M.** Aviation logistics. The dynamic partnerships of air freight and supply chain. Great Britain: Kogan Page Limited, 2016. 196 p.
8. **Yakavenka V.** A decision support system for cold supply chain network design [Электронный ресурс] / V. Yakavenka, I. Mallidis, I. Siamas, D. Vlachos // Proceedings of 11th MIBES Conference, Heraklion, Crete, Greece, 22-24 June 2016. Pp. 545–555. URL: <http://mibes.teilar.gr/proceedings/2016/Yakavenka-Mallidis-Siamas-Vlachos-Iakovou.pdf> (дата обращения 08.10.2019).
9. **Apte A.** Supply chain networks for perishable and essential commodities: design and vulnerabilities // Operations and Supply Chain Management. 2010. Vol. 3, no. 2. Pp. 26–43. DOI: <http://dx.doi.org/10.12660/joscmv3n2p26-43>
10. **Terry L.** Perishable logistics: cold chain on a plane [Электронный ресурс] // Inbound Logistics. 20.01.2014. URL: <https://www.inboundlogistics.com/cms/article/perishable-logistics-cold-chain-on-a-plane/> (дата обращения 13.09.2019).
11. **Полешкина И.О.** Эффективности продовольственного обеспечения районов Крайнего Севера России // Экономика региона. 2018. Т. 14, вып. 3. С. 820–835.
12. **Pelletier W., Chau K.V., Bucklin R.A.** Analysis of air cargo temperature during transportation operations // Transactions of the ASABE. 2018. No. 61 (2). Pp. 723–732. DOI: 10.13031/trans.12524
13. **Сергеева А.** Мировой рынок манго-потребление продолжает уверенно расти, превысив 65 млрд. долл. США в 2018 году [Электронный ресурс] // Index Box. 2019. URL: <http://www.indexbox.ru/news/mirovoj-rynok-mango/> (дата обращения 11.11.2019).
14. **Brecht J.K.** Mango postharvest best management practices manual. IFAS Extension University of Florida, 2017. 73 p.
15. **Vega H.** The transportation costs of fresh flowers: a comparison between Ecuador and major exporting countries. Working Paper 06. Center for Transportation Policy. Operations and Logistics. School of Public Policy. George Mason University, 2008. 41 p.
16. **Taiti C., Marone E.** Sometimes a little mango goes a long way: rapid approach to assess how different shipping systems affect fruit commercial quality // Food Analytical Methods. 2016. No. 9 (3). Pp. 691–698. DOI: 10.1007/s12161-015-0240-5
17. **Sirisaranlak P.** The cool supply chain management for cut flowers // 8th International Science, Social Science, Engineering and Energy Conference, 2017. Pp. 446–453.

18. Reid M.S. Handling of cut flowers for export [Электронный ресурс] // Proflora bulletin. 2009 URL: https://ucanr.edu/sites/Postharvest_Technology_Center_/files/231308.pdf (дата обращения 10.10.2019).
19. Tozi L.A., Muller C. The viability of air transportation for perishable agricultural produce // Journal of The Brazilian Air Transportation Research Society. 2006. Vol. 2, iss. 2. Pp. 83–96.
20. Панюкова В.В. Международный опыт применения технологии блокчейн при управлении цепями поставок // Экономика. Налоги. Право. 2018. Т. 11, № 4. С. 60–67. DOI: 10.26794/1999-849X-2018-11-4-60-67
21. Dobrovnik M., Herold D.M., Furst E. Blockchain for and in logistics: what to adopt and where to start // Logistics. 2018. Vol. 2, iss. 3. P. 18. DOI: 10.3390/logistics2030018
22. Hackius N., Petersen M. Blockchain in logistics and supply chain: trick or treat? // Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL), 2017. 18 p. DOI: <https://doi.org/10.15480/882.1444> (дата обращения 12.10.2019).
23. Wang S., Qu X. Blockchain applications in shipping, transportation, logistics, and supply chain / Под ред. X. Qu, L. Zhen, R. Howlett, L. Jain. // Smart Transportation Systems 2019. Smart Innovation, Systems and Technologies. Springer, Singapore. 2019. Vol. 149. Pp. 225–231. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-8683-1_23
24. Woods R. New kids on the blockchain: effect on perishables market [Электронный ресурс] // Air Cargo World: The Source for Air Freight and Logistics. 2017. URL: <https://aircargoworld.com/allposts/new-kids-on-the-blockchain-effect-on-perishables-market/> (дата обращения 23.09.2019).
25. Kshetri N. Blockchain's roles in meeting key supply chain management objectives // International Journal of Information Management. 2018. Vol. 39. Pp. 80–89. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2017.12.005

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Полешкина Ирина Олеговна, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры организации перевозок на воздушном транспорте МГТУ ГА, ipoleshkina@mstuca.aero.

Поступила в редакцию 01.09.2020
Принята в печать 26.11.2020

Received 01.09.2020
Accepted for publication 26.11.2020

АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА

- 05.07.01 – Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов;**
05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов;
05.07.03 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов;
05.07.05 – Тепловые электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов;
05.07.07 – Контроль и испытание летательных аппаратов и их систем;
05.07.09 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов;
05.07.10 – Инновационные технологии в аэрокосмической деятельности

УДК 629.7.05:004.032.2

DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-6-84-100

**SYSTEM BASED APPROACH TO THE DESIGN OF TENSION SENSING
ELEMENT MADE OF MODIFIED DIAMOND**

S.V. DIANOV¹, V.M. NOVICHKOV²

¹ *Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

² *Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

Modern and perspective tasks of robotics with control from artificial intelligence systems require the use of small-sized measuring devices. In this case, the intensively developed quantum sensors and quantum computers have a bright prospect. Their main advantage is the ability to successfully process the data of random processes with decomposition of complex functions into simple multipliers, as well as their small size and the ability to transmit data over long distances without wires. Data transmitted over quantum communication lines cannot be copied or intercepted, which is very useful for remote control of complex technical systems. Based on the results of the analysis of probabilistic noisy data quantum computer is able to quickly develop an assessment of the technical condition of the complex system. At the same time, there is no need to go through all the possible solutions to the evaluation problem with a huge amount of input data, some of which can sometimes be undefined. The main problem in the research of quantum processes is that researchers study the processes occurring in materials, but they do not indicate the ways in which quantum sensors and quantum computers are used in practical applications. This article explains how to form a measuring transformer that will be compatible with a quantum computer. The main objective of the study was to bring the results of basic research in the field of quantum computing closer to their application in applied tasks. It is shown how quantum processes can be shifted to the field of technical measurements of physical quantities used in complex systems. In the process of obtaining the results of the study, the hypothetical deductive method and the method of ascent from the abstract to the concrete within the framework of a systematic approach to the development of elements of technical systems were used. The result is a description of the processes of designing of tension sensing element made of modified diamond. The main findings of the study include the fact that quantum sensors implemented in the form of a modified diamond crystal are well described by the theory of measuring transducers with frequency output and can be used to get data about the state of an object.

Key words: sensing element, NV-center, quantum sensor, vibration sensor, measuring channel, converter with frequency output.

INTRODUCTION

There are many requirements for modern complex technical systems. Robotic units with artificial intelligence are supposed to be a control center of such systems at the time when input data must be holistic and provide comprehensive information from all parts of the system. The control algorithms need adequate information about current state of systems for producing diagnosis of possible failures and malfunctions. Failures and malfunctions are the sign that characterizes ability of the system to carry out its purpose. The malfunctions that were missed can lead to the problems in control algorithms which in turn could result in loss of the object of control. Miniaturization by means of nanotechnologies can help to improve reliability.

For the reliability and accuracy of practical applications of complex technical systems must contain more and more sensors and transducers. The quantity of the sensors and transducers sometimes

reach hundreds of items. In this case the dimensions and mass of sensors would increase unacceptably for perspective systems if being produced by using existing technologies. Implementation of achievements of nanotechnology and artificial intelligence will help to reach necessary parameters. Therefore, it would be good to use sensors with quantum primary converters. Quantum technologies implements in sensor small size, reliability because of absence of coupled moving parts and possibility of artificial intelligence implementation because of basic feature of uncertainty in quantum states.

For example, one of realizations of the system can be used for diagnostic purposes. Then parameters of stochastic processes would be the input data for the diagnostic algorithms in case of implementation of a large number of sensors in the system. It is a problem for conventional computers. It reflects in solution of the task of factorization of complicated functions, for example. It is a challenge for quantum computers. The advantage of quantum computers is their possible ability to make fast estimation of the future condition of complex technical systems in case where the numerical methods do not apply. Sometimes any input data can be lost because of external influencing actions on sensors and could fail them. Conventional methods of estimation of condition of technical systems in such a situation are not going to operate properly.

Quantum computers are based on qubits exceed in some fields of application any modern conventional supercomputers [1]. These fields are the analysis of big data sets, cryptography, drug development, riddle of superconductivity research, problems of reliability. Moreover, quantum computers are able to accomplish the task of data teleportation. As for hardware the IBM company announced that the real 1000 qubit quantum computer system is to be built in 2023. The Google's 53 qubit quantum computer is used now and Google has a plan to create a million-qubit structure in 10 years [2]. Nowadays new quantum computer algorithms which allow to speed up calculations and unravel a lot of scientific puzzles are under elaboration. For example, the new algorithm for quantum computer which allows to get over the quantum decoherence problem has been developed and tested. It is Variational Fast Forwarding algorithm that has been created by Los Alamos researchers [1].

Features of quantum computers and quantum algorithms presuppose the existence of ability to estimate condition of complex technical systems by means of analyzing stochastic noisy data. The advantage of quantum computers is the absence of necessity for sorting through all possible options of solutions for the task of the estimation problem that has a huge amount of an input data.

Procedure of calculating measuring transducer is offered in this article. The transducer is specially created on the diamond plate with nitrogen-vacancy (NV) center. This center appears in diamond when one carbon (C) atom in crystal lattice of the diamond plate is replaced by a nitrogen (N) atom, and the adjacent carbon atom is removed from the diamond's crystal lattice creating the vacancy (V). The NV center has superb spin coherence and optical properties that make it one of the most promising to implement quantum sensing and quantum computing in practice.

Thus, the NV center can be used as a sensing element for a loadcell. The loadcell could be applied in diagnosis the technical condition of the airframe parts, parts of fuel systems, oil systems, hydraulic systems, pressurization systems, and other systems that work under pressure or tension.

METHOD AND METHODOLOGY OF THE RESEARCH

We offer to take results of conventional vibration sensors research [3] in order to make smooth transition to the quantum technology. We applied hypothetical-deductive method to this end. Results of the research of the diamond cantilever with NV center were classified according to the classic theory of measurement sensors. The way of developing the measuring converter (sensor or the loadcell in this case) from a diamond plate with NV center was offered as the result of the research. The sensor should input data into a quantum computer. In future, it can be the part of a diagnosis system.

RESULTS OF THE RESEARCH

We offer the structure and designing project of measurement channel for a quantum diagnostic computer (computer that is used for diagnosis). The measurement channel is a part of a measurement system that produces one explicit function. It transforms the input measurable value to an analogue signal to the output. The output analogue signal is a function of input parameter that should be measured.

Parameters that can be under control are pressure, strength, and displacement. Moreover, it could be any other parameter that can influence the natural frequency of a diamond plate with NV center.

The dimensions and shape of the diamond plate with an NV center depends on the measurement range of the parameter which is measured or tested. The parameter is the indicator of the state of the tested system. The diamond plate with NV center is both sensor and transducer. They are two in one. It transforms input parameter to photon (or phonon) to the output that will be input value for the quantum diagnostic computer.

We offer to use the diamond plate with NV center as a main part of a measuring channel for the quantum diagnostic computer. Parameters of such a quantum sensor can be calculated by means of the existing theory of measuring transducers with the frequency output. Modern complex technical systems produce a large amount of stochastic data that describes their present and future state. Good technique of such data processing is a quantum computer.

We believe that the diamond plate with NV center virtually consists of two parts. The first one is a diamond plate. It serves as resonator which characteristics can be described by the existing theory of vibration sensors [3]. The second part is the NV center in the modified diamond plate. The NV center serves as a subsequent transducer. Diamond with the NV center is a diamond with broken lattice but it does not influence the mechanical properties particularly the natural frequency of the plate. It allows uniting two transducers in one: the primary (sensing element) and the subsequent (NV center).

The sensor that consists of the resonator and transducer must be vibrated by a special excitation system of vibration. Parameters of the system is possible to calculate. The diamond plate with NV center can produce data for a quantum computer while it vibrates: it generates photons (or phonons) that could be accepted for measuring [4 – 10].

This approach to new sensor design allows us to use a new type of measuring channel in technical systems. This way organizes physical processes in the diamond and around it. As a result, sensors of the new type are many times smaller than sensors of the conventional types. At the same time, the sensors of the new type can input data directly into the quantum computer system without any additional means such as transformers, transformations or processing. This new type of sensors can also input data to quantum computers by using its photon (or phonon) radiation feature by means of different types of detectors. For example, it can be: a geometric phase magnetometry technique, a microwave-assisted spectroscopy technique, a hyperpolarization-enhanced NMR spectroscopy technique, spin readout techniques [5 – 7, 11 – 20].

MEASURING CHANNEL FORMATION

The distinctive feature of quantum computer is the inner structure that complies with tasks that the computer is supposed to solve. Moreover, because of this, an algorithm of transforming of input data to output data could not be changed during the operation. It increases the reliability and decreases the universality. Therefore, a structure of the diagnosis quantum computer should be depended on a diagnosed technical system. The diagnosis quantum computer is the device that use quantum superposition and quantum entangle for data transducing and further transmission for diagnosis purposes. The main goal of the creation the diagnosis quantum computer is ability to autoexecute procedures of technical systems condition estimations for maintenance operations scheduling. Advantages of the quantum transformers allow to improve the assessment of complex technical systems since it can process

big stochastic data. Diagnostic parameters could determine the structure of diagnosis quantum computer.

The sensing element is the main part of the sensor and in such case characteristics of sensing element are very important. It is impossible to achieve acceptable accuracy of the measuring parameters without appropriate accuracy of the sensor. In addition, external and internal interferences have to be taken into consideration because their disturbing influence should be reduced. It is also important as calculation of characteristics of the sensing element.

The main idea of the work is to show how to use the published results of quantum technologies in practical engineering activity [21 – 25].

Results of research [26 – 28] allow to produce the loadcell made of diamond with the NV center. The sensing element with the loadcell should sense physical parameters that are needed for diagnosis purposes of technical systems. In a former research [29] the same element was offered as an elementary computing unit for a quantum computer. The unit was named q-bit and it is made of a diamond with the NV center, i.e. of a diamond with artificially changed atomic lattice. One atom of Carbon (^{13}C) in the diamonds atom structure was replaced by one atom of Nitrogen (N). Another adjacent atom of Carbon was removed and its space became empty. This was named vacancy (V). The whole atomic structure was named as the NV center. The NV center has an axis. Projection of the electron spin on the axis serves as a q-bit. According to the conventional theory of vibrating sensors we call the NV center as sensing element. According to the results of the research [26] the NV center can respond to frequency changes of the diamond plate vibration. This feature allows to create quantum sensors from diamond plates.

Unlike binary number system, when bits can only have states "0" and "1", q-bits (quantum bits), in addition to these two states, can have any value in the range from 0 to 1. This is determined by the electron spin feature, when it can have any direction in space. This q-bit feature is taken into consideration when forming measurement channel.

The measuring channel is formed to get information from environment via modified diamond that gets fluorescent feature. The feature is the result NV center behavior under external magnetic field B . Q-bit information can be stored in the NV center by different energy levels as it is shown by Figure 1 [29]. This energy levels of the NV center electron spin were chosen as q-bit where readout could be performed as optical transition of the NV center.

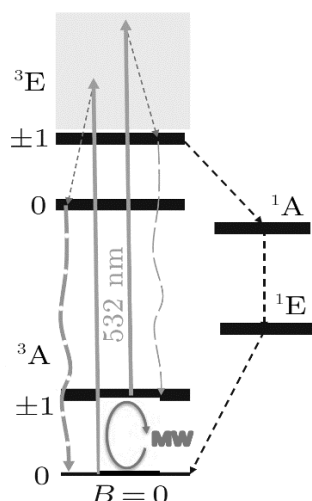


Fig. 1. Energy levels and optical transitions of the NV electron spin

Fluorescence appears under resonant microwave (MW) pulses. Green polarize laser (532 nm) helps the descending dashed lines to appear. It illustrates the fluorescence intensity. Therefore, the spin states can be polarized with green laser and readout by fluorescence intensity.

As it is shown in Figure 1, energy level of negatively charged NV center (spin-1 system) has ground states of an 3A spin triplet, with a zero-field splitting between 0 and ± 1 sub-levels. The degeneracy between ± 1 states can be lifted by an external magnetic field B , then either one of them together with 0 state can form a well-defined two-level system, which is the physical implementation of a q-bit. The quantum state of this spin q-bit can be manipulated with resonant MW pulses [29].

The polarization and readout of this q-bit is realized by exploiting the spin-dependent optical transitions of NV centers. As shown in Figure 1, the energy gap between the ground 3A state and the excited 3E state is 1.945 eV (637 nm). A laser pulse with photon energy larger than 1.945 eV (e.g., 532-nm green laser) can excite the electron spin to its excited states, then there is a difference in choosing the paths back to the ground states: the states ± 1 are more likely to be trapped by the 1A singlet and have less fluorescence compared to the state 0, thus spin state information can be extracted from the fluorescence intensity. Meanwhile, populations in the 1A singlet have a large probability of jumping back to ground state 0, so the off-resonant laser excitation is also polarized [29]. In order to form a proper measurement channel, we are interested in the fluorescence feature of the NV center.

Optically detected magnetic resonance (ODMR) spectrum of an NV center is illustrated by Figure 2 [29].

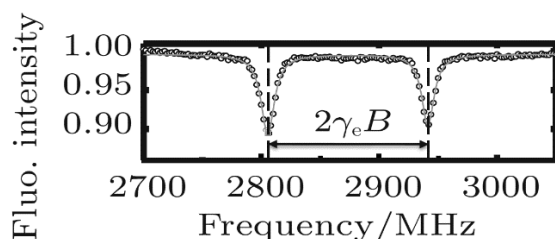


Fig. 2. Optical detected magnetic resonance spectrum of an NV center

The ODMR phenomenon is a result of spin-lattice relaxation which defines the energy transfer between the NV center and its environment. We chose this feature of fluorescence of NV center registered via ODMR as an informative parameter of the sensor in our research.

This NV center is the subsequent element of the measuring channel that is designed by our approach. Therefore, the primary (sensing) element is the diamond plate that is used according to the rules of conventional theory of vibrating sensors. We assume the NV center as secondary transducer. The sensing element should be vibrated by a special excitation of oscillations system in order to make NV center operate. For example, quantum properties of the NV center in the experiments [26] are manipulated by microwave magnetic fields generated by a nearby antenna. The NV center has to be initialized by green laser light for the functioning. So, the sensing element has two parts: a diamond plate and NV center in it.

The measuring channel for a quantum computer system also should consist of two parts. The first one is a diamond plate with the NV center. The second one is a special excitation system. The measuring channel has an analog output signal. The analog signal can be detected by microwave spectroscopy of phonon-dressed states.

SENSOR SCHEME SELECTION

There are two ways of achieving output information from the measuring channel.

The first one is the following: the eigenstate “0” has more fluorescence intensity than eigenstate “1”. It was proved by confocal optical microscope detection [16 – 18]. The speed of information recording for the unit is for about 10^{-9} sec. Data were read by estimating the fluorescence intensity. The common problem of quantum units is their instability. In that unit data can be stored for about a few seconds. It’s a pretty good result. Data could be inputted directly into a quantum computer by photons.

The second way was worked out as the result of research that was made in the Swiss Nanoscience Institute and University of Basel [26]. In this case, the resonator is a diamond cantilever with the NV center and there is the opportunity to manipulate quantum properties by the mechanical strain that arises in the diamond cantilever. The process takes place at room temperature. Quantum properties are coherent oscillations of an embedded NV center spin. Sensitive elements performance in this case is about 10^{-7} sec.

In the other research [28] it was offered to make the resonator with the NV center as a unit of quantum computer systems. It allows to process big stochastic data of the mechanical strain in board systems. It allows to exclude the data transmission path and to process data immediately. Implementation of this result in technical diagnostic means will lead to decrease of energy consumption, quantity of wires, and noise in data.

Both approaches can be described by well-known classical theory of vibrating sensors. Vibration properties of diamond plate, which is used as a quantum sensor, were studied earlier [3, 30].

So, in order to get information about diagnosing system it is necessary to change in time the rigidity of a diamond plate with NV center. Changing the rigidity of the loadcell leads to changing its natural frequency of vibrations. The natural frequency influences to quantum properties of the NV center. Therefore, NV center produces photons or phonons. Photons or phonons intensity can be directly input as data into a quantum computer system as it was described before. The quantum measuring channel has an advantage over conventional technologies because of its structural (not engineering) simplicity, noise immunity as in digital systems, universality of analog systems and accuracy.

The sensitive element made of modified diamond should be theoretically divided into two parts to get better results in vibration sensor engineering. The sensitive element within the framework of classical theory of vibrating converters is mechanical. The mode of its functioning is frequency dependence resonator. There are two types of vibrating plate operation: free oscillation (see Figure 3) and self-oscillation (see Figure 4). The figures illustrate the way that the resonator can operate.

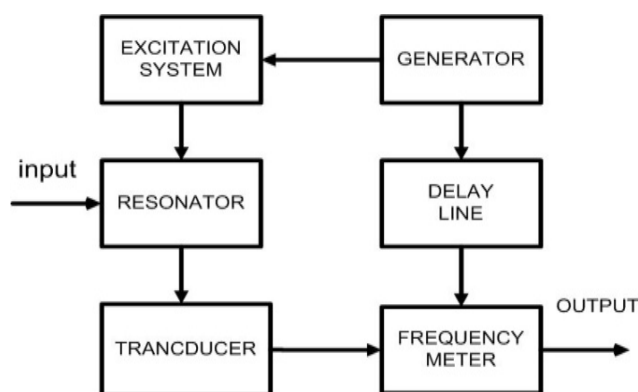


Fig. 3. Functional diagram of the sensor operation in free oscillation mode

The operation principle of the sensitive element is the ability to change its natural frequency under influence of the parameter that is measured. Free oscillation condition is actuated by the exciting vibration system. The resonator begins to oscillate at free vibrations frequency ω_c just after the starting pulse action. Vibration frequency can be calculated as

$$\omega_c = \omega_m \sqrt{1 - d^2},$$

here d – damped vibrations factor, ω_m – natural frequency of the diamond plate.

ω_c is the information parameter which depends on mechanical strain in the loadcell.

Figure 4 illustrates the case of the resonator operation at the self-oscillation condition. The regenerative feedback is needed for self-excitation and sustainable work of the sensing unit. A piezo-element can be used to this end. For the case $d \ll 1$ the frequency of oscillations of the resonator is near natural frequency ω_m . It is possible to estimate the mechanical parameter that is measured by means of measuring of the frequency of oscillations.

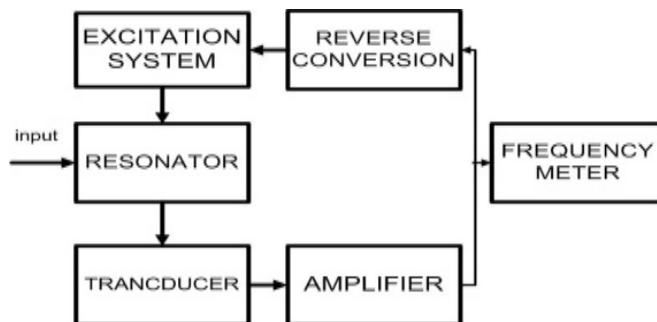


Fig.4. Functional diagram of the sensor operation in self-oscillation mode

The resonator is the main part of the whole measuring channel. There are 8 main types of resonators [3]. These resonators are pendulum, balance-spring, stringed resonator, V-shape plate, cylinder shell, tuning fork, quartz resonator and magnetostrictive rod.

Among them the most convenient for creating a measuring element of a modified diamond are stringed resonator, V-shape plate (see Figure 5), where X is a measured parameter.

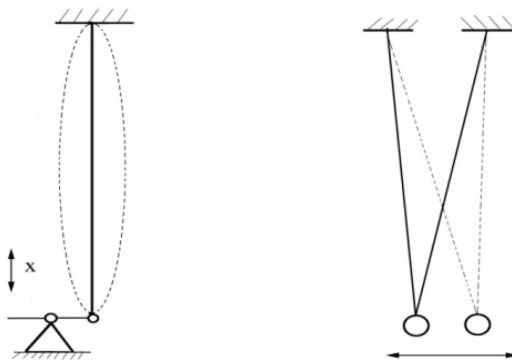


Fig. 5. Types of resonators for measuring element

A cantilever is a combination of stringed resonator and V-shape plate. Usually the oscillations of cantilever contain a lot of parasitic oscillations. The diamond plate is an oscillation system that has a few degrees of a freedom and respectively a few resonance frequencies.

The flexural rigidity k and mass m determine the natural frequency of the resonator. For example for the stringed sensor the natural frequency calculated upon the formula

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

This task earlier was solved for other traditional applications and can be solved for this case.

DESCRIPTION OF THE INFORMATIVE PARAMETER OF THE QUANTUM SENSING ELEMENT

The diamond plate with NV center is an oscillatory system with spatial parameters. Its natural frequency is the function of the distributed mass and elasticity. When the cantilever made of modified diamond oscillates there will appear an energy gap (see Figure 6, [26]). The energy gap in the electron spin resonance of the NV center has been observed in the research [26]. It was shown that there is a high Q-factor which is about $5 \cdot 10^7$ for diamond plate.

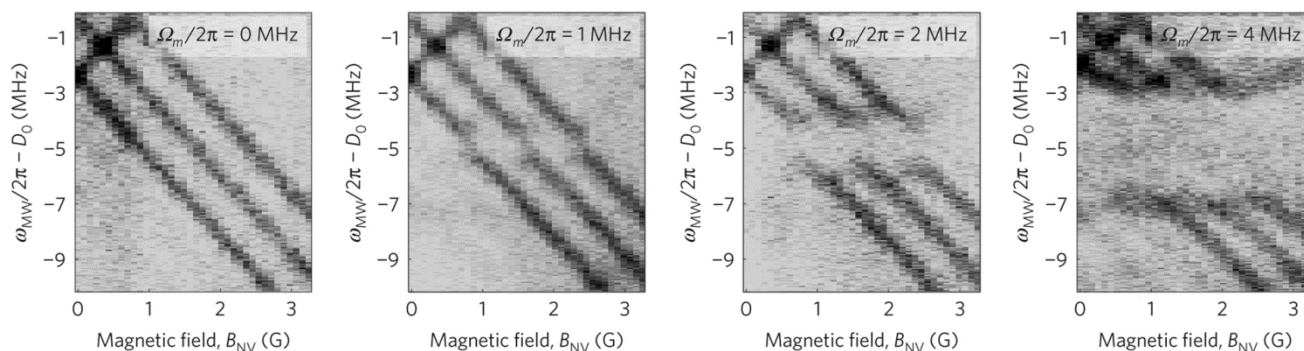


Fig. 6. Changing energy gap in the electron spin resonance of the NV center

The energy gap is the property of a diamond plate with the NV center and the gap depends on the diamond plate oscillations frequency.

We offer to use this energy gap as the output data in the sensor. We assume this because the result of the research [26] shows that strain fields allow to manipulate the electron spin of the NV center in the strong-driving regime. In that experiment the diamond plate with NV center has been driven by the excitation system which runs the free vibrations. The piezo-element was used to this end.

It was shown [26] that the energy gap can be observed by microwave probe at resonance frequency. The gap depends on the natural frequency of the plate and Rabi frequency Ω_m . We believe that since flexural rigidity of the plate is under influence of the parameter which is measured and for its part directly affects the natural frequency of the diamond plate. Therefore, emergence of the energy gap could be output data of the loadcell.

EVALUATION OF THE SENSOR PARAMETERS

The natural frequency of the sensor depends on several factors. The most important are shape, sizes, and fastening type. The shape and sizes of the sensitive element can be calculated upon known formulas. The manner of attaching the plate is very important. There is developed [30] technique of calculating diamond plates with shape, sizes, and natural frequency which we need.

$$f_m = F \cdot C,$$

$$F = \frac{K(1.17 - \frac{h}{d})\frac{h}{d^2}}{\sqrt{1 - \mu^2}},$$

here f_m – natural frequency, C – velocity of propagation of the elastic wave in infinite waveguide arm, for diamond is 18300 meter per second, F – shape factor, h – height of the plate, d – diameter of the inscribed circle, μ – Poisson's ratio for diamond is 0.07, K – factor which depend on the shape and the manner of attaching (available from an experimental data).

The rectangular and round shape of the sensor are more convenient for calculating and producing. There are few K factors that were calculated.

For rectangular plate $K = 0.603$ if plate was fastened by the corner, $K = 0.879$ if plate was fastened by the edge, $K = 1.022$ if plate was fastened by the middle [30].

For round plate $K = 0.954$ if plate was fastened by the edge, $K = 1.298$ if plate was fastened by the middle [30].

The process of engineering of the sensitive element made of modified diamond plate, which is designed for the required frequency range, consists of the following steps:

- 1) the first step is producing the NV center in a diamond plate;
- 2) the second step is calculating and manufacturing the required shape plate, and fastening it appropriately;
- 3) the exciting vibration system for the diamond plate must be build;
- 4) the regenerative feedback which is needed for self-excitation and sustained work of the sensing unit. The piezo-element can be used to this end.

The resonator is the mechanical plate. Therefore, the static characteristic or the static response the output parameter from the input parameter could be defined by the formula

$$f = f_m \sqrt{1 + kx},$$

here f_m – natural frequency of the resonator (Hz), k – coefficient which depends on the shape, sizes, temperature of manufacturing and using etc., all of this could be controlled during the manufacturing and operation the sensor. The output parameter is f . The input parameter is flexural rigidity x of diamond plate that depends on the shape. Elastic expansion arises subject to mechanical loading in the diamond plate. Its flexural rigidity depends on the elastic modulus or the Young's modulus E . The Young's modulus is ratio of small deformation strain. C – velocity of propagation of the elastic wave in infinite waveguide arm depends on the Young's modulus

$$C = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

here ρ – density of the material. The natural frequency of the diamond plate f_m is under ρ influence.

The quadratic approximation is applied to define the real static characteristic (f_m and k) of the resonator from the available experimental data

$$x = bf^2 - a,$$

here $a = k^{-1}$; $b = \frac{1}{f_m^2 k} = \frac{a}{f_m^2}$.

The target function could be minimized by the selection the parameters f_m and k

$$J = \sum_{i=1}^n \left[x_i - (bf_i^2 - a) \right]^2,$$

n – the number of the measurement results of the output parameter x .

f_i – the frequency of the x_i output parameter which depends on the width of the energy gap of the ESP (electron spin resonance).

Estimates of $\widehat{f_m}$ and $\widehat{k}$ which minimize the target function could be calculated upon the formulas

$$f_m^2 = \frac{\sum_{i=1}^n f_i^2 \sum_{i=1}^n x_i f_i^2 - \sum_{i=1}^n f_i^4 \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i f_i^2 - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n f_i^2}; \quad k = \frac{n \sum_{i=1}^n f_i^4 - (\sum_{i=1}^n f_i^2)^2}{\sum_{i=1}^n f_i^2 \sum_{i=1}^n x_i f_i^2 - \sum_{i=1}^n f_i^4 \sum_{i=1}^n x_i}.$$

There are two most perspective ways of putting the loadcell into practice. The way of calculating the natural frequency of the diamond plate f_m for both was represented in the study [31]. One of them is the fastening as the strut with vertical axial load applied. The formula for calculating for this case is

$$f_m = \sqrt{\frac{EI\left(\frac{\pi}{l}\right)^2 - S}{ml}},$$

here I – second moment of area, E – Young's modulus or elastic modulus, l – length, m – mass, S – vertical axial load.

The second one is more common. The plate in this case has two free edges and fixed two other edges (see Figure 7).

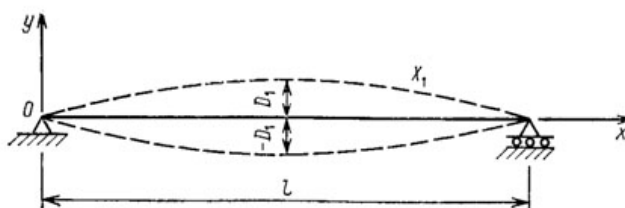


Fig. 7. Oscillation diagram of a plate with two clamped ends (fixed and movable)

The shape of curves which describe the deflections of the beam can be calculated using the formula $X_i = D_i \sin\left(\frac{i\pi x}{l}\right)$, here i – the serial number of the harmonic. Figure 8 [31] represents different variants of sine wave vibrations of the beam.

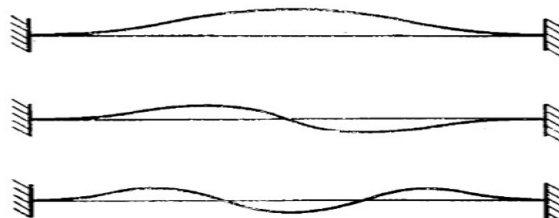


Fig. 8. The variants of sine wave vibrations of the beam

The method of calculating the sensor consists in following. The first step is to estimate appropriate dimensions. We chose the rectangular cross section beam $a \times b$ with $a = 1 \cdot 10^{-4}$ m, $b = 5 \cdot 10^{-4}$ m

respectively. Second moment of area in this case $I = \frac{a \cdot b^3}{12}$. The formula [31] is used to calculate the lowest, or fundamental, natural frequency of a free beam which is simply supported at each end according to

$$\omega = \sqrt{\frac{48EIg}{ml^3}} = \sqrt{\frac{48EIg}{v\rho l^3}},$$

here $E = 1.2 \cdot 10^{12}$ Pa, Young's modulus of diamond; $g \approx 9.81$ m/s², acceleration of gravity; l – length, m – mass, $\rho = 3.51 \cdot 10^3$ kg/m³ specific density of diamond.

The frequency range where the energy gap was detected is

from $\frac{\omega_1}{2\pi} = 1 \cdot 10^6$ Hz to $\frac{\omega_2}{2\pi} = 4 \cdot 10^6$ Hz.

Thus, l for this case is from $2.2 \cdot 10^{-3}$ m to $4.3 \cdot 10^{-3}$ m.

The next step is calculating the exact length of the loadcell for the right measurement range of strength. In accordance with the classical theory [31], the beam which is fastened at each end, changes its natural frequency under stress.

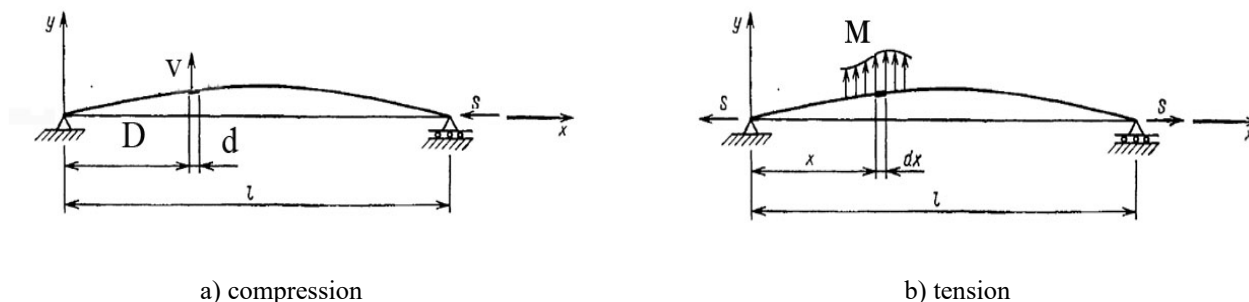


Fig. 9. Forces acting on the plate

The natural frequency of the beam reduces under compression and increases under tensile (see Figure 9). The differential equation for the curve of deflection of the beam under tensile force is

$$EI \frac{d^2 y}{dx^2} = M + Sy,$$

where M is the moment of deflection.

The solution of differential equation is $Y = X(A \cdot \cos(\omega t) + B \cdot \sin(\omega t))$, where X is the orthogonal function, Y is the movement; $A_i = \frac{2}{l} \int_0^l f_1(x) \sin \frac{i\pi x}{l} dx$, where $f_1(x)$ – distribution function of the initial cross travel; $B_i = \frac{2}{l\omega_i} \int_0^l f_2(x) \sin \frac{i\pi x}{l} dx$, where $f_2(x)$ – distribution function of the initial velocities;

natural frequency ω of the beam under compression stress is $\omega = \frac{\pi^2 4a}{l^2} \sqrt{1 - \frac{Sl^2}{4E\pi^2 I}}$, $a = \sqrt{\frac{EI}{F\rho}}$, where F is cross-sectional area of the beam, S – compressive force.

Thus we calculate the range of measuring force for the sensor which length is $l = 2 \cdot 10^{-3}$ m and the rectangular cross section beam $a \times b$ with $a = 1 \cdot 10^{-4}$ m, $b = 5 \cdot 10^{-4}$ m respectively. The frequency range is of $\frac{\omega_1}{2\pi} = 10^6$ Hz to $\frac{\omega_2}{2\pi} = 4 \cdot 10^6$ Hz.

If we assume that $b = \frac{\pi^2 4a}{l^2}$ and $= \frac{l^2}{4E\pi^2 I}$, then $S = \frac{1 - \frac{\omega^2}{c}}{c}$.

Thus for the compression force $S = 1.11 \cdot 10^3$ N the natural frequency is $\frac{\omega_1}{2\pi} = 4 \cdot 10^6$ Hz and for the compression force $S = 1.16 \cdot 10^4$ N the natural frequency is $\frac{\omega_1}{2\pi} = 10^6$ Hz.

Sensor, which is resonantly driven at frequency ω by a piezo-element, should make a strike to the beam in initial time in order to start operating.

On Figure 9 d is the short part of the beam that has an initial velocity V . In that case $f_1(x) = 0$ and $f_2(x) = 0$ everywhere except $x = D$, $f_2(D) = V$.

Thus

$A_i = 0$; $B_i = \frac{2Vd}{l\omega_i} \sin \frac{i\pi d}{l}$; here i is a serial number of the harmonic.

$y = \frac{2vd}{l} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{\omega_i} \sin \frac{i\pi x}{l} \sin \frac{i\pi D}{l} \sin \omega_i t$, here t is time.

For the piezo-element which was fastened to the middle of the sensor

$$D = \frac{l}{2},$$

The equation for the movement is

$$y = \frac{2vd}{l} \left(\frac{1}{\omega_1} \sin \frac{\pi x}{l} \sin \omega_1 t - \frac{1}{\omega_3} \sin \frac{3\pi x}{l} \sin \omega_3 t + \frac{1}{\omega_5} \sin \frac{5\pi x}{l} \sin \omega_5 t - \dots \right).$$

Static characteristic of the loadcell is now hardly predictable in case of fastening the exciting piezo-element on the free end of the beam not to the middle, as it was done during research [26].

CONCLUSION

The article presents a new approach to the construction of miniature sensors based on quantum technologies. The calculations are given to show the possibility of physical implementation of vibration sensors based on a modified diamond plate.

This is the step-by-step approach to the development of non-demolish diagnosis quantum computer for complex technical systems. The represented approach illustrates the way of new technological level implementation in practice. The approach to the design of tension sensing element made of modified diamond allows us to use the achievement of quantum technologies in the new type of sensors. The authors used the well-known methods of theory of vibration sensors and mechanics of materials to show the way of engineering of quantum sensing element with NV center. The paper describes the loadcell which is the sensor of a new type.

The conventional theory makes the transition to the new technologies smooth and convenient. In this study the definition of the loadcell of new type has been provided. The dimensions of the loadcell of different shape and manner of fastening were calculated and listed in the article. The trouble occurrence was calculated and listed as well.

REFERENCES

1. Cîrstoiu, C., Holmes, Z. and Iosue, J. (2020). *Variational fast forwarding for quantum simulation beyond the coherence time*. NPJ Quantum Information, vol. 6, no. 82, p. 10. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41534-020-00302-0>
2. Cho, A. (2020). *IBM promises 1000-qubit quantum computer-a milestone-by 2023*. Science. 15 September. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abe8122> (accessed 19.09.2020).
3. Gorenshtein, I.A. (1976). *Gidrostatichnye chastotnyye datchiki pervichnoy informatsii* [Hydrostatic frequency sensors of primary information]. Moscow: Mashinostroyeniye, 182 p. (in Russian)

4. Arai, K., Lee, J., Belthangady, C., Glenn, D.R., Zhang, H. and Walsworth, R.L. (2018). *Geometric phase magnetometry using a solid-state spin*. Nature Communication 9, Article number: 4996. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-07489-z> (accessed 08.09.2020).
5. Craik, D.P.L.A., Kehayias, P., Greenspon, A.S. and others. (2018). *A microwave-assisted spectroscopy technique for determining charge state in nitrogen-vacancy ensembles in diamond*. arXiv.org. Available at: <https://arxiv.org/abs/1811.01972v1> (accessed 02.10.2020).
6. Bhallamudi, V. and Hammel, P. (2015). *Nanoscale MRI*. Nature Nanotechnology 10, pp. 104–106. DOI: <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.7> (accessed 08.10.2020).
7. Bucher, D.B., Glenn, D.R., Park, H., Lukin, M.D. and Walsworth, R.L. (2018). *Hyperpolarization-enhanced NMR spectroscopy with femtomole sensitivity using quantum defects in diam.* Physical Review X. DOI: 10.1103/PhysRevX.10.021053 (accessed 08.09.2020).
8. Casola, F., van der Sar, T. and Yacoby, A. (2018). *Probing condensed matter physics with magnetometry based on nitrogen-vacancy centres in diamond*. Nature Review Materials, vol. 3, Article number: 17088. Available at: <https://www.nature.com/articles/natrevmats201788> (accessed 08.09.2020).
9. Teeling-Smith, R.M., Jung, Y.W., Scozzaro, N. and others. (2016). *Electron paramagnetic resonance of a single nanodiamond attached to an individual biomolecule*. Biophysical Journal, vol. 110, issue 9, pp. 2044–2052. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2016.03.022>
10. Schloss, J.M., Barry, J.F., Turner, M.J. and Walsworth, R.L. (2018). *Simultaneous broadband vector magnetometry using solid-state spins*. Physical Review Applied, vol. 10, issue 3, pp. 034–044. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.10.034044>
11. Hopper, D.A., Shulevitz, H.J. and Bassett, L.C. (2018). *Spin readout techniques of the nitrogen-vacancy center in diamond*. Micromachines, vol. 9, issue 9, 437. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi9090437> (accessed 08.09.2020).
12. Fernández-Acebal, P., Rosolio, O., Scheuer, J. and others. (2018). *Toward hyperpolarization of oil molecules via single nitrogen vacancy centers in diamond*. Nano Lett, vol. 18, no. 3, pp. 1882–1887. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b05175>
13. Jaskula, J.-C., Shields, B.J., Bauch, E., Lukin, M.D., Trifonov, A.S. and Walsworth, R.L. (2019). *Improved quantum sensing with a single solid-state spin via spin-to-charge conversion*. Physical Review Applied, vol. 11, issue 6. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.11.064003> (accessed 08.09.2020).
14. Marseglia, L., Saha, K., Ajoy, A. and others. (2018). *Bright nanowire single photon source based on siv centers in diamond*. Optics Express, vol. 26, issue 1, pp. 80–89. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.26.000080> (accessed 08.09.2020).
15. Ohtsu, M. (2012). *Dressed photon technology*. Nanophotonics, vol. 1, issue 1, pp. 83–97. DOI: <https://doi.org/10.1515/nanoph-2011-0001> (accessed 08.09.2020).
16. Jia, W., Shi, Z., Qin, X., Rong, X. and Du, J. (2018). *Ultra-broadband coplanar waveguide for optically detected magnetic resonance of nitrogen-vacancy centers in diamond*. Review of Scientific Instruments, vol. 89, issue 6. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5028335> (accessed 08.09.2020).
17. Wolfe, C.S., Manuilov, S.A., Purser, C.M., Teeling-Smith, R., Dubs, C., Hammel, P.C. and Bhallamudi, V.P. (2016). *Spatially resolved detection of complex ferromagnetic dynamics using optically detected nitrogen-vacancy spins*. Applied Physics Letters, vol. 108, issue 23. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4953108> (accessed 08.09.2020).
18. Tang, H., Ahmed, I., Puttapirat, P. and other. (2018). *Investigation of multi-bunching by generating multi-order fluorescence of NV center in diamond*. Physical Chemistry Chemical Physics, vol. 20, issue 8, pp. 5721–5725. DOI: <https://doi.org/10.1039/C7CP08005K> (accessed 08.09.2020).
19. Labanowski, D., Bhallamudi, V.P., Guo, Q., Purser, C.M. and McCullian, B.A. (2018). *Voltage-driven, local, and efficient excitation of nitrogen-vacancy centers in diamond*. Science Advances, vol. 4, no. 9. 6 p. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat6574> (accessed 08.09.2020).

20. Chrostoski, P., Sadeghpour, H.R. and Santamore, D.H. (2018). *Electric noise spectra of a near-surface nitrogen-vacancy center in diamond with a protective layer*. Physical Review Applied, vol. 10, issue 6. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.10.064056> (accessed 08.09.2020).
21. Murai, T., Makino, T., Kato, H. and other. (2018). *Engineering of fermi level by nin diamond junction for control of charge states of NV centers*. Applied Physics Letters, vol. 112, issue 11. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5010956> (accessed 08.09.2020).
22. Subedi, S.D., Fedorov, V.V., Peppers, J., Martyshkin, D.V., Mirov, S.B., Shao, L. and Loncar, M. (2018). *Laser spectroscopy of highly doped NV-centers in diamond*. Proceedings SPIE, vol. 10511, Solid State Lasers XXVII: Technology and Devices, 105112D DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2290705> (accessed 08.09.2020).
23. Sjolander, T.F., Tayler, M.C.D., Kentner, A., Budker, D. and Pines, A. (2017). *13C-Decoupled J-coupling spectroscopy using two-dimensional nuclear magnetic resonance at zero-field*. The Journal of Physical Chemistry Letters, vol. 8, issue 7, pp. 1512–1516. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcllett.7b00349> (accessed 08.09.2020).
24. Udvarhelyi, P., Shkolnikov, V.O., Gali, A., Burkard, G. and Pályi, A. (2018). *Spin-strain interaction in nitrogen-vacancy centers in diamond*. Physical Review B, vol. 98, issue 7, 075201. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.98.075201> (accessed 08.09.2020).
25. Zhang, H., Ku, M.J.H., Casola, F. and others. (2020). *Spin-torque oscillation in a magnetic insulator probed by a single-spin sensor*. Physical Review B, vol. 102, issue 2, 024404. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.102.024404> (accessed 08.09.2020).
26. Barfuss, A., Teissier, J., Neu, E.A. Nunnenkamp, E.A. and Maletinsky, P. (2015). *Strong mechanical driving of a single electron spin*. Nature Physics, vol. 11, pp. 820–824. DOI: <https://doi.org/10.1038/nphys3411> (accessed 08.09.2020).
27. Delaney, P., Greer, J.C. and Larsson, J.A. (2010). *Spin-polarization mechanisms of the nitrogen-vacancy center in diamond*. Nano Letters, vol. 10, issue 2, pp. 610–614. DOI: <https://doi.org/10.1021/nl903646p> (accessed 08.09.2020).
28. Zhu, X., Saito, S., Kemp, A. and other. (2011). *Coherent coupling of a superconducting flux qubit to an electron spin ensemble in diamond*. Nature, vol. 478, pp. 221–224. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature10462> (accessed 08.09.2020).
29. Liu, G.-Q. and Pan, X.-Y. (2018). *Quantum information processing with nitrogen-vacancy centers in diamond*. Chinese Physics B, vol. 27, no. 2. DOI: <https://doi.org/10.1088/1674-1056/27/2/020304> (accessed 08.09.2020).
30. Volkov, D.I. and Proskuryakov, S.D. (2016). *Ultrasonic method of quality control of the cutting plates from supersolid materials*. Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk, vol. 18, no. 1-2, pp. 166–169. (in Russian)
31. Timoshenko, S. (1937). *Vibration Problems in Engineering*. D.N.Y., Van Nostrand Company, Inc., 470 p. Available at: <https://archive.org/details/vibrationproblem031611mbp/mode/2up> (accessed 02.10.2020)

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Sergey V. Dianov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Moscow State Technical University of Civil Aviation, tehnomat@ya.ru

Vadim M. Novichkov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Moscow Aviation Institute (National Research University), v13217@ya.ru

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ ДАТЧИКА МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ИЗ МОДИФИЦИРОВАННОГО АЛМАЗА

С.В. Дианов¹, В.М. Новичков²

¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский
университет), г. Москва, Россия

Решение современных и перспективных задач, решаемых робототехническими устройствами, которые управляются с помощью искусственного интеллекта, требует применения малогабаритных измерительных приборов. В этом случае хорошую перспективу имеют интенсивно разрабатываемые квантовые датчики и квантовые компьютеры. Главным преимуществом квантовых технологий является возможность обработки данных случайных процессов с разложением сложных функций на простые множители при малом размере квантовых устройств и возможности передачи данных на большие расстояния без проводов. Особенность состоит в том, что данные, передаваемые по квантовым линиям связи, не могут быть скопированы или перехвачены, что очень полезно для дистанционного управления сложными техническими системами. Квантовый компьютер способен успешно обрабатывать большой объём вероятностных зашумлённых данных так, что это его свойство может быть полезно для быстрого получения оценки технического состояния сложной системы. Это связано с тем, что пропадает необходимость перебирать все возможные решения задачи оценки с огромным объёмом входных данных, некоторые из которых могут быть явно не определены. Основная проблема в исследовании квантовых процессов заключается в том, что исследователи изучают процессы, происходящие в материалах, но они не указывают способы, которыми квантовые датчики могут быть применены в инженерной практике. В данной статье демонстрируется, как сформировать измерительный преобразователь, основанный на квантовых технологиях и который совместим как с квантовым, так и с традиционным современным вычислителем. Основной целью исследования явилось приближение результатов фундаментальных исследований в области квантовых технологий к их применению в прикладных задачах. Показано, как квантовые процессы могут быть перенесены в область технических измерений физических величин, используемых в сложных системах для получения информации о состоянии её нагруженных элементов. В процессе получения результатов использовались гипотетико дедуктивный метод и метод восхождения от абстрактного к конкретному в рамках системного подхода к разработке элементов технических систем. Результатом работы является описание процессов, проходящих в чувствительном элементе, воспринимающем напряжённость конструкции и созданном из модифицированного алмаза. Модифицированный алмаз с NV центром служит основой для генераторного датчика. Основной вывод исследования состоит в том, что квантовые датчики, реализованные на основе модифицированного алмаза, хорошо описываются теорией измерительных преобразователей с частотным выходом и могут быть использованы для получения данных о состоянии объекта, как функции от напряжённости элементов его конструкции.

Ключевые слова: чувствительный элемент, NV центр, квантовый датчик, частотный датчик, измерительный канал, преобразователь с частотным выходом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cîrstoiu C., Holmes Z., Iosue J. Variational fast forwarding for quantum simulation beyond the coherence time // NPJ Quantum Information. 2020. Vol. 6, no. 82. P. 10. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41534-020-00302-0>
2. Cho, A. IBM promises 1000-qubit quantum computer-a milestone-by 2023 [Электронный ресурс] // Science. 15 September 2020. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.abe8122> (дата обращения 19.09.2020).
3. Горенштейн И.А. Гидростатические частотные датчики первичной информации. М.: Машиностроение, 1976. 182 с.
4. Arai K. Geometric phase magnetometry using a solid-state spin [Электронный ресурс] / K. Arai, J. Lee, C. Belthangady, D.R. Glenn, H. Zhang, R.L. Walsworth // Nature Communications 9, Article number: 4996. DOI: 10.1038/s41467-018-07489-z (дата обращения 08.09.2020).
5. Craik D.P.L.A., Kehayias P., Greenspon A.S. и др. A microwave-assisted spectroscopy technique for determining charge state in nitrogen-vacancy ensembles in diamond [Электронный ресурс] // arXiv.org. URL: <https://arxiv.org/abs/1811.01972v1> (дата обращения 02.10.2020).

6. **Bhallamudi V., Hammel P.** Nanoscale MRI [Электронный ресурс] // *Nature Nanotechnology*. 2015. Vol. 10. Pp. 104–106. DOI: <https://doi.org/10.1038/nnano.2015.7> (дата обращения 08.10.2020).
7. **Bucher D.B.** Hyperpolarization-enhanced NMR spectroscopy with femtomole sensitivity using quantum defects in diamond / D.B. Bucher, D.R. Glenn, H. Park, M.D. Lukin, R.L. Walsworth // *Physical Review X*. DOI: 10.1103/PhysRevX.10.021053 (дата обращения 08.09.2020).
8. **Casola F., van der Sar T., Yacoby A.** Probing condensed matter physics with magnetometry based on nitrogen-vacancy centres in diamond [Электронный ресурс] // *Nature Review Materials*. 2018. Vol. 3. Article number: 17088. URL: <https://www.nature.com/articles/natrevmats201788> (дата обращения 08.09.2020).
9. **Teeling-Smith R.M., Jung Y.W., Scozzaro N. и др.** Electron paramagnetic resonance of a single nanodiamond attached to an individual biomolecule // *Biophysical Journal*. 2016. Vol. 110, iss. 9. Pp. 2044–2052. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2016.03.022>
10. **Schloss J.M.** Simultaneous broadband vector magnetometry using solid-state spins / J.M. Schloss, J.F. Barry, M.J. Turner, R.L. Walsworth // *Physical Review Applied*. 2018. Vol. 10, iss. 3. Pp. 034–044. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.10.034044>
11. **Hopper D.A., Shulevitz H.J., Bassett L.C.** Spin readout techniques of the nitrogen-vacancy center in diamond // *Micromachines*. 2018. Vol. 9, iss. 9. 437. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi9090437> (дата обращения 08.09.2020).
12. **Fernández-Acebal P., Rosolio O., Scheuer J. и др.** Toward hyperpolarization of oil molecules via single nitrogen vacancy centers in diamond // *Nano Lett.* 2018. Vol. 18, no. 3. Pp. 1882–1887. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.7b05175>
13. **Jaskula J.-C.** Improved quantum sensing with a single solid state spin via spin to charge conversion [Электронный ресурс] / J.-C. Jaskula, B.J. Shields, E. Bauch, M.D. Lukin, A.S. Trifonov, R.L. Walsworth // *Physical Review Applied*, vol. 11, iss. 6. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.11.064003> (дата обращения 08.09.2020).
14. **Marseglia L., Saha K., Ajoy A. и др.** Bright nanowire single photon source based on silicon centers in diamond [Электронный ресурс] // *Optics Express*. 2018. Vol. 26, iss. 1. Pp. 80–89. DOI: <https://doi.org/10.1364/OE.26.000080> (дата обращения 08.09.2020).
15. **Ohtsu M.** Dressed photon technology [Электронный ресурс] // *Nanophotonics*. 2012. Vol. 1, iss. 1. Pp. 83–97. DOI: <https://doi.org/10.1515/nanoph-2011-0001> (дата обращения 08.09.2020).
16. **Jia W.** Ultra-broadband coplanar waveguide for optically detected magnetic resonance of nitrogen-vacancy centers in diamond [Электронный ресурс] / W. Jia, Z. Shi, X. Qin, X. Rong, J. Du // *Review of Scientific Instruments*. 2018. Vol. 89, iss. 6. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5028335> (дата обращения 08.09.2020).
17. **Wolfe C.S.** Spatially resolved detection of complex ferromagnetic dynamics using optically detected nitrogen-vacancy spins [Электронный ресурс] / C.S. Wolfe, S.A. Manuilov, C.M. Purser, R. Teeling-Smith, C. Dubs, P.C. Hammel, V.P. Bhallamudi // *Applied Physics Letters*. 2016. Vol. 108, iss. 23. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4953108> (дата обращения 08.09.2020).
18. **Tang H., Ahmed I., Puttapirat P. и др.** (2018). Investigation of multi-bunching by generating multi-order fluorescence of NV center in diamond [Электронный ресурс] // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2018. Vol. 20, iss. 8. Pp. 5721–5725. DOI: <https://doi.org/10.1039/C7CP08005K> (дата обращения 08.09.2020).
19. **Labanowski D.** Voltage-driven, local, and efficient excitation of nitrogen-vacancy centers in diamond [Электронный ресурс] / D. Labanowski, V.P. Bhallamudi, Q. Guo, C.M. Purser, B.A. McCullian // *Science Advances*. 2018. Vol. 4, no. 9. 6 p. DOI: 10.1126/sciadv.aat6574 (дата обращения 08.09.2020).
20. **Chrostoski P., Sadeghpour H.R., Santamore D.H.** Electric noise spectra of a near-surface nitrogen-vacancy center in diamond with a protective layer [Электронный ресурс] // *Physical*

Review Applied. 2018. Vol. 10, iss. 6. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.10.064056> (дата обращения 08.09.2020).

21. Murai T., Makino T., Kato H. и др. Engineering of fermi level by nin diamond junction for control of charge states of NV centers [Электронный ресурс] // Applied Physics Letters. 2018. Vol. 112, iss. 11. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5010956> (дата обращения 08.09.2020).

22. Subedi S.D. Laser spectroscopy of highly doped NV-centers in diamond [Электронный ресурс] / S.D. Subedi, V.V. Fedorov, J. Peppers, D.V. Martyshkin, S.B. Mirov, L. Shao, M. Loncar // Proceedings SPIE, 2018. Vol. 10511. Solid State Lasers XXVII: Technology and Devices, 105112D. DOI: 10.1117/12.2290705 (дата обращения 08.09.2020).

23. Sjolander T.F. ¹³C-Decoupled J-coupling spectroscopy using two-dimensional nuclear magnetic resonance at zero-field [Электронный ресурс] / M.C.D. Tayer, A. Kentner, D. Budker, A. Pines // The Journal of Physical Chemistry Letters. 2017. Vol. 8, iss. 7. Pp. 1512–1516. DOI: 10.1021/acs.jpcclett.7b00349 (дата обращения 08.09.2020).

24. Udvarhelyi P. Spin-strain interaction in nitrogen-vacancy centers in diamond [Электронный ресурс] / V.O. Shkolnikov, A. Gali, G. Burkard, A. Pályi // Physical Review B. 2018. Vol. 98, iss. 7. 075201. DOI: 10.1103/PhysRevB.98.075201 (дата обращения 08.09.2020).

25. Zhang M.J.H., Ku F., Casola C.H. и др. Spin-torque oscillation in a magnetic insulator probed by a single-spin sensor [Электронный ресурс] // Physical Review B. 2020. Vol. 102, iss. 2. 024404. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.102.024404> (дата обращения 08.09.2020).

26. Barfuss A. Strong mechanical driving of a single electron spin [Электронный ресурс] / A. Barfuss, J. Teissier, E. Neu, A. Nunnenkamp, P. Maletinsky // Nature Physics. 2015. Vol. 11. Pp. 820–824. DOI: 10.1038/NPHYS3411 (дата обращения 08.09.2020).

27. Delaney P., Greer J.C., Larsson J.A. Spin-polarization mechanisms of the nitrogen-vacancy center in diamond [Электронный ресурс] // Nano Letters. 2010. Vol. 10, iss. 2. Pp 610–614. DOI: <https://doi.org/10.1021/nl903646p> (дата обращения 08.09.2020).

28. Zhu X., Saito S., Kemp A. и др. Coherent coupling of a superconducting flux qubit to an electron spin ensemble in diamond [Электронный ресурс] // Nature. 2011. Vol. 478. Pp. 221–224. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature10462> (дата обращения 08.09.2020).

29. Liu G.-Q., Pan X.-Y. Quantum information processing with nitrogen-vacancy centers in diamond [Электронный ресурс] // Chinese Physics B. 2018. Vol. 27, no. 2. DOI: <https://doi.org/10.1088/1674-1056/27/2/020304> (дата обращения 08.09.2020).

30. Волков Д.И., Проскуряков С.Л. Ультразвуковой метод контроля качества режущих пластин из сверхтвердых материалов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Том 18, № 1-2. С. 166–169.

31. Timoshenko S. Vibration Problems in Engineering [Электронный ресурс] // D. N.Y., Van Nostrand Company, Inc., 1937. 470 p. URL: <https://archive.org/details/vibrationproblem031611mbp/mode/2up> (дата обращения 02.10.2020).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Дианов Сергей Вячеславович, кандидат технических наук, доцент МГТУ ГА, tehnomat@ya.ru.

Новичков Вадим Михайлович, кандидат технических наук, доцент, доцент Московского авиационного института (национальный исследовательский университет), v13217@ya.ru.

Поступила в редакцию
Принята в печать

02.10.2020
26.11.2020

Received
Accepted for publication

02.10.2020
26.11.2020

УДК 629.735

DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-6-101-120

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНИЗАЦИИ СТРЕЛОВИДНОГО КРЫЛА

Ю.С. МИХАЙЛОВ¹

¹ *Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского,
г. Жуковский, Россия*

Для самолетов со стреловидными крыльями, совершающих полет на трансзвуковых скоростях, использование закрылков Фаулера и щелевых предкрылков является общепринятым решением увеличения подъемной силы крыла на режимах взлета и посадки. В литературе это решение известно как классический вариант механизации крыла. В настоящей работе представлены результаты численных и экспериментальных исследований некоторых решений, предназначенных для повышения эффективности классического варианта механизации. Концепция механизации задней кромки, именуемая «Адаптивный закрылок», рассмотрена как способ улучшения аэродинамических характеристик самолета на режимах взлета и посадки. Интеграция отклоняемого вниз спойлера с выдвижением закрылка позволяет повысить максимальный угол отклонения закрылка в посадочной конфигурации и значение коэффициента подъемной силы на линейном участке, соответственно. Во взлетной конфигурации увеличение аэродинамического качества возможно за счет уменьшения отклонения адаптивного закрылка при сохранении подъемной силы крыла. Для эффективной защиты передней кромки крыла от раннего отрыва потока на больших углах атаки использован щелевой щиток Крюгера удобообтекаемой геометрии. Предварительное проектирование усовершенствованного варианта механизации включало определение аэродинамической формы и положения механизации на режимах взлета и посадки. Аэродинамический анализ характеристик выполнен с использованием двумерных методов расчета высоконесущей системы в рамках осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. Проведено сравнение результатов проектирования классического и усовершенствованного вариантов механизации, показавшее преимущество последнего в аэродинамических характеристиках. Результаты весовых испытаний модели самолета с адаптивной механизацией задней кромки крыла в аэродинамической трубе подтвердили ее эффективность.

Ключевые слова: механизация крыла, адаптивный закрылок, щиток Крюгера, аэродинамическое проектирование, экспериментальные исследования.

ВВЕДЕНИЕ

Выбор геометрических параметров гражданских самолетов, совершающих полет с трансзвуковой скоростью, основывается на компромиссе между эффективностью крыла в крейсерском полете и на взлетно-посадочных режимах. На этапе предварительного проектирования ожидаемый рост веса, сложности и шума от увеличения эффективности механизации сопоставляется с выбором параметров компоновки крыла, обеспечивающих высокий уровень аэродинамических характеристик (АДХ) самолета в крейсерском полете. Большинство компромиссных решений приводит к интеграции механизации передней и задней кромок, включающей выдвижные предкрылки и закрылки [1]. Изменения массы самолета и, соответственно, крейсерского значения коэффициента подъемной силы, происходящие в процессе полета, компенсируются увеличением высоты полета. Также в процессе проектирования обеспечивается большая гибкость АДХ самолета, позволяющая избежать значительного увеличения расхода топлива на нерасчетных режимах полета.

Значительный прогресс, достигнутый в развитии вычислительных методов CFD для анализа и проектирования механизации, привел к существенному улучшению ее эффективности и разработке конфигураций с минимальной сложностью [2]. В литературе эти конфигурации, включающие выдвижной закрылок и предкрылок, известны как классический вариант механизации. Последующее удаление внутреннего (скоростного) элерона из размаха механизации задней кромки, проведенное впервые в компоновках крыла самолетов фирмы Эрбас Индастри, позволило исключить разрыв между внутренними и внешними секциями выдвинутого закрыл-

ка, что обеспечило увеличение коэффициента $C_{y_{\max}}$ в посадочной конфигурации до значения $C_{y_{\max}} \approx 3$ (самолет А320 [3]).

В настоящее время традиционные классические конфигурации механизации крыла достигли высокого уровня аэродинамического совершенства, и только малые улучшения их характеристик возможны в основном за счет изменения кинематики их выдвижения. Поэтому дальнейшее повышение эффективности механизации связано с пересмотром концепции ее проектирования при разработке новых самолетов.

Исследования, проведенные за прошедшие три десятилетия в гражданской авиации [4–6], показали возможности улучшения АДХ крыла как за счет использования различных устройств управления кривизной в крейсерском полете, так и повышения несущих свойств на взлетно-посадочных режимах. Общим подходом для большинства рассмотренных решений была разработка довольно сложных дополнительных устройств и систем управления к уже существующим в компоновке исходного крыла.

Основное внимание в ближайшее время будет сосредоточено на расширении функциональности механизации задней кромки с целью применения ее не только на режимах взлета и посадки, но и для адаптации геометрии сечений крыла в крейсерском полете. Хорошей альтернативой выдвижному предкрылку может стать щиток Крюгера удобообтекаемой геометрии, выдвигаемый с нижней поверхности носка крыла с формированием профилированной щели. Отсутствие отрыва потока с нижней поверхности щитка, наблюдаемое у выдвижного предкрылка, способствует повышению эффективности механизации на взлетно-посадочных режимах полета.

Успешные летные испытания multifunctional минищитков по задней кромке закрылков показали возможность улучшения АДХ самолета на нерасчетных режимах крейсерского полета [7]. Однако их использование требует применения дополнительной системы приводов, которая должна быть заложена в проект самолета на начальном этапе его разработки. Как и в ряде случаев было показано, что полученные преимущества в крейсерском полете не всегда адекватны усложнению конструкции крыла и систем управления, а также увеличению взлетной массы самолета.

Более конструктивным решением может стать комплексный подход к использованию закрылков как на взлетно-посадочных режимах полета, так и в условиях крейсерского полета для управления характеристиками крыла и распределением нагрузки по размаху за счет локального изменения кривизны. Ключевым элементом в расширении функциональности механизации задней кромки является интеграция отклоняемого вниз спойлера с выдвижением или поворотом одноцелевых закрылков [8].

ОБЗОР РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МЕХАНИЗАЦИИ В КОМПОНОВКАХ ПРЯМЫХ И СТРЕЛОВИДНЫХ КРЫЛЬЕВ

В ЦАГИ в период с 1971 г. по 1993 г. был проведен большой объем экспериментальных исследований различных вариантов механизации [6], предназначенной для компоновок стреловидных крыльев со сверхкритическими профилями с уплощенной геометрией верхней поверхности. Основное внимание в этих исследованиях было уделено повышению эффективности механизации передней и задней кромок с целью компенсации потерь в подъемной силе крыла от применения сверхкритических профилей. Результаты исследования некоторых вариантов механизации, которые актуальны и в настоящее время, приведены ниже.

Предкрылок усовершенствованной формы

Применяемые в настоящее время в компоновках крыла выдвижные предкрылки имеют далеко не оптимальную форму с точки зрения несущих свойств и сопротивления. Малая кривизна средней линии и наличие острого выступа («зуба») на нижней поверхности не позволяют

обеспечить высокие значения $C_{y_{max}}$ в посадочной конфигурации и повышенный уровень аэродинамического качества на взлете.

Ниже приведены результаты сравнения эффективности предкрылка усовершенствованной формы ($\epsilon_{пр}=13\%$) и обычного предкрылка ($\epsilon_{пр}=15\%$) в компоновке прямого крыла со сверхкритическим профилем ($\epsilon=9\%$) и отклоненной механизацией задней кромки (рис. 1).

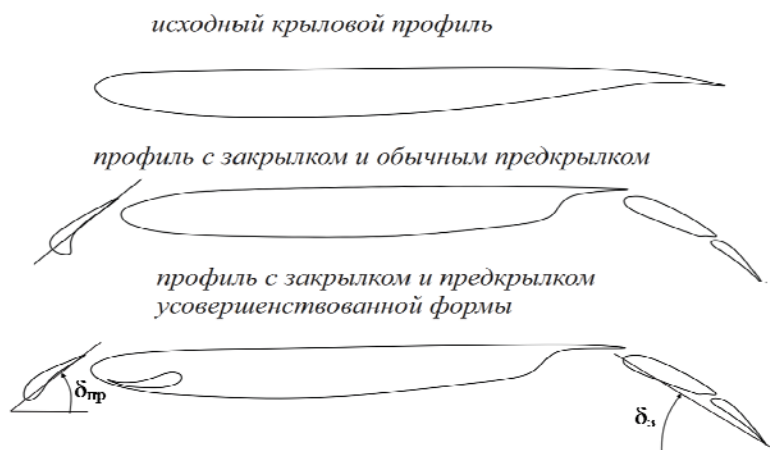


Рис. 1. Геометрия механизированного сечения крыла с двумя вариантами предкрылка
Fig. 1. High-lift devices geometry of wing cross- section

Одной из особенностей применения предкрылка усовершенствованной формы в качестве элемента механизации передней кромки является кинематика его выдвижения из убранного положения в рабочее и наоборот. В крейсерском положении предкрылок убран в нишу, расположенную в носовой части нижней поверхности сечения крыла (рис. 2, положение 1). После подачи команды на его выдвижение предкрылок совершает вращательное движение относительно неподвижной оси вращения, расположенной в носовой части крыла. В некотором отношении такой процесс выдвижения предкрылка сходен с отклонением простого щитка Крюгера: и там, и здесь — вращательное движение. Выбор соответствующего положения предкрылка в крейсерской конфигурации и его оси вращения позволяет сформировать профилированную щель в носовой части крыла на режимах взлета и посадки. Удобообтекаемая форма предкрылка в сочетании с профилированной щелью оказывают благоприятное влияние на характеристики высококонесущей системы на больших углах атаки.

Положение предкрылка	$\delta_{пр}$	$d, \%$	$h_{щ}, \%$
1*	-179°		—
2	-131°	-0,28	1,0
3	-90°	-1,55	1,5
4	-40°	-1,0	2,0

* Предкрылок убран

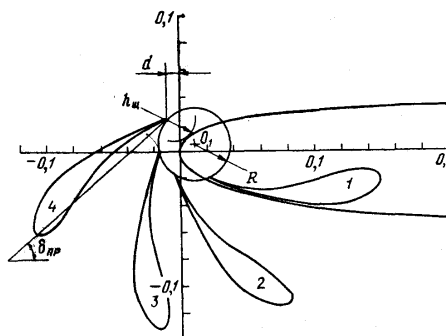


Рис. 2. Эскиз выдвижения предкрылка из убранного положения в расчетную позицию
Fig. 2. Sketch of a slat extension from retracted position to design station

Модель прямого крыла с эффективным удлинением $\lambda_{эф} \approx 5$ и механизацией, показанной на рис. 1, была испытана в малоскоростной аэродинамической трубе Т-102 ЦАГИ. Скорость набегающего потока в испытаниях составляла $V=40$ м/с, что соответствует числу Рейнольдса $Re = 1,1 \cdot 10^6$, вычисленному по хорде крыла $b = 0,4$ м.

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости $C_y = f(\alpha)$ и $m_z = f(\alpha)$ рассмотренных конфигураций механизации, включая убранное положение (исходный профиль), несколько углов отклонения двух вариантов предкрылка при наличии выдвинутой механизации задней кромки и вариант отклонения предкрылка усовершенствованной формы с убранном закрылке. Из этих зависимостей следует, что во всем диапазоне углов α и при всех значениях углов отклонения механизации ($\delta_{пр}$ и δ_3) подъемная сила крыла с предкрылком усовершенствованной формы выше, чем у крыла того же профиля с обычным предкрылком ($\Delta C_{y_{max}} = 0,1-0,3$). Улучшилось также протекание моментных характеристик $m_z = f(\alpha)$ в области околоскритических углов атаки.

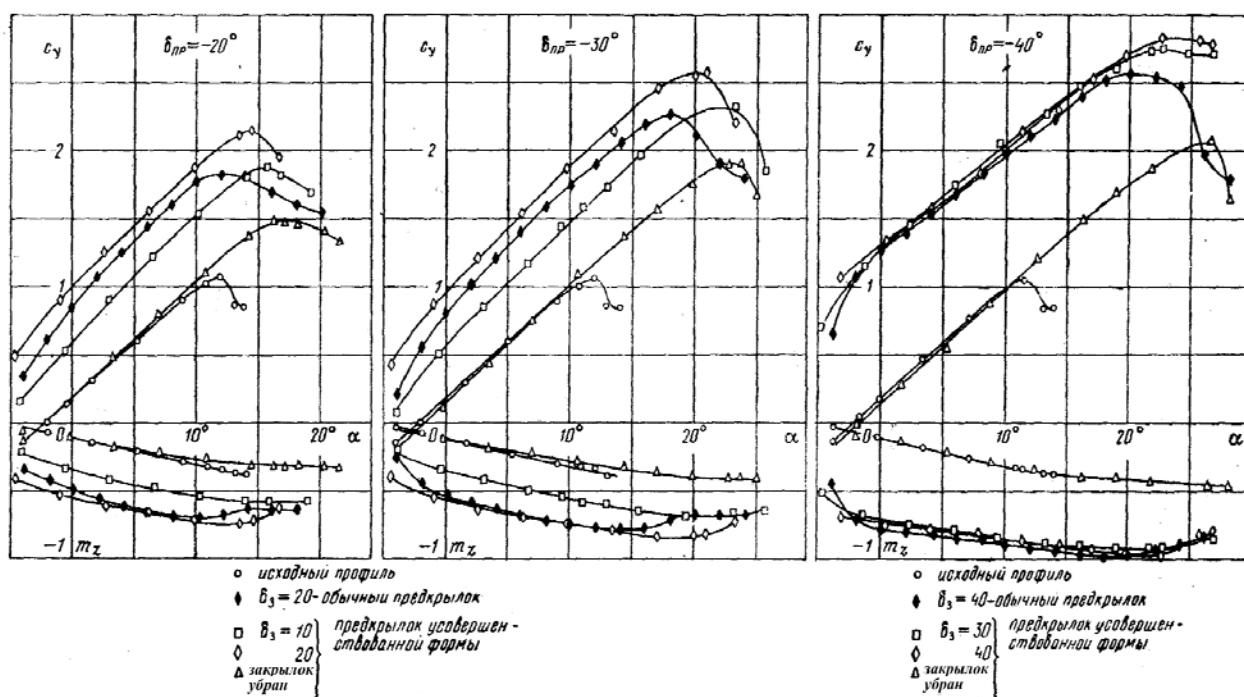


Рис. 3. Сравнение характеристик модели крыла с двумя вариантами геометрии предкрылка
Fig. 3. Comparison of wing model performance with two versions of slat geometry

Оценка эффективности предкрылка усовершенствованной формы в сравнении с обычным предкрылком по величине приращения коэффициента максимальной подъемной силы $\Delta C_{y_{max}}$ дополнена аналогичным сравнением величин аэродинамического качества K в зависимости от относительного расположения элементов механизированного крыла (рис. 4).

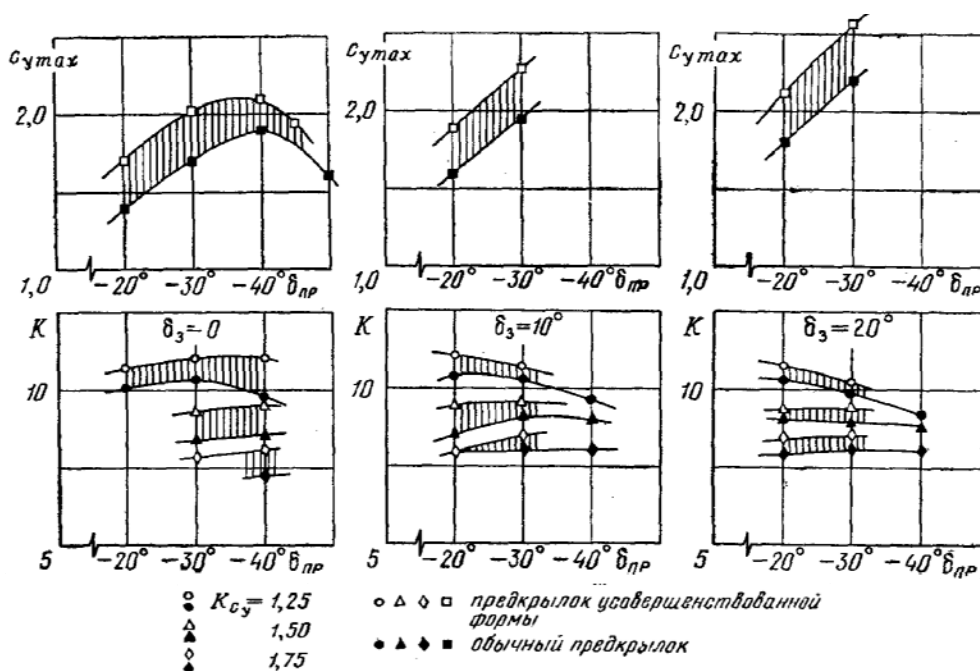


Рис. 4. Влияние геометрии предкрылка на $C_{y_{max}}$ и аэродинамическое качество
Fig. 4. Effect of slat geometry on maximum Cl and lift-to-drag ratio

Из сравнения кривых $K = f(C_y)$ для сходных комбинаций двух рассматриваемых вариантов предкрылка следует, что в диапазоне изменения коэффициента подъемной силы $C_y = 1,25 \div 1,75$ аэродинамическое качество механизированного крыла с предкрылком усовершенствованной формы заметно выше, чем у крыла с обычным предкрылком. Так, при $\delta_3 = 20^\circ$ приращение аэродинамического качества ΔK составляет 0,5 и $\Delta C_{y_{max}} \approx 0,3$ при этом сама величина коэффициента максимальной подъемной силы достигает значения 2,6. При меньших углах отклонения закрылка ($\delta_3 = 0-10^\circ$) приращение K оказывается еще большим: $\Delta K = 0,5 \div 1,3$ при такой же разнице в значениях коэффициентов максимальной подъемной силы ($\Delta C_{y_{max}} \approx 0,2 \div 0,3$).

Адаптивный закрылок

Большой цикл проведенных исследований механизации на прямоугольных крыльях в АДТ Т-102 показал, что эффективность закрылков на сверхкритических профилях первого поколения несколько меньше, чем на обычных профилях. Это обстоятельство обусловлено меньшей вогнутостью верхней поверхности новых профилей и, соответственно, меньшим скосом потока в области закрылка, ограничивающим максимальный угол его отклонения. Для повышения эффективности закрылка были предложены устройства, позволяющие увеличить кривизну хвостового участка основного профиля перед закрылком. Суть предложенной «врезной» механизации (Я.М. Серебрянский, А.В. Потапчик, Ю.Г. Степанов (1981 г.) [6]) состояла в том, что фиксированный, отогнутый вниз хвостовой участок основного крыла «врезался» в специальный паз на верхней поверхности закрылка. Такая механизация (рис. 5, а) обеспечила большее приращение подъемной силы, чем обычная ($\Delta C_{y_0} = 0,5$; $\Delta C_{y_{max}} = 0,3$ – прямое крыла с $\lambda_{эф} = 5$) за счет ликвидации или существенного ослабления отрыва пограничного слоя на верхней поверхности закрылка. Однако эта механизация могла быть настроена только на один режим полета, например, режим посадки.

Отмеченный недостаток отсутствует у механизации, у которой отгиб хвостовой части крыла вниз (отклонение спойлера) осуществляется одновременно с выдвижением закрылка в

рабочие положения. Усовершенствованный вариант механизация в дальнейшем был назван адаптивным (рис. 5, б), поскольку он обеспечивает наилучшие возможности для улучшения АДХ характеристик крыла на режимах взлета и посадки.

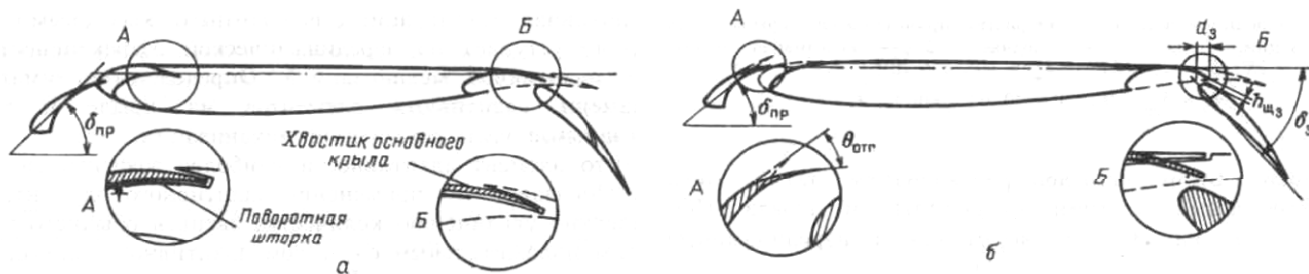


Рис. 5. «Врезная» и адаптивная механизация крыла
Fig. 5. "Cutting-in" and adaptive high-lift devices

В работе [6] было показано, что отгиб хвостовой части крыла наиболее эффективен в комбинации с однощелевым закрылком (рис. 6), где его применение эквивалентно увеличению количества звеньев обычного закрылка на одно звено.

Положительные результаты исследования адаптивной механизации на моделях прямоугольных крыльев в АДТ подтвердились в испытаниях полных компоновок моделей самолетов различного назначения. Испытания на модели магистрального пассажирского самолета типа Ил-96, проведенные в АДТ переменной плотности ($M = 0,2$; $Re = 4,1 \cdot 10^6$), показали, что отклонение хвостового участка крыла перед двухщелевым выдвижным закрылком существенно повышает уровень несущих свойств крыла в посадочной конфигурации по сравнению с обычным закрылком (рис. 7). Дополнительное приращение подъемной силы крыла от отклонения адаптивного закрылка на режиме взлета может быть частично «разменено» на увеличение аэродинамического качества за счет отклонения закрылка на меньший угол.

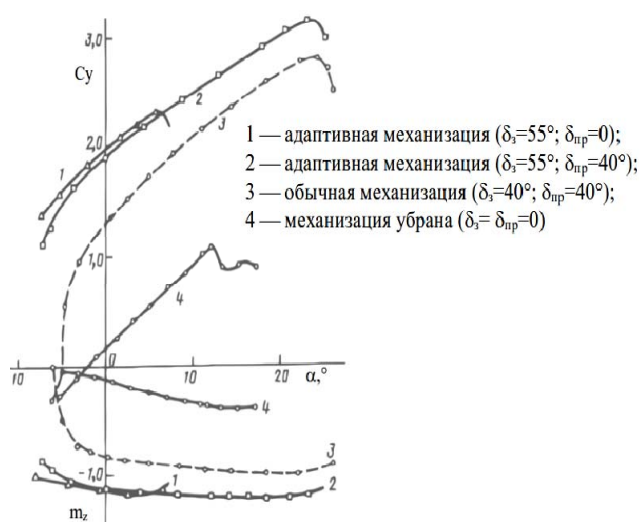


Рис. 6. Влияние адаптивного закрылка на несущие свойства крыла ($M = 0,13$; $Re = 1,1 \cdot 10^6$; $\lambda_{эф} = 5$)

Fig. 6. Effect of adaptive flap on wing lift performance ($M = 0,13$; $Re = 1,1 \cdot 10^6$; $\lambda_{ef} = 5$)

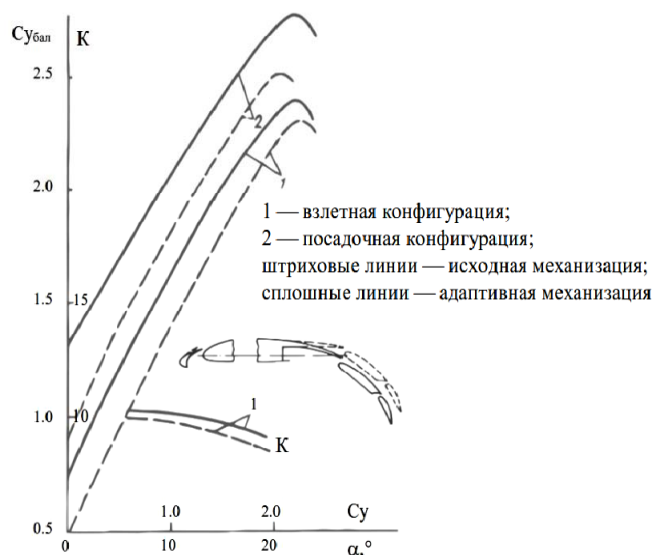


Рис. 7. Влияние адаптивного закрылка на характеристики модели самолета Ил-96

Fig. 7. Effect of adaptive flap on performance of Il-96 aircraft model

Адаптивная взлетно-посадочная механизация, примененная в компоновке крыла палубного истребителя Су-27К, показала заметное преимущество в АДХ по сравнению с обычной механизацией.

КОНЦЕПЦИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНИЗАЦИИ

Адаптивный вариант механизации задней кромки, включающий интеграцию отклоняемых вниз на малые углы спойлеров с функцией поворота закрылка, успешно апробирован в летных испытаниях и применяется в компоновках крыла новых дальних магистральных самолетов (ДМС) Boeing B787 [8] и Airbus A350XWB [9]. Отклонение вниз спойлеров обеспечивает как предварительный поворот потока перед закрылком, так и регулировку щели между задней кромкой основной части крыла и носком закрылка для всех рабочих положений, включая малые углы отклонения. Достигнутое при этом существенное снижение системной сложности механизации задней кромки сопровождается потерей несущих свойств крыла на режимах взлета и посадки по сравнению с классическим вариантом механизации задней кромки (закрылок Фаулера). Поэтому использованный подход к снижению сложности механизации, по-видимому, будет иметь ограниченное применение, преимущественно в компоновках крыла ДМС, базирующихся на внеклассовых аэродромах с длиной взлетно-посадочной полосы $L_{впп} \geq 3200$ м.

Снижение несущих свойств сечения крыла с адаптивным закрылком (ASHF) по сравнению с закрылком Фаулера (SSF), наблюдаемое на больших углах атаки (рис. 8), обусловлено в основном недостаточной эффективностью используемой механизации передней кромки. Экстремальные условия обтекания предкрылка, вызванные повышением эффективности механизации задней кромки, обуславливают снижение несущих свойств сечения крыла на больших углах атаки.

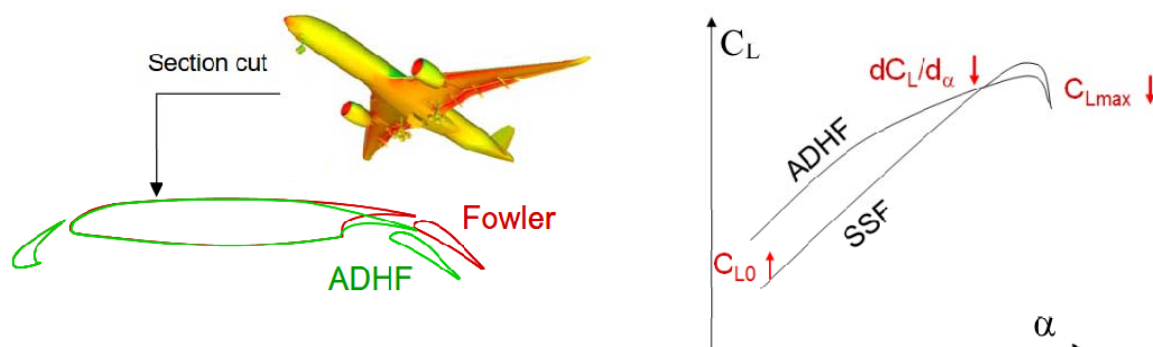


Рис. 8. Влияние отклонения спойлера и увеличения угла отклонения закрылка на поведение зависимости $C_y(\alpha)$ [5]

Fig. 8. Effect of applying spoiler droop and higher angle of flap deflection on lift curve [5]

Таким образом, повышение значений $C_{y_{max}}$ на режиме посадки требует комплексного подхода к одновременному увеличению эффективности механизации задней и передней кромок крыла. Возможным решением, рассмотренным в данной работе, является интеграция отклоняемого вниз спойлера с функцией выдвижения закрылка, а также применение щелевого щитка Крюгера удобообтекаемой формы вместо выдвижного предкрылка.

Снижение сопротивления крыла с адаптивным закрылком при сохранении несущих свойств крыла на режиме взлета, как было показано в приведенном обзоре, может быть обеспечено двумя способами. Во-первых, за счет отклонения закрылка на меньший угол (см. рис. 7). Во-вторых, в результате применения щитка Крюгера вместо выдвижного предкрылка (см. рис. 4 – предкрылок усовершенствованной формы).

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕХАНИЗАЦИИ

Процесс проектирования механизации крыла включает как выбор типа и геометрии механизации, так и определение ее положения на взлетно-посадочных режимах полета. Эффективность рассматриваемых вариантов механизации на начальном этапе проектирования обычно оценивается с помощью методов вычислительной динамики жидкости (CFD) в двумерной постановке. Результаты моделирования вязкого обтекания в рамках осредненных по числу Рейнольдса уравнений Навье-Стокса (RANS) позволяют выбрать лучшую конфигурацию для последующего детального исследования АДХ в полной компоновке крыла. Сравнение результатов применения 2D RANS методов для проектирования механизации крыла с экспериментальными данными, приведенное в работе [10], подтвердило их способность качественно предсказывать эффективность различных концепций механизации в линейном диапазоне поведения путем сравнения характеристик, полученных в равных условиях обтекания.

В данной работе расчетная оценка эффективности двух вариантов механизации в одном характерном сечении крыла выполнена на основании результатов расчета стационарного обтекания сечения крыла потоком вязкого сжимаемого газа в рамках RANS. Используемая модель среды – совершенный газ, для замыкания системы уравнений использована однопараметрическая модель турбулентности Spalart-Allmaras. С целью сокращения числа ячеек применена композитная конфигурация расчетных сеток: неструктурированная в ближнем поле и структурированная в дальнем. Внешняя граница ближнего поля имела форму эллипса, дальнего – окружность с радиусом, равным 20 хордам профиля с убранной механизацией.

Апробация использованного подхода к расчету АДХ проведена на результатах испытаний четырехэлементной конфигурации NASA [11], включающей предкрылок с хордой $\bar{b}_{пр} \approx 15.6\%$ и раздвижной двухщелевой закрылок с хордой первого звена $\bar{b}_{з1} \approx 15\%$ и второго $\bar{b}_{з2} \approx 29.6\%$ (рис. 9). Предкрылок отклонен на угол $\delta_{пр} = 47.2^\circ$, первое звено закрылка – на угол $\delta_{з1} = 30^\circ$, второе – на угол $\delta_{з2} = 49.7^\circ$ относительно исходной хорды профиля. Испытания проведены в специальной АДТ (BRWT) фирмы Боинг, предназначенной для исследования АДХ высоконесущих конфигураций в плоском потоке.

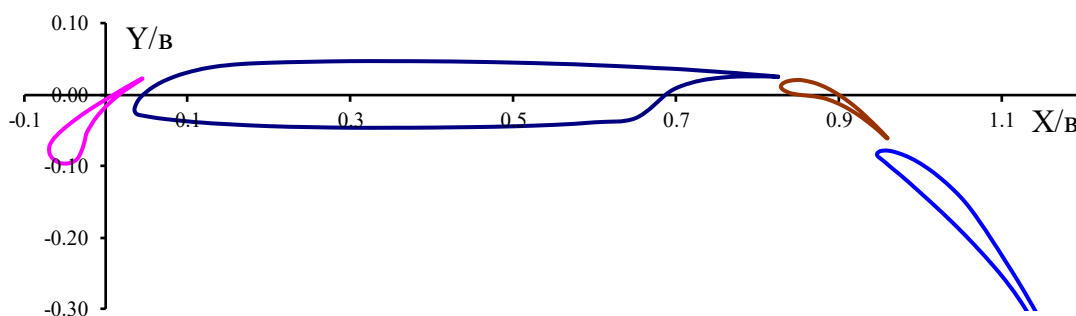


Рис. 9. Четырехэлементная конфигурация механизации профиля [9]
Fig. 9. High-lift system configuration of four-element airfoil [9]

Расчеты обтекания механизированного профиля для числа $M = 0.2$ и Рейнольдса $Re = 2.83 \times 10^6$ проведены в диапазоне углов атаки $\alpha = -12 \div 17^\circ$. Сравнение результатов расчетов распределения давления и суммарных характеристик с экспериментальными данными показано на рис. 10. В целом получено удовлетворительное согласование распределенных и суммарных АДХ, за исключением сопротивления при значениях $C_y > 3.5$.

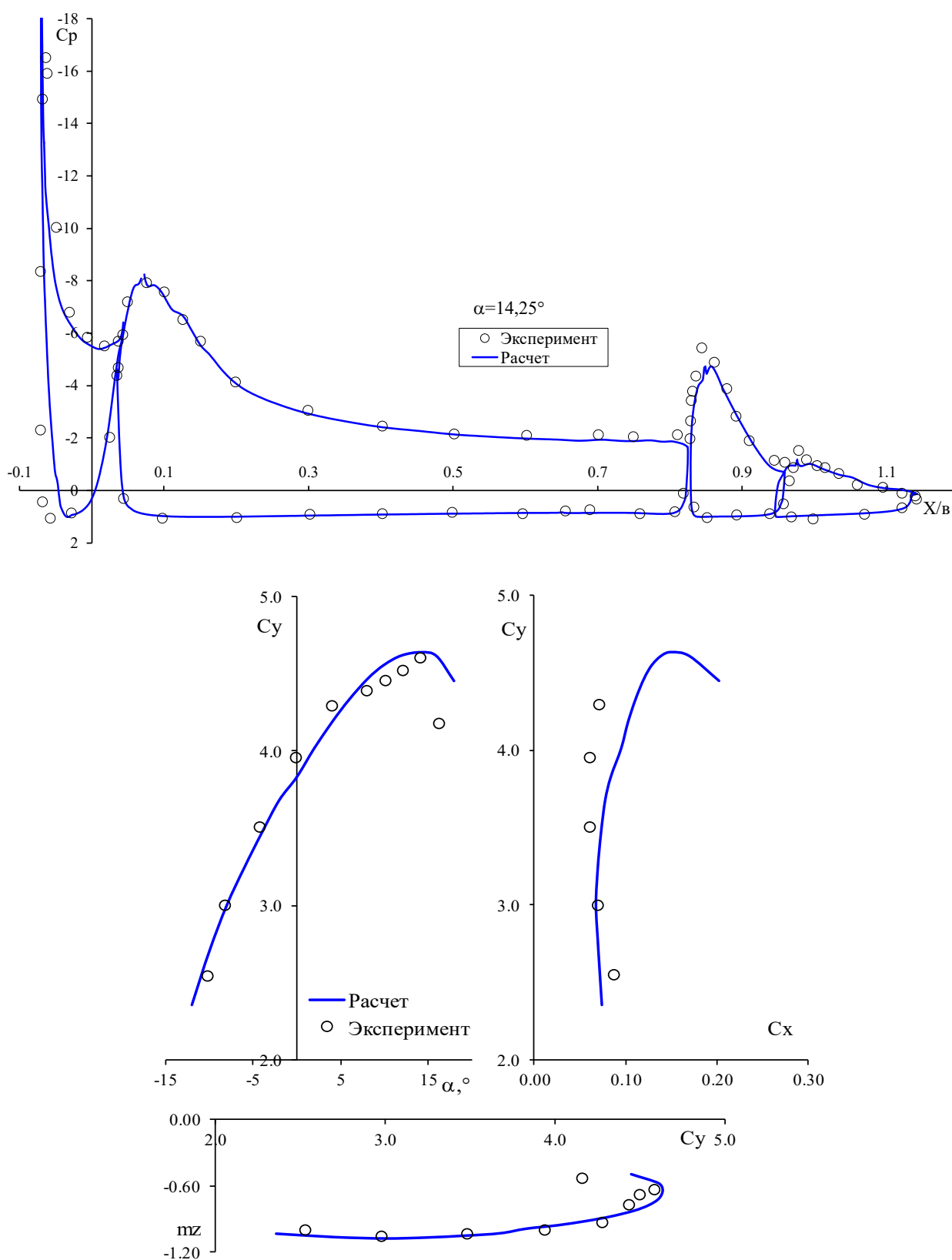


Рис. 10. Сравнение расчетных и экспериментальных характеристик многоэлементного профиля
Fig. 10. Comparison between wind tunnel testing and computed results of Multi-element airfoil

ГЕОМЕТРИЯ СЕЧЕНИЯ КРЫЛА С ДВУМЯ ВАРИАНТАМИ МЕХАНИЗАЦИИ

Проектирование механизации начинается с формирования геометрии сечений крыла с механизацией. В работе рассмотрено одно характерное сечение, расположенное в изломе по задней кромке крыла (рис. 11, а). Исходный (классический) вариант механизации (рис. 11, б, в) включает предкрылок с хордой 11.9% и выдвижной закрылок типа Фаулера с хордой 25.2%. Рассмотренная трехэлементная конфигурация характеризуется умеренными углами отклонения предкрылка ($\delta_{пр} = 15$ и 20°) и закрылка ($\delta_3 = 18^\circ$) во взлетной конфигурации и углами $\delta_{пр} = 25^\circ$ и $\delta_3 = 36^\circ$ в посадочной конфигурации.

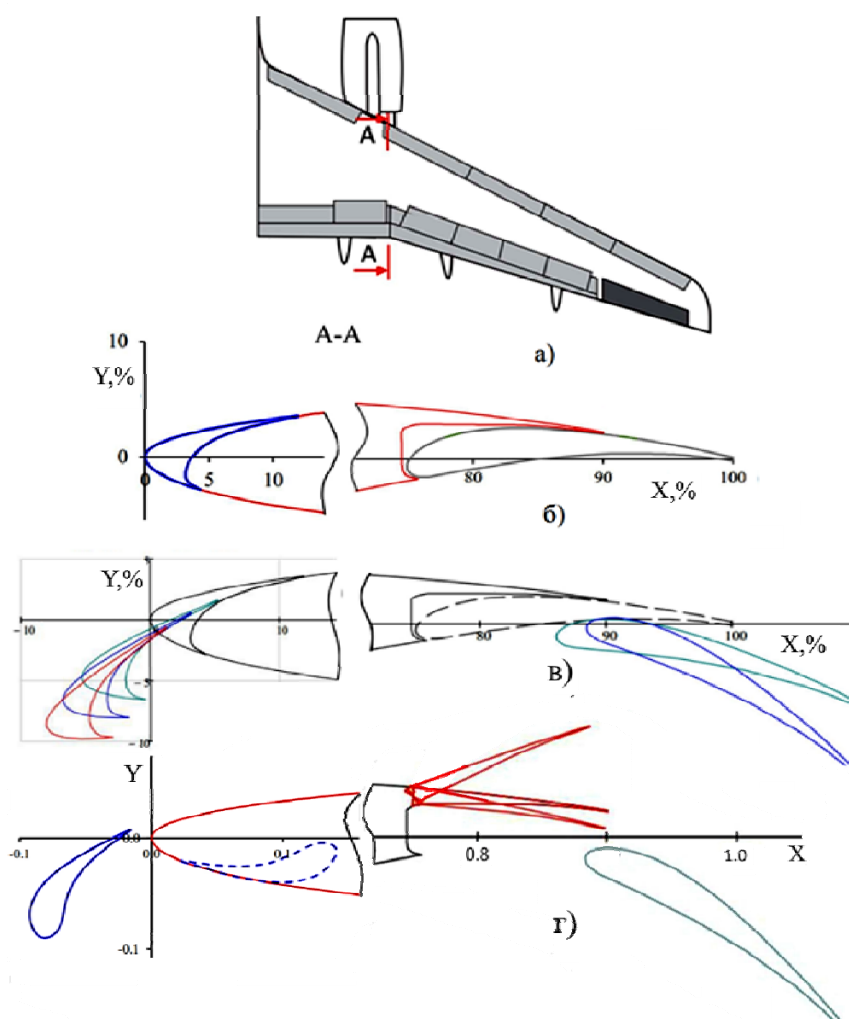


Рис. 11. Механизация сечения крыла
Fig. 11. High-lift devices of wing cross-section

Геометрия этого же сечения крыла с механизацией повышенной эффективности, включающей интеграцию отклоняемой вниз «крыши» (спойлера) с функцией выдвижения закрылка и применение альтернативного варианта механизации передней кромки (щитка Крюгера), показана на рис. 11, г. Адаптивный вариант механизации задней кромки использует исходный вариант выдвижного закрылка и спойлер ($b_{сп} = 15\%$) с функцией отклонения вниз на малые углы с целью предварительного поворота потока вниз за основным профилем. Щиток Крюгера удобообтекаемой формы с хордой 11.8% выдвигается в рабочие положения посредством поворота вокруг фиксированной оси вращения, расположенной в носке основного профиля. Целевой вы-

бор положения оси вращения позволяет сформировать профилированные щели в носовой части крыла на режимах взлета и посадки.

Геометрия носовых частей закрылка и основного профиля, а также щитка Крюгера сформирована с использованием кривых Безье третьего порядка.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Последующая оценка эффективности двух вариантов механизации в плоском потоке выполнена на основании результатов расчета стационарного турбулентного обтекания потоком вязкого сжимаемого газа в рамках осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса [12]. Основные результаты расчетов в виде суммарных характеристик, линий тока и распределения давления, полученные для числа Маха $M = 0.18$ и Рейнольдса $Re = 16 \cdot 10^6$, приведены ниже для взлетной и посадочной конфигураций.

Взлетная конфигурация

Наиболее эффективным способом удовлетворения требований к взлету двухдвигательных самолетов является обеспечение повышенного уровня несущих свойств крыла при малом сопротивлении, которое достигается обычно при безотрывном обтекании элементов механизации в рабочем диапазоне углов атаки. В расчётном сечении крыла с классическим вариантом механизации рассмотрены два взлетных положения предкрылка с углами отклонения $\delta_{пр} = 15^\circ$, 20° и одним положением закрылка – $\delta_z = 18^\circ$. Выдвижение предкрылка выполнено по радиусу, обеспечивающим практически бесщелевое отклонение при $\delta_{пр} = 15^\circ$ и близкое к оптимальному значению щели в посадочной конфигурации ($\delta_{пр} = 25^\circ$). Также рассмотрен альтернативный вариант механизации передней кромки – щиток Крюгера ($\delta_{щ} = 150^\circ$), выдвигаемый по радиусу с нижней поверхности носка основного профиля (см. рис. 11, г). Расчетные характеристики сечения крыла с двумя вариантами исходной механизации передней кромки показаны на рис. 12.

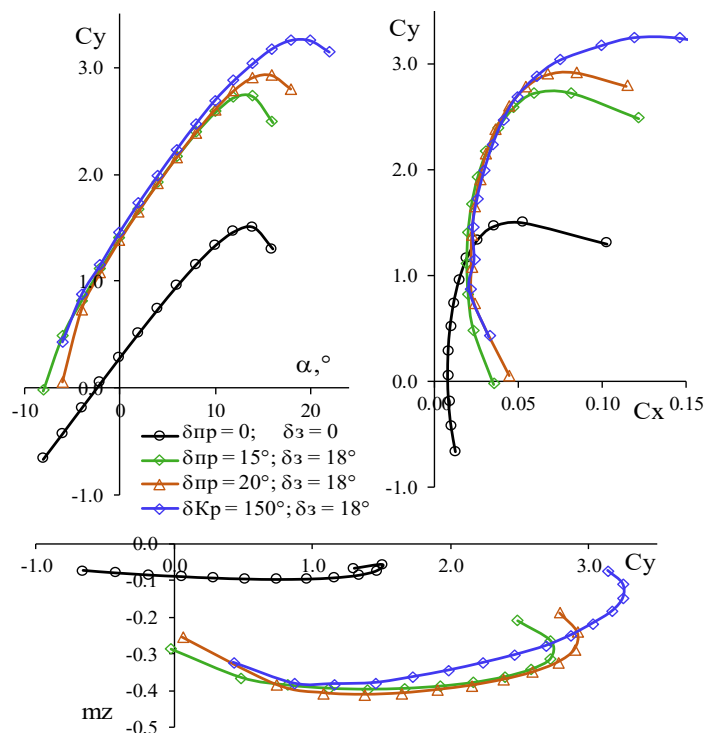


Рис. 12. Влияние механизации передней кромки на характеристики сечения крыла
Fig. 12. Effect of leading-edge devices on wing cross-section performance

Дополнительное выдвижение предкрылка на угол $\delta_{пр} = 20^\circ$ с образованием небольшой щели ($h_{щ} = 0.78\%$) улучшает обтекание носовой части основного профиля и способствует увеличению $C_{y_{max}}$ во взлетной конфигурации на $\Delta C_{y_{max}} = 0.2$. При близких значениях хорд предкрылка и щитка Крюгера последний, за счет увеличения хорды основного профиля в выдвинутом положении, обеспечивает несколько бо́льший наклон производной C_y^α на линейном участке, а за счет повышенных несущих свойств задерживает развитие отрыва с верхней поверхности основного профиля до бо́льших углов атаки. Приращение $C_{y_{max}}$ высоконесущей конфигурации со щитком Крюгера составляет 0.53 по сравнению с бесщелевым отклонением предкрылка ($\delta_{пр} = 15^\circ$) и $\Delta C_{y_{max}} = 0.33$ по сравнению с $\delta_{пр} = 20^\circ$. Максимальное значение $C_{y_{max}}$ сечения крыла с отклоненным щитком Крюгера и выдвинутым закрылком ($\delta_z = 18^\circ$) составляет 3.24.

Выбранная геометрия и положения элементов механизации относительно основного профиля обеспечили безотрывный характер обтекания верхней поверхности предкрылка и закрылка в докритическом диапазоне углов атаки (рис. 13).

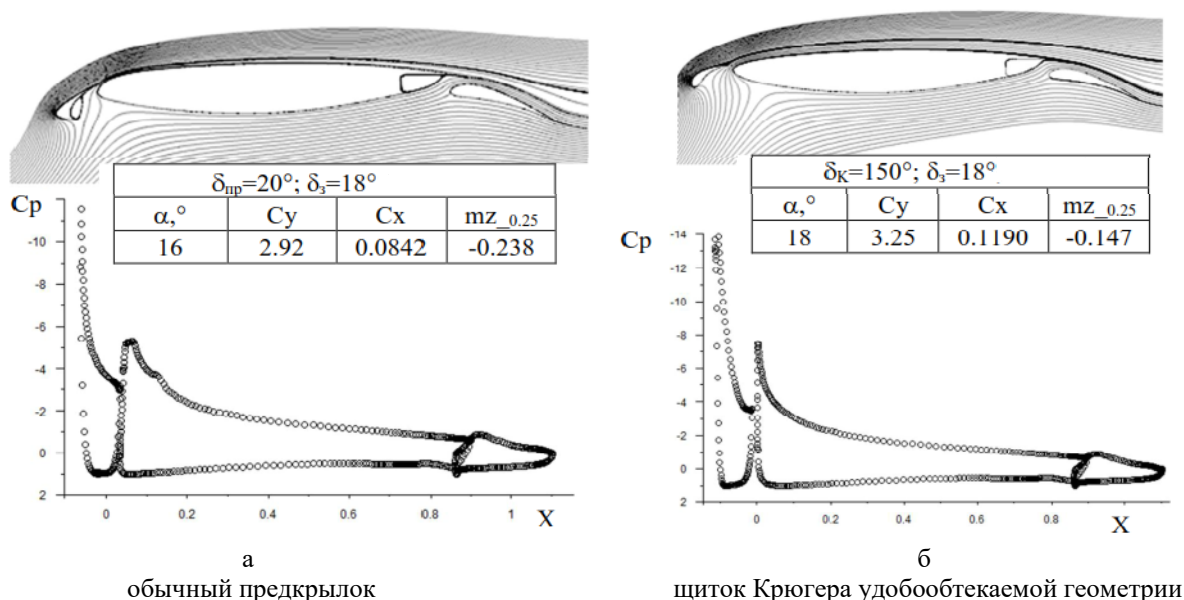


Рис. 13. Характеристики сечения крыла с двумя вариантами механизации передней кромки
Fig. 13. Performance of wing cross-section with two versions of leading-edge devices

На закритических углах атаки появляются зоны диффузорного отрыва потока с верхней поверхности основного профиля, особенно заметные в конфигурации сечения крыла с бесщелевым выдвижением предкрылка (рис. 14), которые приводят к снижению подъемной силы.

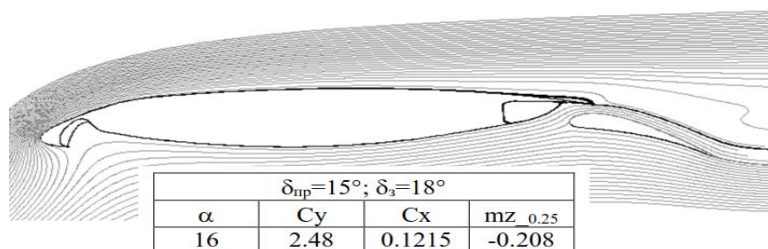


Рис. 14. Закритический режим обтекания взлетной конфигурации с бесщелевым отклонением предкрылка
Fig. 14. Flow visualizations of sealed slat configuration for post-stall condition

Посадочная конфигурация

Обеспечение максимально возможного значения $C_{y_{\max}}$ крыла при удовлетворительном уровне сопротивления, необходимом для начального участка набора высоты при отказе одного двигателя, является основным требованием при проектировании посадочной конфигурации механизации крыла двухдвигательного самолета. В качестве критерия оценки малого сопротивления принято условие отсутствия отрыва потока с верхней поверхности закрылка в расчетном диапазоне углов атаки. Для рассматриваемой конфигурации исходного варианта механизации (рис. 11, б, в) этому требованию удовлетворяет значение угла отклонения закрылка, равное $\delta_3 = 36^\circ$ (рис. 15).

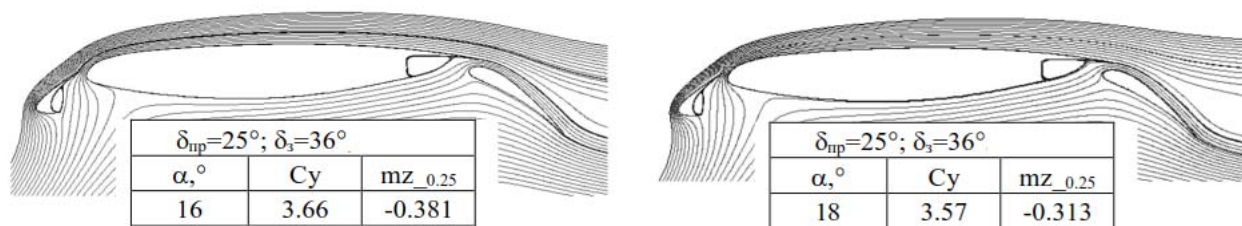


Рис. 15. Визуализация обтекания исходной конфигурации механизации на больших углах атаки
Fig. 15. Flow field visualization of initial high-lift configuration on high angles-of-attack

Снижение несущих свойств высоконесущей системы происходит из-за формирования неблагоприятного градиента давления над верхней поверхностью закрылка, вызывающего торможение потока. В результате этого влияния происходит уменьшение угла поворота потока за основным профилем и соответственно снижается значение $C_{y_{\max}}$ всей высоконесущей системы (рис. 15).

На закритических углах атаки происходит разрушение следа за основным профилем с формированием срывной зоны над закрылком. При этом сохраняется безотрывный характер обтекания верхней поверхности закрылка (рис. 16).

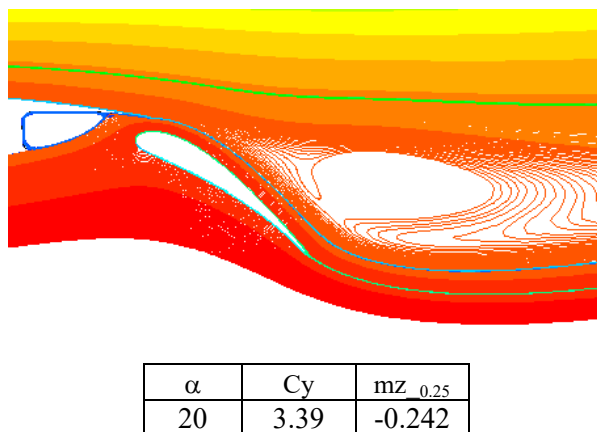


Рис. 16. Визуализация течения на закритическом угле атаки
Fig. 16. Flow visualization for post-stall angle

Возможным вариантом повышения несущих свойств сечения крыла на линейном участке может быть отклонение вниз на малый угол спойлера и умеренное увеличение угла отклонения закрылка. Ограничением на углы отклонения спойлера и закрылка является появление местных зон отрыва потока на их верхних поверхностях, снижающих эффективность механизации как на

линейном участке, так и в области критических углов атаки. Таким образом, определение оптимальных значений углов отклонения спойлера и закрылка является основной задачей при проектировании адаптивной механизации задней кромки.

Отклонение спойлера способствует дополнительному отклонению потока вниз в области закрылка, что позволяет снизить эффективный угол атаки закрылка и несколько увеличить его максимальное отклонение, сохранив при этом благоприятный характер обтекания верхней поверхности, повысив несколько значение $C_{y_{\max}}$.

На основании расчетных исследований определены значения углов отклонения спойлера – $\delta_{\text{сп}} = 6^\circ$ и закрылка – $\delta_z = 40^\circ$ (рис. 11,г), позволившие при благоприятном характере обтекания концевой части основного профиля и закрылка обеспечить приращение C_y на линейном участке, равное $\Delta C_{y_0} = 0.29$, и $\Delta C_{y_{\max}} = 0.07$ в области критических углов атаки (рис. 17). Максимальное значение $C_{y_{\max}}$ для адаптивного варианта механизации задней кромки и выдвижного предкрылка с углом отклонения $\delta_{\text{пр}} = -25^\circ$ составляет 3.73 (рис. 18).

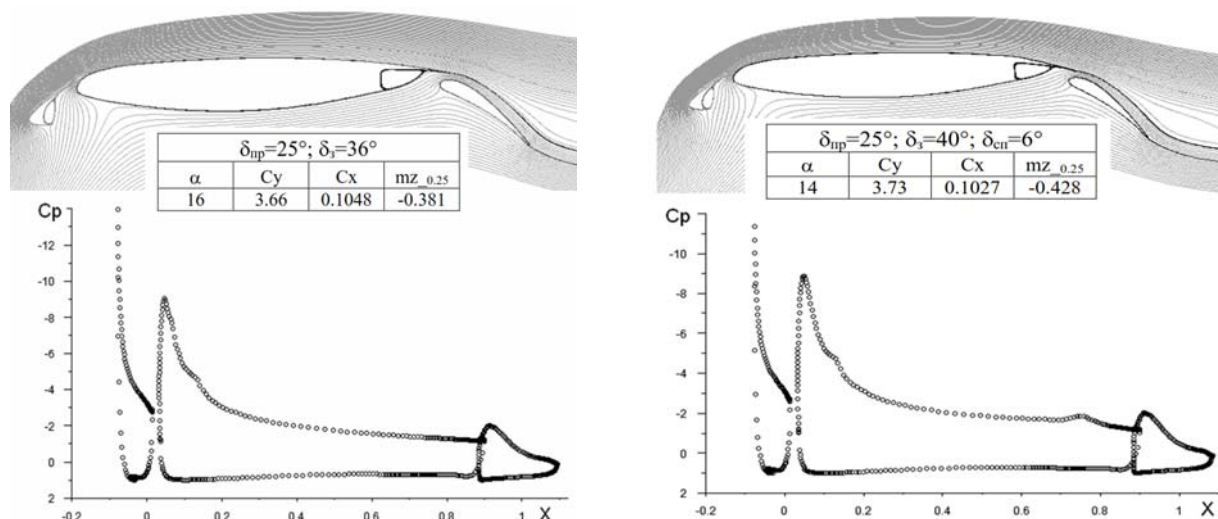


Рис. 17. Влияние отклонения спойлера и увеличения угла отклонения закрылка на характеристики сечения крыла

Fig. 17. Effect of applying spoiler droop and higher angle of flap deflection on wing cross-section performance

Применение альтернативного варианта механизации передней кромки (щелевого щитка Крюгера) с закрылком, отклоненным на угол 40° , обеспечило дополнительное приращение C_y на линейном участке и более заметное в области $C_{y_{\max}}$ ($\Delta C_{y_{\max}} = 0.17$) по сравнению с исходным вариантом механизации и 0.1 по отношению к адаптивному варианту закрылка с выдвижным предкрылком (рис. 19).

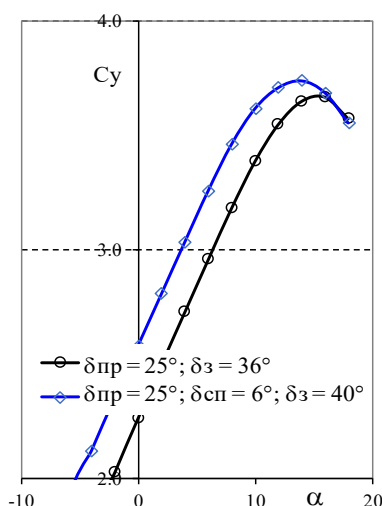


Рис. 18. Повышение несущих свойств исходного варианта механизации
Fig. 18. Improving wing lift section by application of adaptive flap

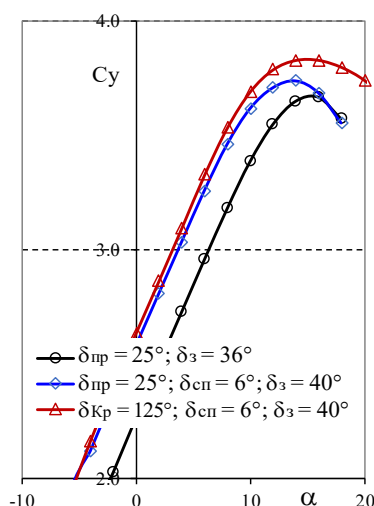


Рис. 19. Несущие свойства адаптивного варианта механизации с щитком Крюгера
Fig. 19. Wing lift section of adaptive flap with Krueger device

Также в этом случае следует отметить благоприятный характер обтекания элементов высоконесущей системы (рис. 20) и очень пологий участок изменения C_y в области критического угла атаки, который может оказать положительное влияние на $C_{y_{max}}$ крыла с отклоненной механизацией в условиях трехмерного развития отрыва потока с верхней поверхности.

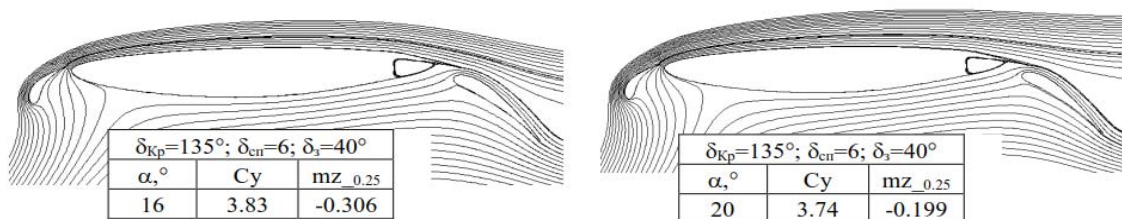


Рис. 20. Линии тока в сечении крыла с адаптивным закрылком и щитком Крюгера
Fig. 20. Streamline contours around wing cross-section with deflection of adaptive flap and Krueger device

Применение щитка Крюгера в посадочной конфигурации способствует меньшему приращению момента тангажа на пикирование по сравнению с основным вариантом механизации с тем же положением закрылка, что в конечном счете может привести к снижению потерь на балансировку самолета.

Исследование взлетно-посадочной адаптивной механизации в компоновке крыла магистрального самолета

В рамках исследований по совершенствованию взлетно-посадочной механизации магистральных самолетов, проведены испытания адаптивной механизации задней кромки в компоновке крыла модели с интегрированной силовой установкой (рис. 21, а).

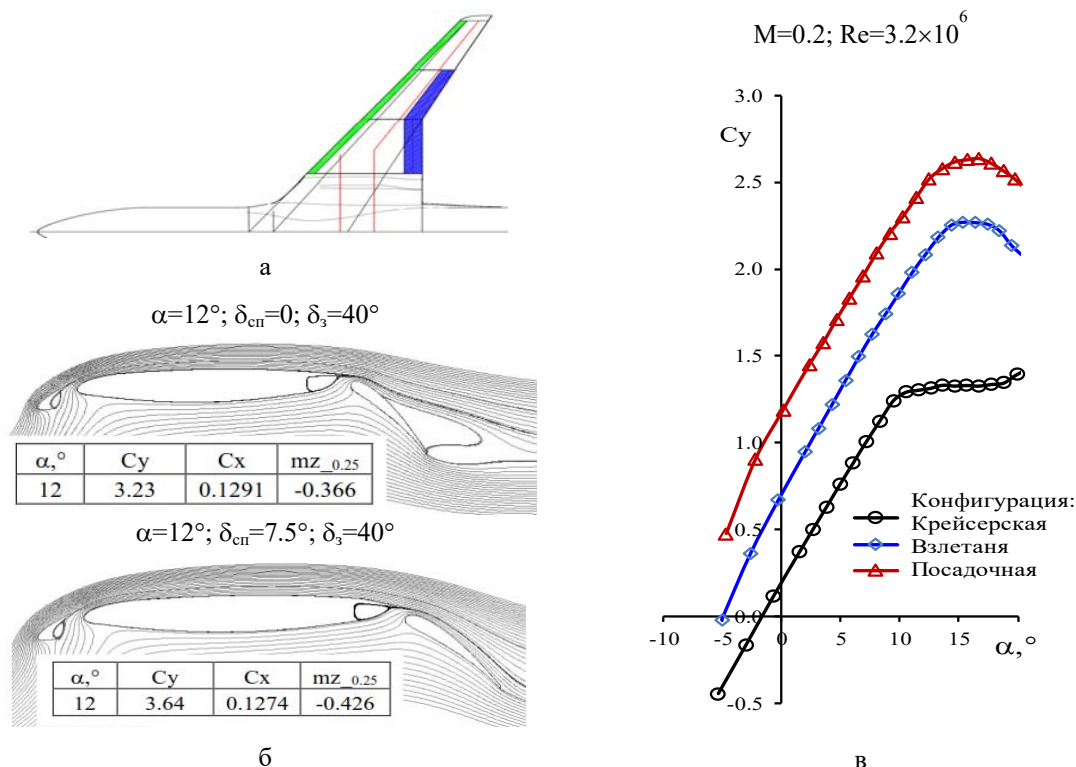


Рис. 21 Эффективность адаптивного закрылка в компоновке крыла магистрального самолета

Fig. 21. Efficiency of adaptive flap at wing layout of transport aircraft

Ограничение размаха механизации, вызванное расположением силовой установки в корневой части крыла, а также малые радиусы передней кромки и толщин хвостовой части крыла обусловили:

- выбор кинематики выдвижения закрылков по потоку, обеспечивающей наибольшее увеличение площади крыла на режимах взлета и посадки, а также минимизацию щели между торцами смежных секций закрылка в выдвинутом положении;
- интеграцию отклоняемой вниз «крыши» крыла (спойлеров) с функцией выдвижения одноцелевого закрылка на взлетно-посадочных режимах полета.

Предварительный выбор профилировки и взаимного расположения элементов механизации относительно основной части крыла выполнен на основании серии двумерных расчетов стационарного турбулентного обтекания сечений крыла потоком вязкого сжимаемого газа в рамках осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса. Отклонение спойлера вниз на угол 7.5° оказало благоприятное влияние на обтекание верхней поверхности закрылка и привело к увеличению несущих свойств как на линейном участке зависимости $C_y(\alpha)$, так и в области $C_{y_{\max}}$ (рис. 21, б).

Испытания модели самолета с адаптивной механизацией задней кромки в АДТ показали достаточно высокий уровень несущих свойств крыла (рис. 21, в). В условиях ограниченного размаха механизации передней и задней кромок крыла получен следующий диапазон приращений коэффициентов подъемной силы крыла во взлетной и посадочной конфигурациях – $\Delta C_{y_0} = 0,51 \div 0,97$ и $\Delta C_{y_{\max}} = 0,94 \div 1,31$ ($Re = 3.24 \cdot 10^6$). Удовлетворительный уровень сопротивления обеспечил достижение значения аэродинамического качества $K_{Cy=1,5} \approx 13$ во взлетной конфигурации модели с убранном шасси и без хвостового оперения.

Перспективность использования щитков Крюгера

Благоприятный характер обтекания нижней поверхности щитков в рабочих положениях, а также малое влияние на обтекание верхней поверхности крыла в крейсерской конфигурации позволяют значительно расширить функциональность их применения в компоновках стреловидного крыла. Особый интерес представляют возможности обеспечения ламинаризации течения на верхней поверхности крыла, а также снижения шума механизации крыла на взлетно-посадочных режимах полета.

Исследования DLR [13] идентифицировали щелевые предкрылки как один из основных источников шума планера. Поле течения около предкрылков имеет сложный характер. Отрыв потока с острого выступа («зуба») приводит к формированию замкнутой срывной зоны (рис. 22, а) со сдвиговым течением, взаимодействие которой с течением в сужающейся щели способствует возникновению интенсивного широкополосного шума. Высокочастотный тональный звук, который может быть чрезвычайно громким, создают и вихри, сходящие с задней кромки предкрылка конечной толщины.

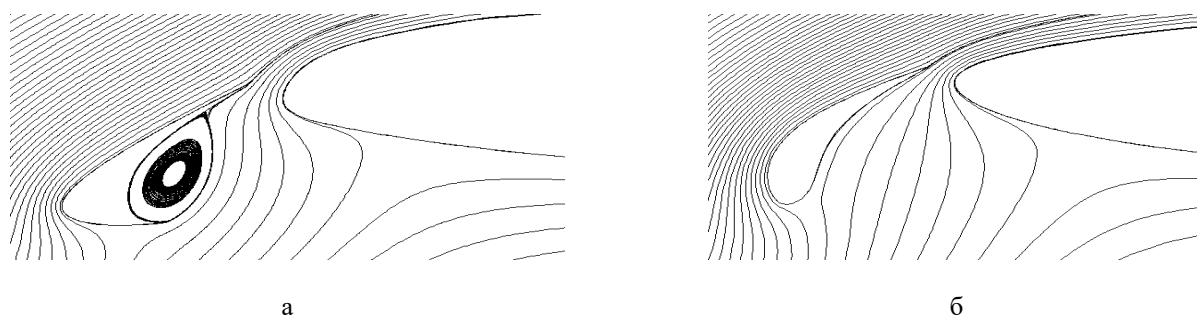


Рис. 22. Влияние геометрии механизации передней кромки на течение в щели ($\alpha = 10^\circ$)
Fig. 22. Influence of the leading edge mechanization geometry on the flow in the gap ($\alpha=10^\circ$)

Ослабление шума от предкрылка может быть достигнуто:

- снижением скорости потока на задней кромке предкрылка, а также уменьшением градиента давления в щели предкрылка [13];
- изменением формы нижней кромки предкрылка в месте расположения острого выступа («зуба») с целью снижения узкополосного шума с помощью шевронов [14];
- применением щитка Крюгера удобообтекаемой геометрии (см. рис. 11, г) с безотрывным характером обтеканием нижней поверхности (рис. 22, б) в качестве механизации передней кромки.

Ламинаризация обтекания элементов компоновки самолета содержит большой потенциал для снижения сопротивления в крейсерском полете. Однако ламинарная технология чувствительна к дефектам поверхности (уступам, шероховатости), а также загрязнениям (например, насекомыми), которые приводят к нежелательному раннему переходу ламинарного течения в турбулентное и, следовательно, к более высокому сопротивлению трения. Приведенные выше факторы объясняют причину невозможности применения выдвижных предкрылков в качестве механизации передней кромки крыльев с протяженными участками ламинарного течения на верхней поверхности. Возможность использования щитков Крюгера для экранирования передней кромки крыла во время взлета и посадки от загрязнения позволяет использовать их в качестве механизации передней кромки ламинарных крыльев будущих самолетов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен комплексный подход к повышению эффективности механизации передней и задней кромок стреловидного крыла магистральных самолетов, включающий интеграцию отклоняемого вниз спойлера с функцией выдвижения закрылка, а также применение щелевого щитка Крюгера удобообтекаемой формы вместо выдвижного предкрылка.

Проведенные расчетные и экспериментальные исследования предлагаемого подхода показали заметное улучшение аэродинамических характеристик отсеков крыла и моделей самолетов во взлетной и посадочной конфигурациях.

Применение щитка Крюгера позволяет снизить уровень шума, создаваемого механизацией, и экранировать переднюю кромку ламинарного крыла во время взлета и посадки от загрязнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Rudolph P.K.C.** High-lift system of commercial subsonic airlines. Seattle, WA United States, 1996. 166 p.
2. **Reckzeh D.** Aerodynamic design of airbus aerodynamic design high-lift wings // DLR Ehemaligentreffen Braunschweig, 17 June 2005. 24 p.
3. **Antunes A.P., Galdino R.S., Azevedo J.L.** A study of transport aircraft high-lift design approaches // 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 2007. 18 p. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2007-38>
4. **Szodruch J., Hilbig R.** Variable wing camber for transport aircraft // Progress in Aerospace Sciences. 1988. Vol. 25, iss. 3. Pp. 297–328. DOI: [https://doi.org/10.1016/0376-0421\(88\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0376-0421(88)90003-6)
5. **Михайлов Ю.С., Степанов Ю.Г., Хозяинова Г.В.** Применение адаптивной механизации для уменьшения сопротивления профилей и крыльев на околозвуковых скоростях // Труды ЦАГИ. 1990. № 2462. С. 3–21.
6. **Петров А.В., Степанов Ю.Г., Юдин. Г.А.** Аэродинамика взлетно-посадочной механизации // ЦАГИ: основные этапы научной деятельности 1968-1993: сб. науч. ст. М.: Наука, 1995. С. 49–59.
7. **Hansen H.** Application of mini-trailing-edge devices in the awiator project. Airbus Deutschland, EGAG, Bremen, Germany, Jan. 2003, 19 p.
8. **Nelson T.** 787 Systems and Performance [Электронный ресурс] // Boeing. 2005. 36 p. URL: <http://www.myhres.com/Boeing-787-Systems-and-Performance.pdf> (дата обращения 14.10.2020).
9. **Reckzeh D.** Multifunctional wing moveables: design of the A350XWB and the way to future concepts // 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS 2014. 10 p.
10. **Schindler K.** Aerodynamic design of high-lift devices for civil transport aircraft using RANS CFD / K. Schindler, D. Reckzeh, U. Scholz, A. Grimminger // 28th AIAA Applied Aerodynamics Conference, 2010. 9 p. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2010-4946>
11. **Omar E.** Two-dimensional wind-tunnel tests of a NASA supercritical airfoil with various high-lift systems / E. Omar, T. Zierten, M. Hahn, E. Szpizo, A. Mahal. Volume II-Test Data. NASA CR-2215, 1973. 232 p.
12. **Михайлов Ю.С.** Развитие классических конфигураций механизации стреловидного крыла // Сборник докладов XII международной научной конференции по амфибийной и безаэродромной авиации. «Гидроавиасалон-2018». Геленджик, 6-7 сентября 2018 г. С. 125–133.

13. Hovelmann A. Aerodynamic investigations of noise-reducing high-lift systems for passenger transport aircraft. KTH Registration Number: 860428-A553 // Institute of Aerodynamics and Flow Technology. German Aerospace Center, Braunschweig, 2011. 98 p.

14. Беляев И.В. Влияние шевронов на шум предкрылка прямого и стреловидного крыла / И.В. Беляев, М.Я. Зайцев, В.Ф. Копьев, М.А. Миронов // Акустический журнал. 2012. Т. 58, № 4. С. 450–458.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Михайлов Юрий Степанович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник ЦАГИ, mikh47@yandex.ru

INCREASE IN HIGH-LIFT DEVICES EFFICIENCY OF SWEEP WING

Yuriy S. Mikhailov¹

¹*Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovsky, Russia*

ABSTRACT

The use of Fowler flaps and slotted slats in sweptwing aircraft is the standard solution to increase wing lift at take off and landing. In the literature this solution is known as a classical option of high-lift system of commercial subsonic aircraft. The results of numerical and experimental studies of some solutions intended to increase the efficiency of classical high-lift devices are presented. The concept of the trailing-edge devices called "the adaptive flap" is considered as a way to improve flap efficiency. The adaptive concept is characterized by the integration of spoiler downward deflection to the Fowler flap function. Integration of the spoiler with a movable flap provided an increase of lift in the linear region due to flaps deflected to a higher angle. The steeper upwash angle at a leading-edge device may be the reason of an early stall of the main wing. To protect the leading edge a slotted Kruger flap with streamline form has been used. Preliminary design of classical and improved high-lift systems included the determination of aerodynamic shapes and the optimized position for the high-lift devices. Aerodynamic analysis and design were carried out using 2D RANS Navier-Stokes method. A comparison of computed results has shown visible aerodynamic advantages of an improved high-lift system for maximum lift coefficient and refining the behavior of stall characteristics at high angles of attack. The results of wind tunnel tests of aircraft model with adaptive flap showed its effectiveness.

Key words: high-lift devices, adaptive flap, Kruger device, aerodynamic design experimental studies.

REFERENCES

- 1. Rudolph, P.K.C.** (1996). *High-lift System of Commercial Subsonic Airlines*. Seattle, WA United States, 166 p.
- 2. Reckzeh, D.** (2005). *Aerodynamic design of airbus aerodynamic design high-lift wings*. DLR Ehemaligentreffen Braunschweig, 24 p.
- 3. Antunes, A.P., Galdino, R.S. and Azevedo, J.L.** (2007). *A study of transport aircraft high-lift design approaches*. 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 18 p. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2007-38>
- 4. Szodruch, J. and Hilbig, R.** (1988). *Variable wing camber for transport aircraft*. Progress in Aerospace Sciences, vol. 25, issue 3, pp. 297–328. DOI: [https://doi.org/10.1016/0376-0421\(88\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0376-0421(88)90003-6)
- 5. Mihajlov, Yu.S., Stepanov, Yu.G. and Hozyainova, G.V.** (1990). *Primeneniye adaptivnoy mekhanizatsii dlya umensheniya soprotivleniya profiley i krylev na okolozvukovykh skorostyakh* [Employment of adaptive mechanization for drag reduction on airfoil and wings at transonic speed]. Trudy TsAGI, no. 2462, pp. 3–21. (in Russian)

6. **Petrov, A.V., Stepanov, Yu.G. and Yudin, G.A.** (1995). *Aerodinamika vzletno-posadochnoy mekhanizatsii* [Aerodynamics of takeoff and landing mechanization]. TsAGI: osnovnyye etapy nauchnoy deyatel'nosti 1968-1993: sbornik nauchnykh statey. Moscow: Nauka, pp. 49–59. (in Russian)
7. **Hansen, H.** (2003). *Application of mini-trailing-edge devices in the awiator project*. Airbus Deutschland, EGAG, Bremen, Germany, 19 p.
8. **Nelson, T.** (2005). *787 Systems and Performance*. Boeing, 36 p. Available at: <http://www.myhres.com/Boeing-787-Systems-and-Performance.pdf> (accessed 14.10.2020).
9. **Reckzeh, D.** (2014). *Multifunctional wing moveables: design of the A350XWB and the way to future concepts*. 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS, 10 p.
10. **Schindler, K., Reckzeh, D., Scholz, U. and Grimminger, A.** (2010). *Aerodynamic design of high-lift devices for civil transport aircraft using RANS CFD*. 28th AIAA Applied Aerodynamics Conference, 9 p. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2010-4946>
11. **Omar, E., Zierten, T., Hahn, M., Szpizo, E. and Mahal, A.** (1973). *Two-dimensional wind-tunnel tests of a NASA supercritical airfoil with various high-lift systems*. Volume II-Test Data. NASA CR-2215, 232 p.
12. **Mihajlov, Yu.S.** (2018). *Razvitiye klassicheskikh konfiguratsiy mekhanizatsii strelovidnogo kryla* [Evolution of classical mechanization version for swept wing]. Sbornik dokladov XII mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii po amfibiynoy i bezaerodromnoy aviatsii [Proceedings of the XII international scientific conference on amphibious and airplane with no need of airfields]. Hydroaviasalon 2018, pp. 125–133 (in Russian).
13. **Hovellmann, A.** (2011). *Aerodynamic investigations of noise-reducing high-lift systems for passenger transport aircraft*. KTH Registration Number: 860428-A553. Institute of Aerodynamics and Flow Technology. German Aerospace Center, Braunschweig, 98 p.
14. **Zaitsev, M.Yu., Belyaev, I.V., Kopiev, V.F. and Mironov, M.A.** (2012). *An experimental study of reducing narrowband noise of a slat using chevrons*. Acoustical Physics, vol. 58, no. 4, pp. 411–419. (in Russian)

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Yuriy S. Mikhailov, Candidate of Technical Sciences, Leading Research Fellow of Central Aerohydrodynamic Institute, mikh47@yandex.ru

Поступила в редакцию
Принята в печать

01.09.2020
26.11.2020

Received
Accepted for publication

01.09.2020
26.11.2020

ББК 05
Н 34
Св. план 2020

Научный Вестник МГТУ ГА
Том 23, № 06, 2020
Civil Aviation High TECHNOLOGIES
Vol. 23, No. 06, 2020

Свидетельство о регистрации в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) ПИ № ФС77-47989 от 27 декабря 2011 г.

Подписано в печать 18.12.2020.

Печать цифровая

Формат 60×90/8

15,125 усл. печ. л.

Заказ № 720 / 182

Тираж 100 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20
Изготовлено в ИД Академии имени Н.Е. Жуковского
125167, Москва, 8-го Марта 4-я ул., дом 6А
Тел.: (495) 973-45-68
E-mail: artpress@ mail.ru

Подписной индекс в каталоге Роспечати 84254
© Московский государственный
технический университет ГА, 2018