

Том 28, № 04, 2025

ISSN 2079-0619

e-ISSN 2542-0119

# Научный Вестник МГТУ ГА

---

---

## Civil Aviation High TECHNOLOGIES

Vol. 28, No. 04, 2025

Издается с 1998 г.

Москва  
2025

*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, д. филос. н., профессор кафедры МГТУ ГА, Москва, Россия;  
*Полешкина И.О.*, доцент, д.т.н., старший научный сотрудник отдела научных исследований МГТУ ГА, Москва, Россия.

### Члены главной редакции:

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

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

*Желтов С.Ю.*, заслуженный деятель науки РФ, академик РАН, профессор, д. т. н., первый заместитель генерального директора ГосНИИАС, Москва, Россия;

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

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

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

*Махутов Н.А.*, член-корреспондент РАН, проф., д. т. н., г. н. с. ФГБУН Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия;

*Трофименко Ю.В.*, проф., д. т. н., зав. каф. МАДИ, Москва, Россия;

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

*Ченцов А.Г.*, член-корреспондент РАН, проф., д. ф.-м. н., г. н. с. Института математики и механики им. Н.Н. Красовского УрО РАН, Екатеринбург, Россия;

*Чернышев С.Л.*, академик РАН, профессор, д. ф.-м. н., вице-президент РАН, научный руководитель ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, 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;

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

*Сюй Хаудзюнь*, PhD, Университет военно-воздушных сил, Хиан, Китай;

*Франческа де Кресченцио*, 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 авиации, Технический университет в Кошице, Кошице, Словацкая Республика.

### Editorial Board

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

### Chief Editorial Board:

- Sergey F. Boev*, Professor, Doctor of Sciences, General Director, Interstate Joint Stock Corporation “Vympel”, 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;
- Sergey Y. Zheltov*, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Academician, Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Sciences, First Deputy General Director, State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, Russia;
- Vladimir T. Kalugin*, Professor, Doctor of Sciences, Dean, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia;
- 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;
- Dmitry S. Lukin*, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia;
- Nikolay A. Makhutov*, Corresponding Member, The Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Science, Principal Researcher, FSBI, Institute of Machine Science named after A.A. Blagonravov, Moscow, Russia;
- Yuriy V. Trofimenko*, Professor, Doctor of Science, Head of Chair, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russia;
- Igor K. Turkin*, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia;
- Aleksander G. Chentsov*, Corresponding Member, The Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Science, Principal Researcher, Institute of Mathematics and Mechanics, named after N.N. Krasovskiy, the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia;
- Sergey L. Chernishov*, Academician, Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Sciences, Vice-President, Russian Academy of Sciences, Academic Adviser, National Research Center “Zhukovsky Institute”, 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;
- 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.

Web-site: <http://avia.mstuca.ru>

E-mail: [vestnik@mstuca.ru](mailto:vestnik@mstuca.ru)

### Редакционный совет

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

**Акиншин 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;

**Васильев О.В.**, проф., д. т. н., г.н.с. ООО «НПО НаукаСофт», Москва, Россия;

**Вышинский В.В.**, 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;

**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;

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

**Полтавский А.В.**, д. т. н., с. н. с., в. н. с. Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 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., в. н. с. Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 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 «НПО 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, Leading Researcher, 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;

**Oleg V. Vasiliev**, Professor, Doctor of Science, Principal Researcher, LLC “Scientific Production Association, NaukaSoft”, 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;

**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;

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

**Alexandr V. Poltavsky**, Doctor of Technical Sciences, Senior Scientific Researcher, Leading Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Science, 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**, Doctor of Sciences, Leading Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Science, 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 “Scientific Production Association, NaukaSoft”, Moscow, Russia;

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

**Vladimir A. Hodakovskiy**, 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

### *К 75-ЛЕТИЮ ИНЖЕНЕРНО-АВИАЦИОННОЙ СЛУЖБЫ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ РОССИИ*

**Кузнецов С.В., Ядров Д.В.**

Инженерно-авиационная служба гражданской авиации: от технической эксплуатации до поддержания летной годности (часть 1)

8

### *ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ*

**Vlasova A.V., Eliseev B.P.**

Bird detection in the airfield area as a factor in ensuring ornithological safety of aircraft flights

26

**Ganichev A.A., Petrov V.I.**

Mathematical model of threats to an aviation data network under unauthorized access

40

### *МАШИНОСТРОЕНИЕ*

**Парубин Д.Ю., Кирпичев И.Г.**

Анализ современных требований к разработке системы кондиционирования воздуха воздушных судов

50

**Титов Д.В., Парненко А.Е., Киселев А.В.**

Формирование облика беспилотного летательного аппарата вертолетного типа в части взлетно-посадочных устройств, обеспечивающих взлет и посадку на взлетно-посадочную площадку корабля

67

### *НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ*

**Мясников М.И., Ильин И.Р.**

Развитие автономных систем управления полетом опционально пилотируемых винтокрылых летательных аппаратов

84

## CONTENTS

### *DEDICATED TO THE 75<sup>th</sup> ANNIVERSARY OF THE ENGINEERING AVIATION SERVICE OF THE CIVIL AVIATION OF RUSSIA*

**Kuznetsov S.V., Yadrov D.V.**

Engineering aviation service of the civil aviation: from technical operation to continued airworthiness (part 1)

8

#### *TRANSPORTATION SYSTEMS*

**Vlasova A.V., Eliseev B.P.**

Bird detection in the airfield area as a factor in ensuring ornithological safety of aircraft flights

26

**Ganichev A.A., Petrov V.I.**

Mathematical model of threats to an aviation data network under unauthorized access

40

#### *MECHANICAL ENGINEERING*

**Parubin D.Yu., Kirpichev I.G.**

Analysis of modern requirements for the development of aircraft air conditioning system

50

**Titov D.V., Parnenkov A.E., Kiselev A.V.**

The formation of technical appearance of a helicopter-type unmanned aerial vehicle in part of take-off and landing devices that provide take-off and landing on the ship's helicopter landing pad

67

#### *SCIENTIFIC REVIEWS*

**Myasnikov M.I., Ilyin I.R.**

The development of autonomous flight control systems for optionally manned rotary-wing aircraft

84

**К 75-ЛЕТИЮ ИНЖЕНЕРНО-АВИАЦИОННОЙ СЛУЖБЫ  
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ РОССИИ**

УДК 629.735

DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-4-8-25

**Инженерно-авиационная служба гражданской авиации:  
от технической эксплуатации до поддержания летной годности  
(часть 1)**

**С.В. Кузнецов<sup>1</sup>, Д.В. Ядров<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Московский государственный технический университет гражданской авиации,  
г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Федеральная служба воздушного транспорта, г. Москва, Россия*

**Аннотация:** В год празднования 80-летия Победы и связанного с этим событием 75-летнего юбилея инженерно-авиационной службы гражданской авиации России в статье проведен анализ советского периода ее деятельности. Констатируется, что инженерно-авиационная служба гражданской авиации создавалась по образцу инженерно-авиационной службы военно-воздушных сил, что отразилось в системе построения основных нормативных документов в виде наставлений и устава в правовом поле воздушных кодексов. Проведен анализ целей, задач и функций деятельности инженерно-авиационной службы за 40-летний период, регламентируемых четырьмя наставлениями. Показано, как они изменялись, переформулировались и дополнялись в процессе накопления опыта деятельности до тех пор, пока не сложилась стройная система технической эксплуатации авиационной техники, включающая авиационный персонал – основу инженерно-авиационной службы. В статье сконцентрировано внимание на том, каким является ответ на ключевой вопрос наставлений: какое воздушное судно может быть допущено в полет. В анализируемый период деятельности инженерно-авиационной службы ответ был однозначным: только исправное воздушное судно может быть допущено в полет. Этому была подчинена вся деятельность инженерно-авиационной службы. В статье формулируется парадигма поддержания летной годности, на которой основывается международная гражданская авиация и которая легла в основу формируемой отечественной системы поддержания летной годности. Правильное понимание соотношения и взаимосвязи технической эксплуатации и поддержания летной годности необходимо для разработки профессиональных и образовательных стандартов, которые должны определить названия и содержание обучения направлений и специальностей, по которым готовит студентов и курсантов университет. Проведенный в статье анализ и подготовленные для последующей статьи материалы позволят дать ответы на животрепещущие вопросы, как обеспечить подготовку для инженерно-авиационной службы высококвалифицированных специалистов, обладающих всеми необходимыми компетенциями, чтобы они были востребованы эксплуатационными предприятиями и организациями отрасли.

**Ключевые слова:** гражданская авиация, инженерно-авиационная служба, техническая эксплуатация, техническое обслуживание, поддержание летной годности, воздушное судно, авиационная техника, авиационный персонал.

**Для цитирования:** Кузнецов С.В., Ядров Д.В. Инженерно-авиационная служба гражданской авиации: от технической эксплуатации до поддержания летной годности (часть 1) // Научный вестник МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 4. С. 8–25. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-4-8-25

**Engineering aviation service of the civil aviation: from technical  
operation to continued airworthiness (part 1)**

**S.V. Kuznetsov<sup>1</sup>, D.V. Yadrov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Federal Air Transport Agency, Moscow, Russia*

**Abstract.** In the year of the 80<sup>th</sup> anniversary of the Victory and the related 75<sup>th</sup> anniversary of the engineering aviation service of the civil aviation of Russia, the article analyzes the activities of the service during the Soviet period. It is stated, that the engineering aviation service of the civil aviation was established, based on the model of the air force engineering aviation service, which was

reflected in the system of the key regulatory documents in the form of guidelines and a Charter within the legal framework of the Air Codes. The analysis of the goals, objectives and functions of the engineering aviation service activities over a forty-year period, regulated by four guidelines, was conducted. It is shown how they changed, reformulated and supplemented in the process of accumulating experience until a coherent system of technical operation of aviation equipment was established, which included aviation personnel – the foundation of the engineering aviation service. The article focuses on the answer to a key question of the guidelines: what kind of aircraft can be allowed to fly? During the analyzed period of the engineering aviation service activity, the answer was unambiguous – only airworthy aircraft can be allowed to fly. All activities of the engineering aviation service were subordinated to this principle. The article formulates the paradigm of continued airworthiness, which is the basis of international civil aviation, and serves as the foundation for the developing of the domestic system of continued airworthiness. A correct understanding of the relationship and interconnection between technical maintenance and continued airworthiness is essential for the development of professional and educational standards that should define the names and the content of training programs and specialties for which the University prepares students and cadets. The analysis conducted in the article and the materials prepared for the subsequent article will provide answers to pressing questions on how to ensure the training of highly qualified specialists for the engineering aviation service, possessing all the necessary competencies to be sought after by operators and organizations in the industry.

**Key words:** civil aviation, engineering aviation service, technical operation, maintenance, continued airworthiness, aircraft, aviation equipment, aviation personnel.

**For citation:** Kuznetsov, S.V., Yadrov, D.V. (2025). Engineering aviation service of the civil aviation: from technical operation to continued airworthiness (part 1). Civil Aviation High Technologies, vol. 28, no. 4, pp. 8–25. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-4-8-25

## Введение

Для России главной памятной датой текущего 2025 года является 9 мая – день 80-летия Великой Победы. Для гражданской авиации (ГА) России важной памятной датой считается 21 августа – 75-летие со дня образования инженерно-авиационной службы (ИАС) ГА. Эти памятные даты неразрывно связаны между собой. ИАС гражданского воздушного флота (ГВФ) в первые десятилетия своего существования создавалась и формировалась по образцу ИАС военно-воздушных сил (ВВС), прошедшей в годы войны через великие испытания, собравшей огромный опыт, воспитавшей сотни тысяч механиков, техников и инженеров для технической эксплуатации боевой авиации.

Боевой устав<sup>1</sup>, наставления<sup>2,3,4,5,6,7</sup> [1] в советское время и федеральные авиационные

правила<sup>8</sup> в новое время определили назначение и задачи ИАС Вооруженных сил СССР и России, организацию инженерно-авиационного обеспечения, права и обязанности должностных лиц, установили общие правила эксплуатации и ремонта авиационной техники (АТ) при ведении боевых действий и при проведении боевой подготовки (рис. 1).

В них изложены вопросы обеспечения надежности АТ в эксплуатации, технической подготовки личного состава. Основная цель ИАС ВВС – грамотно эксплуатировать и обеспечивать безопасность полетов АТ, готовность выполнить приказ и задание – защитить интересы государства.

По мере демобилизации рядового, сержантского и офицерского состава из рядов Красной армии вновь создаваемая ИАС ГВФ пополнялась грамотными, высококвалифи-

<sup>1</sup> Боевой устав Военно-Воздушных Сил РККА. М.: Госвоениздат, 1931. 77 с.

<sup>2</sup> Наставление по инженерно-авиационной службе ВВС Красной Армии (НИАС-43). М.: Воениздат, 1943. 344 с.

<sup>3</sup> Наставление по инженерно-авиационной службе Военно-Воздушных сил Советской Армии: (НИАС-52): Правила эксплуатации техн. обслуживания и ремонта самолетов. М.: Воениздат, 1952. 184 с.

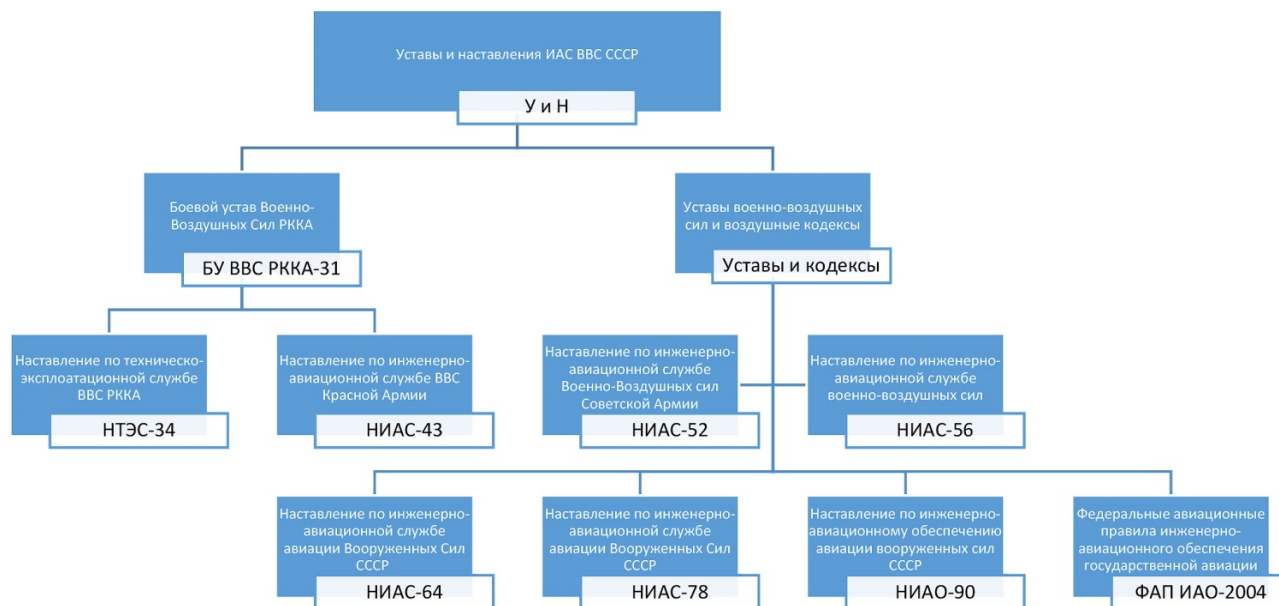
<sup>4</sup> Наставление по инженерно-авиационной службе военно-воздушных сил (НИАС-56). М.: Воениздат, 1956. 230 с.

<sup>5</sup> Наставление по инженерно-авиационной службе авиации Вооруженных Сил СССР (НИАС-64). М.: Воениздат, 1964. 302 с.

<sup>6</sup> Наставление по инженерно-авиационной службе авиации Вооруженных Сил СССР (НИАС-78). М.: Воениздат, 1978. 366 с.

<sup>7</sup> Наставление по инженерно-авиационному обеспечению авиации вооруженных сил СССР (НИАО-90). М.: Воениздат, 1991. 92 с.

<sup>8</sup> Федеральные авиационные правила инженерно-авиационного обеспечения государственной авиации (ФАП ИАО). М., 2005. 29 с.



**Рис. 1.** Уставы и наставления ИАС ВВС

**Fig. 1.** Regulations and instructions of the engineering and aviation service of the Air Force

цированными специалистами – ответственными и дисциплинированными кадрами. Лучшие традиции ИАС ВВС стали основой лучших традиций ИАС ГА. Войсковые авиационные ремонтные мастерские (ВАРМ), технико-эксплуатационные части (ТЭЧ) авиационных полков стали прототипом линейных эксплуатационно-ремонтных мастерских (ЛЭРМ), авиационных технических баз (АТБ) и авиационных ремонтных заводов (АРЗ) ГВФ.

В это время формировалась система высшего и среднего специального образования ГВФ. В 1947 году, после возвращения из эвакуации из Средней Азии на базе Киевского авиационного института был создан Киевский институт ГВФ им К.Е. Ворошилова. Впоследствии он стал Киевским институтом инженеров гражданской авиации (КИИ ГА), крупнейшим в СССР вузом, поставлявшим кадры в ИАС ГА.

В 1960 году в Риге открылся Рижский институт инженеров ГВФ, впоследствии Рижский институт инженеров гражданской авиации (РИИ ГА).

В 1968 году в Москве открылся филиал КИИ ГА, с 1971 года – Московский институт инженеров гражданской авиации (МИИ ГА), нынешний Московский государственный технический университет гражданской авиации (МГТУ ГА).

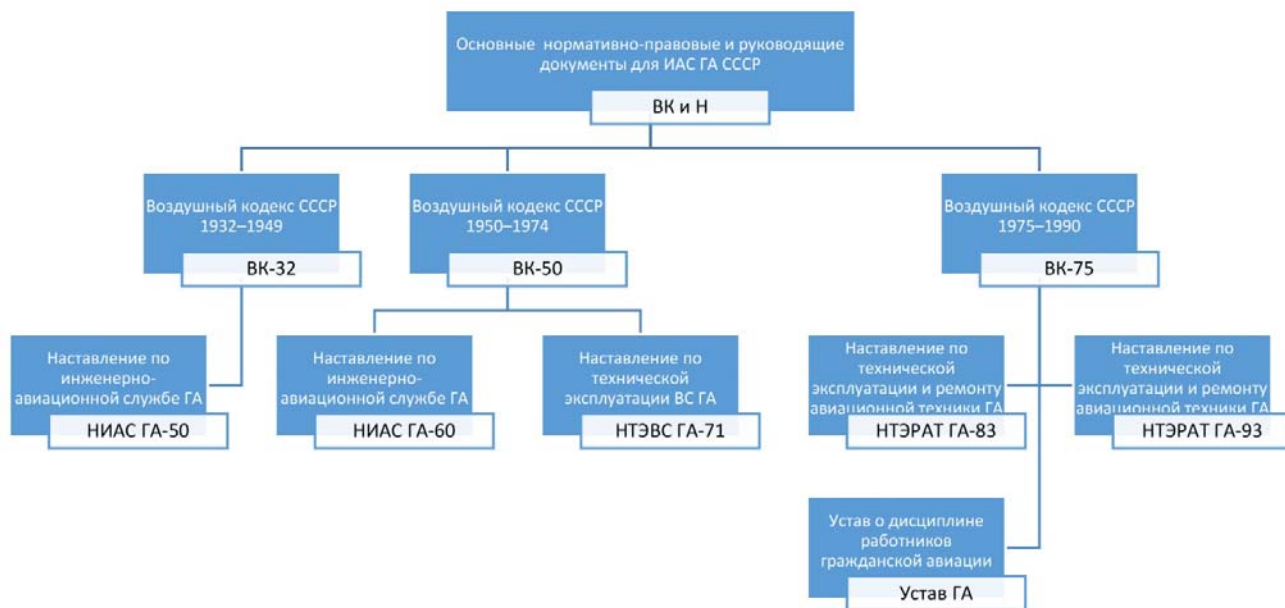
В трех вузах ГА готовились инженеры-механики, инженеры-электрики и радиоинженеры для ИАС ГА.

В 1947 году на базе Егорьевской школы авиации, образованной еще в 1918 году, создано среднее профессиональное учебное заведение по подготовке авиационных специалистов – нынешний Егорьевский авиационно-технический колледж. Впоследствии были созданы еще 13 авиационно-технических училищ для подготовки техников-механиков, техников-электриков и радиотехников для ИАС ГА.

Первое в истории гражданской авиации нашей страны «Наставление по инженерно-авиационной службе в гражданской авиации СССР» было введено в действие 21 августа 1950 года. По сути, это стало началом формирования современного облика ИАС ГА или, говоря современным языком, образования системы поддержания летной годности ВС гражданской авиации.

Юбилейные даты ИАС ГА – 60-летие и 70-летие широко отмечались и освещались в средствах массовой информации<sup>9,10,11,12</sup>.

<sup>9</sup> Приказ Росавиации № 276 от 20.07.2010. О 60-летию образования системы поддержания летной годности ВС в гражданской авиации [Электронный ресурс] // ФАВТ. 2010. URL: <https://special.favt.gov.ru/dokumenty-resheniya-rosaviacii/?id=246> (дата обращения: 25.03.2025).



**Рис. 2.** Воздушные кодексы СССР, устав и наставления ИАС ГА  
**Fig. 2.** Air Codes of the USSR, regulations and instructions of the engineering aviation service of the civil aviation

Семидесятипятилетний юбилей дал повод к написанию данной обзорной статьи. чтобы осмыслить тот путь, который прошла ИАС ГА от создания и формирования системы технической эксплуатации ВС ГА, в состав которой входит ИАС, до преобразования ее в систему поддержания летной годности. В статье проведен анализ советского периода деятельности ИАС – ее целей, задач, функций. Вторая статья будет посвящена анализу современного российского этапа деятельности ИАС и ее перспективам.

## Советский период деятельности ИАС ГА

Первое наставление по ИАС в ГА СССР было введено в действие приказом № 181 от 21 августа 1950 года начальника Главного управления ГВФ СССР маршала авиации С.Ф. Жаворонкова. В годы войны он командовал авиацией Военно-морского флота. В послевоенное время до 1957 года руководил гражданской авиацией СССР.

Основные нормативно-правовые и руководящие документы для ИАС ГА СССР показаны на рис. 2.

Таковыми документами являются: воздушный кодекс<sup>13,14</sup> [2, 3], устав о дисциплине работников гражданской авиации<sup>15</sup>, наставления<sup>16,17,18,19,20</sup>.

<sup>10</sup> 60 лет Инженерно-авиационной службе гражданской авиации России. С вводными поздравлениями руководителя Федерального агентства воздушного транспорта А.В. Нерадько. М.: МСК-реклама, 2010. 10 с.

<sup>11</sup> 60 лет создания системы поддержания летной годности гражданских воздушных судов – инженерно-авиационной службы гражданской авиации [Электронный ресурс] // КИРФ. 2010. URL: [https://kprf.ru/rus\\_soc/81895.html](https://kprf.ru/rus_soc/81895.html) (дата обращения: 25.03.2025).

<sup>12</sup> 70 лет со дня образования отечественной системы поддержания летной годности ВС гражданской авиации [Электронный ресурс] // ФАВТ. 2020. URL: <https://favt.gov.ru/novosti-novosti?id=6839> (дата обращения: 25.03.2025).

<sup>13</sup> Воздушный кодекс СССР [Электронный ресурс] // Aerohelp. URL: [https://aerohelp.ru/sysfiles/402\\_6.pdf](https://aerohelp.ru/sysfiles/402_6.pdf) (дата обращения: 25.03.2025).

<sup>14</sup> Воздушный кодекс СССР [Электронный ресурс] // Гарант. 1983. URL: <https://base.garant.ru/3974188/> (дата обращения: 25.03.2025).

<sup>15</sup> Постановление Совета Министров СССР от 04.05.1975. Об утверждении Устава о дисциплине работников гражданской авиации [Электронный ресурс] // Historyrussia.ru. URL: <https://docs.historyrussia.org/ru/nodes/356008-postanovlenie-soveta-ministrov-sssr-4-maya-1975-g-ob-utverzhdenii-ustava>

Наставление НИАС ГА-50 впервые регламентировало эксплуатацию (применение) авиационной техники (АТ), техническое обслуживание, хранение и текущий ремонт материальной части и определило цель *обеспечить ее надежную работу и безопасность полетов самолетов*. В наставлении сформулированы основные задачи ИАС ГА (рис. 3)<sup>21</sup>.

Наставление НИАС ГА-50 впервые определило основные функции ИАС ГА (рис. 4), здесь впервые введено понятие «техническая эксплуатация», которое наряду с техническим обслуживанием включает буксировку, заправку, загрузку, запуск моторов, предполетную подготовку, выпуск самолета в полет, контроль в полете, встречу самолета после полета и приемку его у экипажа.

В наставлении НИАС ГА-50 впервые сформулировано основное требование, состоящее в том, что в полет могут выпускаться только исправные самолеты. В последующем это требование было закреплено в Воздушном кодексе (рис. 5).

ВС может быть допущено к эксплуатации лишь после того, как будет установлено, что оно удовлетворяет требованиям безопасности полетов. При этом:

- ВС новой конструкции допускается к эксплуатации лишь после проведения госу-



Рис. 3. Основные задачи ИАС ГА по НИАС ГА-50  
Fig. 3. Main tasks of the engineering aviation service of the civil aviation according to MAES CA-50

дарственных и эксплуатационных испытаний;

- ВС принятой конструкции допускается к эксплуатации лишь после проведения заводских испытаний;

- в случае изменения конструкции воздушного судна, а равно после производства ремонта и по истечении определенного периода эксплуатации судна оно подлежит новому испытанию в установленном порядке.

На основании произведенных испытаний выдается удостоверение о годности судна к полетам.

Второе наставление по ИАС в ГА СССР было введено в действие Приказом № 363 от 4 июля 1959 года начальника Главного управления ГВФ СССР генерал-полковника авиации Е.Ф. Логинова. В годы войны он командовал бомбардировочным авиационным корпусом воздушной армии. Возглавил Главное управление ГВФ в 1959 году, а после его преобразования в Министерство ГА стал первым министром ГА и работал в этой должности до 1970 года.

o-distsipline-rabotnikov-grazhdanskoy-aviatsii (дата обращения: 25.03.2025).

<sup>16</sup> Наставление по инженерно-авиационной службе в гражданской авиации СССР 1950 (НИАС ГА-50). М., 1951. 276 с.

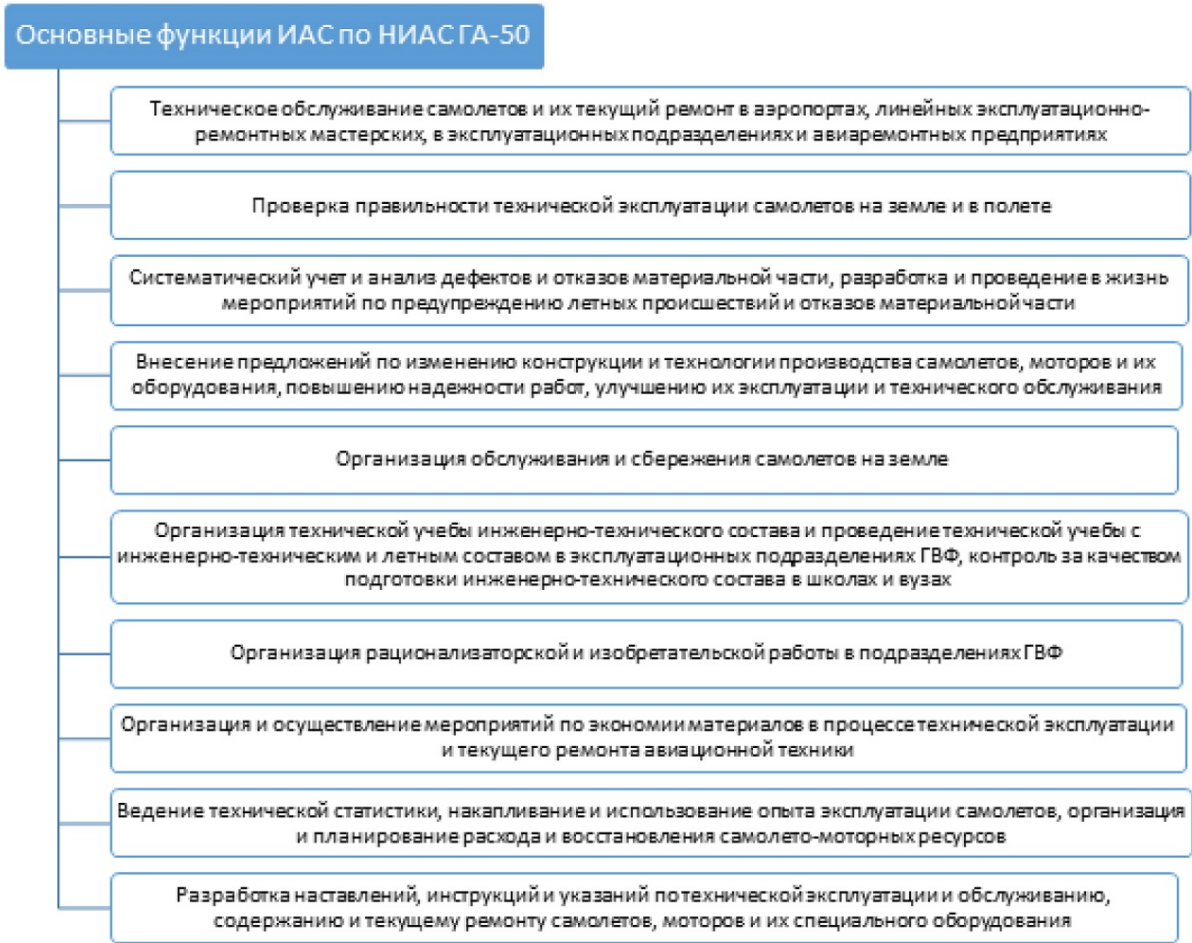
<sup>17</sup> Наставление по инженерно-авиационной службе в гражданской авиации СССР 1960 (НИАС ГА-60). М., 1960. 232 с.

<sup>18</sup> Наставление по технической эксплуатации ВС в гражданской авиации СССР (НТЭВС-71). М., 1972. 210 с.

<sup>19</sup> Наставление по технической эксплуатации и ремонту авиационной техники в гражданской авиации России (НТЭРАТ ГА-83). М.: Воздушный транспорт, 1985. 368 с.

<sup>20</sup> Наставление по технической эксплуатации и ремонту авиационной техники в гражданской авиации России (НТЭРАТ ГА-83). М.: Воздушный транспорт, 1985. 152 с.

<sup>21</sup> Наставление по инженерно-авиационной службе в гражданской авиации СССР 1950 (НИАС ГА-50). М., 1951. 276 с.



**Рис. 4.** Основные функции ИАС ГА по НИАС ГА-50  
**Fig. 4.** Main functions of the engineering aviation service of the civil aviation according to MAES CA-50



**Рис. 5.** Условия допуска ВС к эксплуатации по ВК СССР  
**Fig. 5.** Conditions for aircraft release to service according to the USSR Air Code



Рис. 6. Основные функции ИАС ГА по НИАС ГА-60

Fig. 6. Main functions of the engineering aviation service of the civil aviation according to MAES CA-60

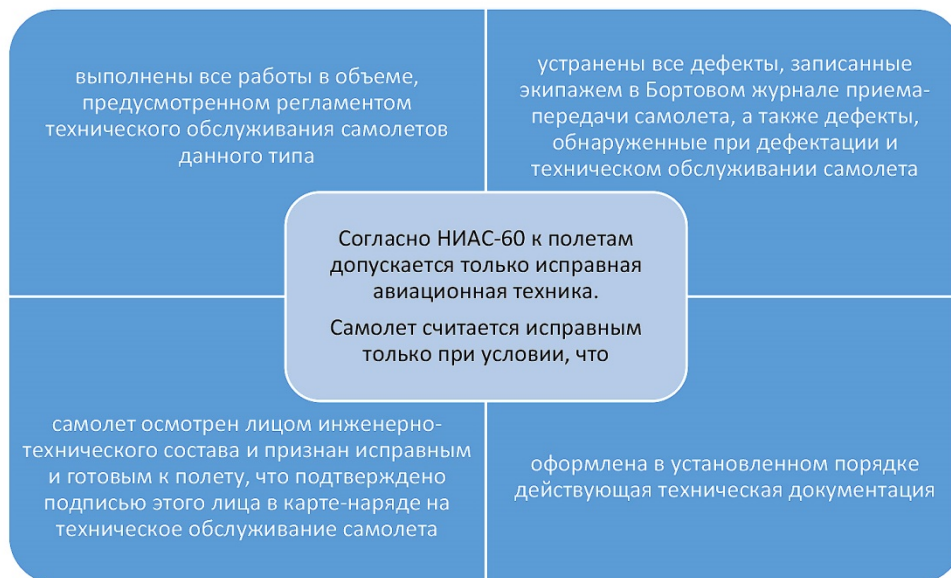
Наставление НИАС ГА-60 определило основные функции ИАС ГА (рис. 6)<sup>22</sup>, здесь впервые определена структура состояний и процессов технической эксплуатации (рис. 7), подтверждено основное требование о том, что к полетам допускается только исправная авиационная техника (рис. 8).

<sup>22</sup> Наставление по инженерно-авиационной службе в гражданской авиации СССР 1960 (НИАС ГА-60). М., 1960. 232 с.

Третье наставление по ИАС в ГА СССР получило новое наименование: «Наставление по технической эксплуатации ВС в гражданской авиации СССР (НТЭВС-71)». Оно было введено в действие Приказом № 470 от 9 сентября 1971 года Министра гражданской авиации Союза ССР генерал-полковника авиации, впоследствии Главного маршала авиации Б.П. Бугаева. В годы войны он пилот, командир звена авиаотряда. Министр гражданской авиации с 1970 по 1987 год.



**Рис. 7.** Состояния и процессы ТЭ по НИАС ГА-50  
**Fig. 7.** Conditions and processes of technical operation according to MAES CA-50



**Рис. 8.** Условия допуска самолета к полетам по НИАС ГА-60  
**Fig. 8.** Conditions for aircraft airworthiness according to MAES CA-60

Наставление НТЭВС-71 по-новому определило основные задачи ИАС ГА (рис. 9) и основные функции ИАС ГА (рис. 10)<sup>23</sup>.

В наставлении НТЭВС-71 определена структура состояний и процессов технической

эксплуатации (рис. 11), в нем вновь подтверждено основное требование о том, что к полетам допускаются только исправные самолеты. Самолет считается исправным если выполнены условия, представленные на рис. 12<sup>24</sup>.

<sup>23</sup> Наставление по технической эксплуатации ВС в гражданской авиации СССР (НТЭВС-71). М., 1972. 210 с.

<sup>24</sup> Наставление по технической эксплуатации ВС в гражданской авиации СССР (НТЭВС-71). М., 1972. 210 с.

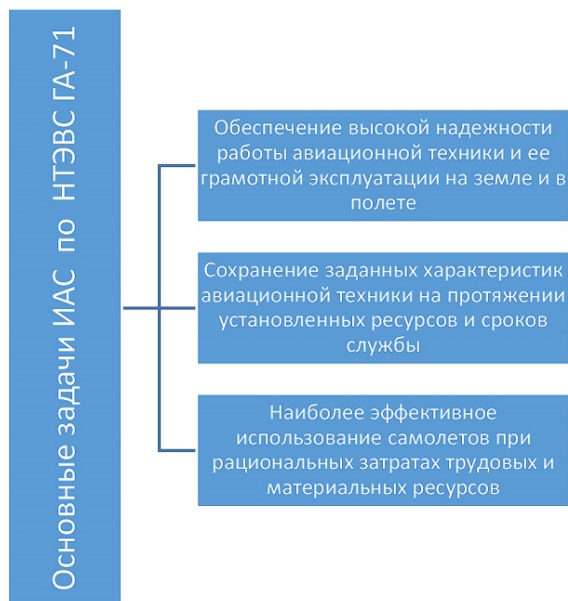


Рис. 9. Основные задачи ИАС ГА по НТЭВС ГА-71

Fig. 9. Main tasks of the engineering aviation service of the civil aviation according to MAES CA-71

Согласно Воздушному кодексу СССР – 1983 гражданское ВС может быть допущено к эксплуатации лишь после того, как будет установлено, что оно соответствует нормам летной годности (рис. 13). При этом:

- ВС новой конструкции (нового типа) должно пройти заводские, государственные и эксплуатационные испытания и получить от Государственной комиссии по надзору за безопасностью полетов ВС при Совете Министров СССР сертификат летной годности, если по результатам указанных испытаний будет установлено, что данный тип воздушного судна соответствует нормам летной годности гражданских ВС, действующим в СССР;
- каждое ВС принятой конструкции проходит в установленном порядке необходимые испытания и проверки, на основании которых выдается удостоверение о годности воздушного судна к полетам. Без такого удостоверения ВС не может быть допущено к эксплуатации;
- в случае изменения конструкции воздушного судна, при котором не требуется получения нового сертификата летной годности, а также после ремонта или по истечении

установленного периода серийного производства либо эксплуатации судно подлежит новому испытанию в установленном порядке;

- поддержание каждого воздушного судна в процессе эксплуатации в состоянии, отвечающем требованиям норм летной годности, возлагается на министерства, государственные комитеты, ведомства, предприятия, учреждения и организации, осуществляющие эксплуатацию судна.

В 1974 году были введены в действие Нормы летной годности ВС (НЛГС-2). В 1975 году на базе ГосНИИ ГА был образован ГосНИИ эксплуатации и ремонта АТ ГА (ГосНИИ ЭРАТ ГА). Позднее был создан ГосНИИ Аэронавигация. Широко развернулись научно-исследовательские работы в области технической эксплуатации ВС и бортового оборудования как составная часть деятельности ИАС.

Четвертое наставление по ИАС в ГА СССР «Наставление по технической эксплуатации и ремонту авиационной техники в гражданской авиации СССР (НТЭРАТ ГА-83)» было разработано Государственным научно-исследовательским институтом гражданской авиации (ГосНИИ ГА) и Главным управлением эксплуатации и ремонта авиационной техники (ГУЭРАТ) Министерства гражданской авиации (МГА) в двух книгах и введено в действие Приказом № 241 от 27 декабря 1983 года министра гражданской авиации Союза ССР Главного маршала авиации Б.П. Бугаева.

В наставлении определена система технической эксплуатации (СТЭ) как совокупность:

- объектов АТ;
- авиационного персонала, осуществляющего техническую эксплуатацию АТ;
- эксплуатационной документации, устанавливающей методы, правила и организацию эксплуатации;
- наземных сооружений, материальных и топливно-энергетических ресурсов, технологического оборудования, средств наземного обслуживания<sup>25</sup>.

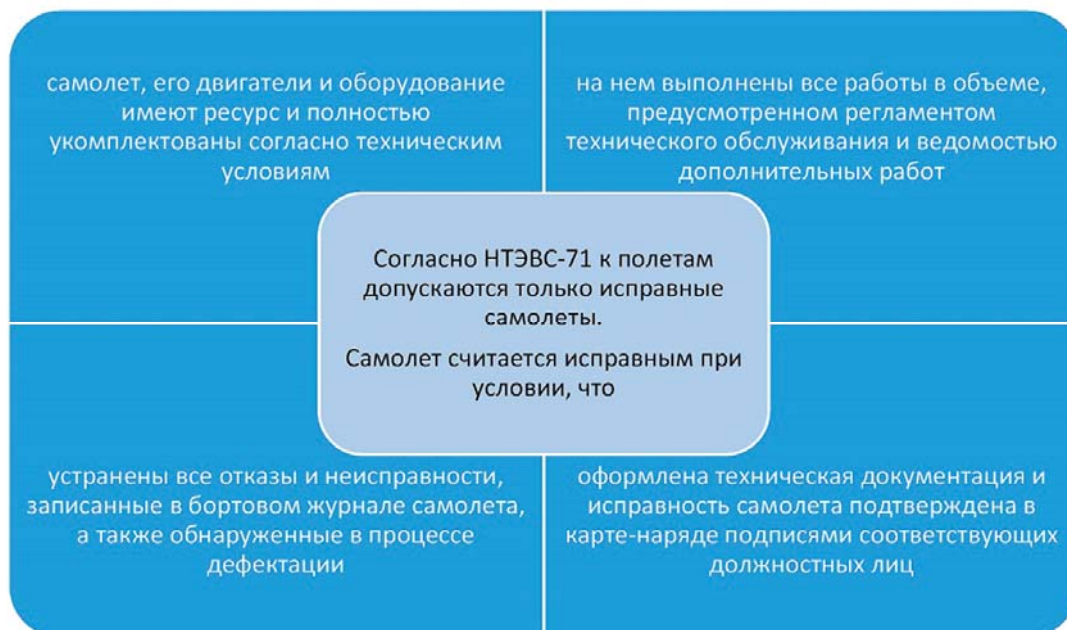
<sup>25</sup> Наставление по технической эксплуатации и ремонту авиационной техники в гражданской авиации России (НТЭРАТ ГА-83). М., 1985. 368 с.



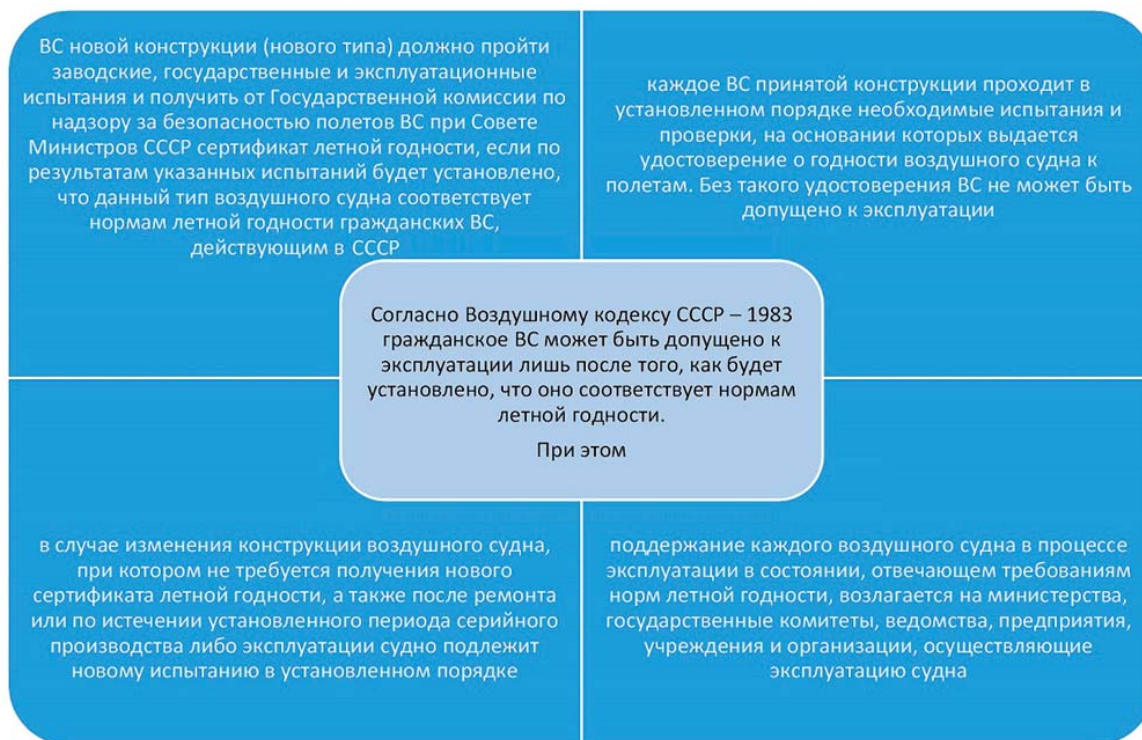
Рис. 10. Основные функции ИАС ГА по ИИАС ГА-71  
Fig. 10. The main functions of the engineering aviation service of the civil aviation according to MAES CA-71



**Рис. 11.** Состояния и процессы ТЭ по НИАС ГА-71  
**Fig. 11.** Conditions and processes of technical operation according to MAES CA-71



**Рис. 12.** Условия допуска самолета к полетам по НТЭВС ГА-71  
**Fig. 12.** Conditions for aircraft airworthiness according to MAES CA 71



**Рис. 13.** Условия допуска ВС к эксплуатации по последней редакции Воздушного кодекса СССР  
**Fig. 13.** Conditions for aircraft release to service according to the USSR Air Code latest version

Наставление НТЭРАТ ГА-83 сформулировало основные цели СТЭ, которая должна обеспечивать:

- безопасность и регулярность полетов ВС, надежность и исправность АТ, своевременную и полную подготовку ВС к полетам, правильную эксплуатацию их на земле и в полете;
- сохранение летно-технических характеристик ВС на протяжении установленных ресурсов и сроков службы в пределах, определяемых Нормами летной годности;
- эффективное использование ВС при экономичных затратах трудовых, материальных и топливно-энергетических ресурсов<sup>26</sup>.

Наставление НТЭРАТ ГА-83 по-новому определило основные задачи ИАС ГА (рис. 14) и основные функции ИАС ГА (рис. 15)<sup>27</sup>.



**Рис. 14.** Основные задачи ИАС ГА по НТЭРАТ ГА-83

**Fig. 14.** The main tasks of the engineering aviation service of the civil aviation according to MAES CA-83

<sup>26</sup> Наставление по технической эксплуатации и ремонту авиационной техники в гражданской авиации России (НТЭРАТ ГА-83). М., 1985. 368 с.

<sup>27</sup> Наставление по технической эксплуатации и ремонту авиационной техники в гражданской авиации России (НТЭРАТ ГА-83). М., 1985. 368 с.

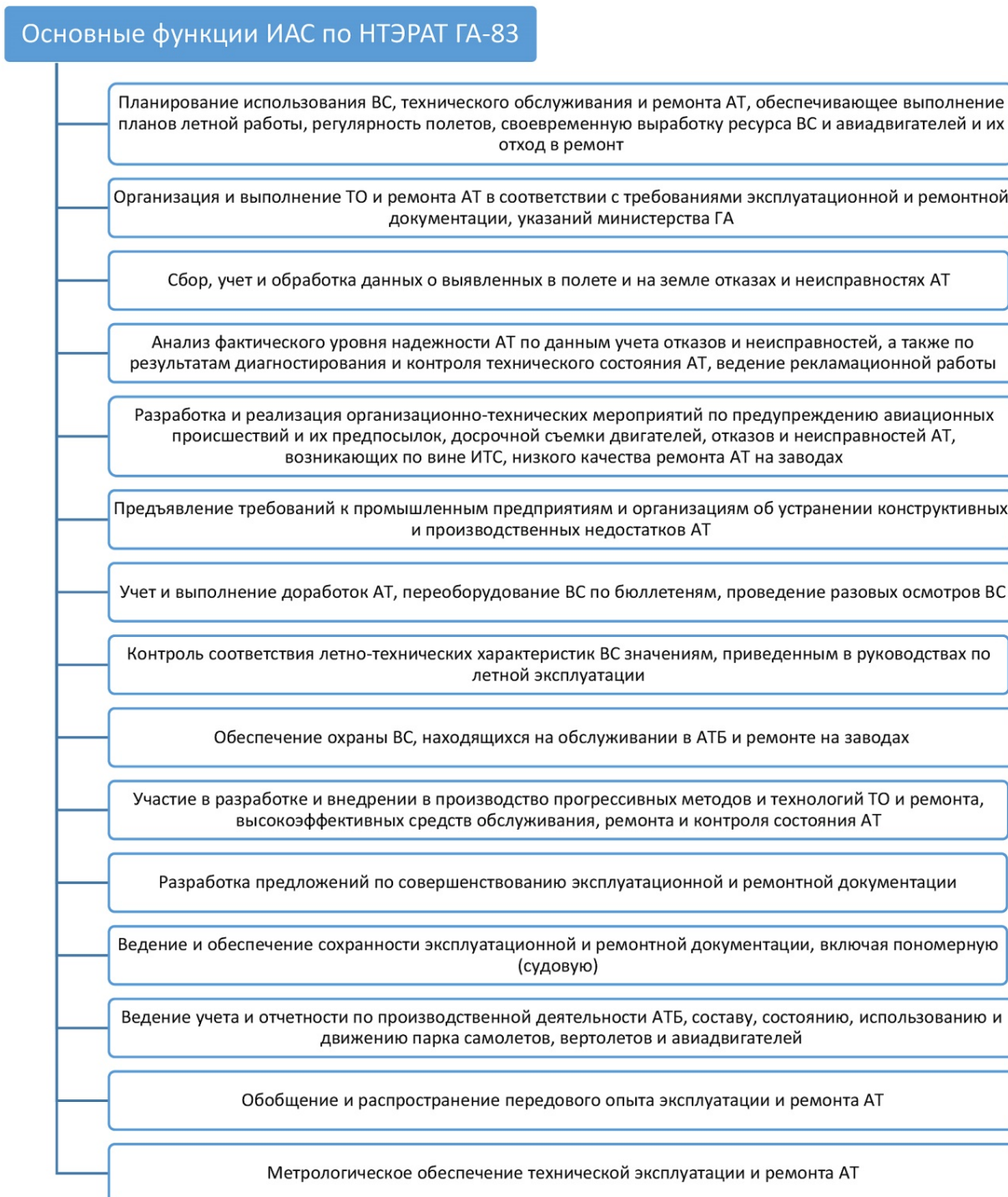
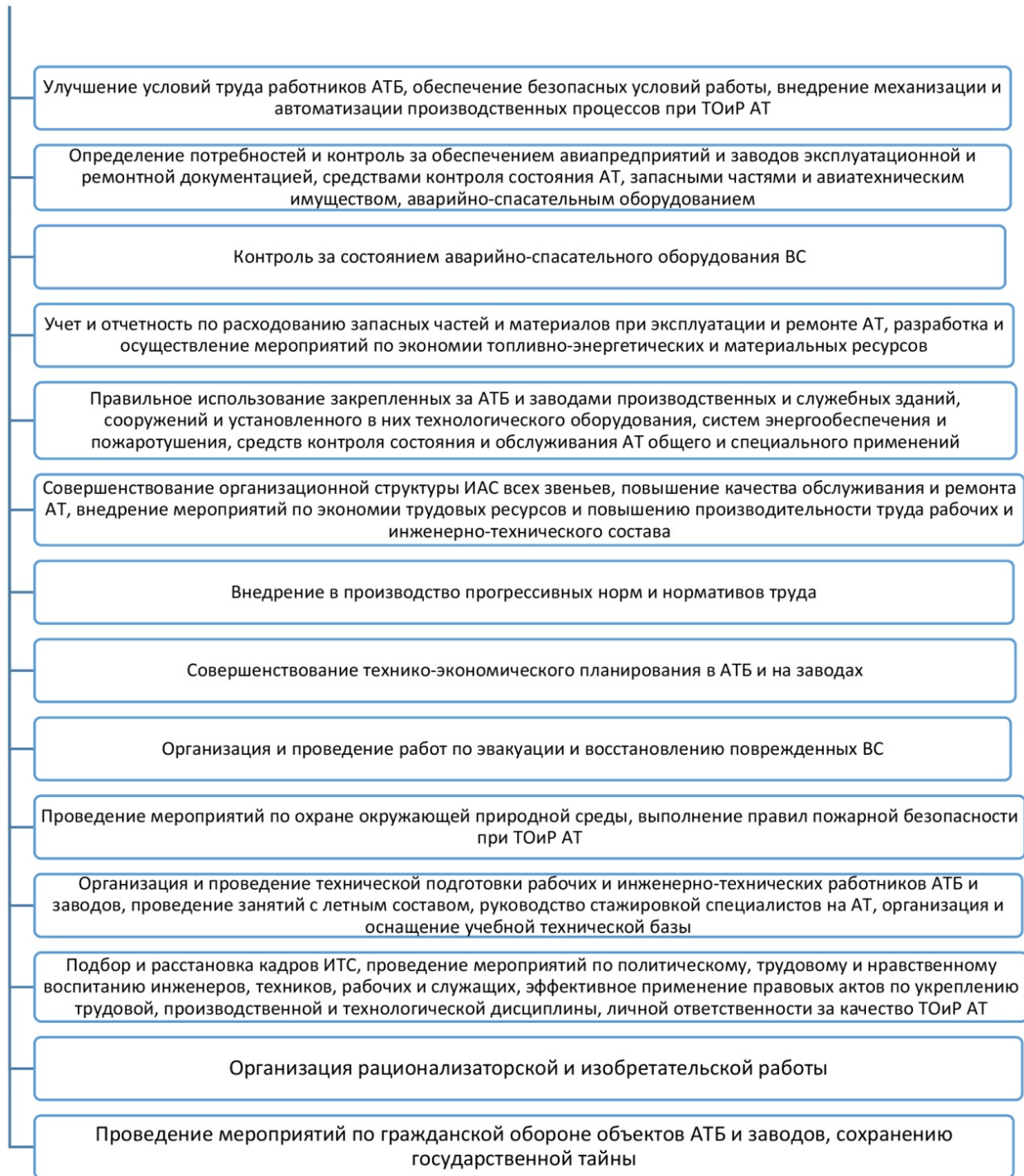


Рис. 15. Основные функции ИАС ГА по НТЭРАТ ГА-83

Fig. 15. The main functions of the engineering aviation service of the civil aviation according to MAES CA-83



Продолжение рис. 15. Основные функции ИАС ГА по НТЭРАТ ГА-83

Fig. 15. Continued. The main functions of the engineering aviation service of the civil aviation according to MAES CA-83

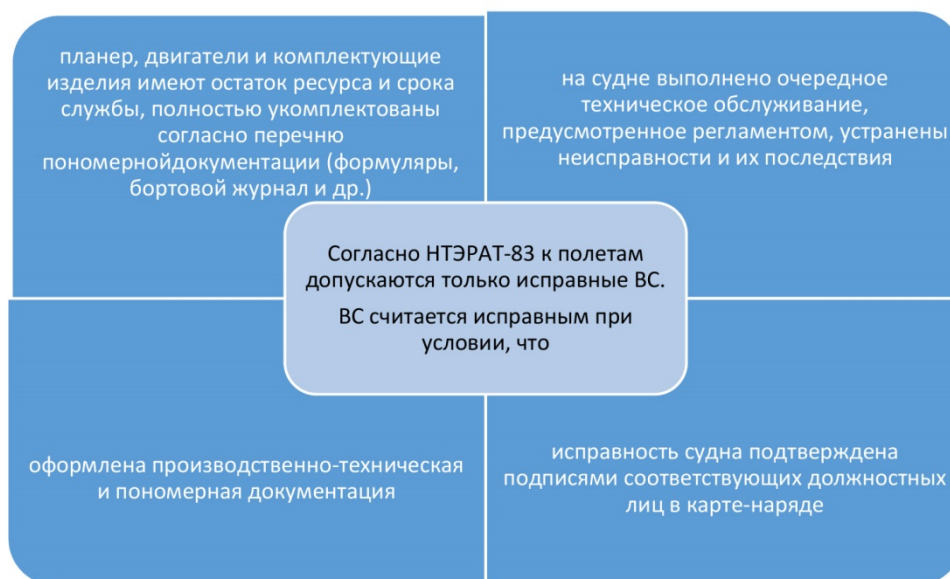
## Заключение

Проведенный анализ деятельности ИАС ГА в советский период на основе главных нормативных документов по вопросам техниче-

ской эксплуатации и ремонта АТ, а также классических трудов ученых из ИАС ВВС [4–7] и ИАС ГА [6, 8–12] показал, что за 40 лет с момента образования эта служба в составе десятков тысяч специалистов прошла большой путь и сложилась в систему техниче-



**Рис. 16.** Состояния и процессы технической эксплуатации по НТЭРАТ ГА-83  
**Fig. 16.** Conditions and processes of technical operation according to MAES CA-83



**Рис. 17.** Условия допуска самолета к полетам по НТЭРАТ ГА-83  
**Fig. 17.** Conditions for aircraft airworthiness according to MAES CA-83

ской эксплуатации, обеспечивающую достижение поставленных целей путем решения важных задач и выполнения разнообразных функций.

Цели, задачи и функции ИАС формулировались по-разному, видоизменялись, дополнялись, но всегда были направлены на обеспечение безопасности полетов, достижение

целей, решение задач и выполнение функций авиатранспортной отрасли.

Ключевым вопросом деятельности ИАС является вопрос, какой самолет (или ВС) может быть допущен в полет [13]. В советский период деятельности ИАС ГА ответ был однозначный – только исправный самолет (или ВС) может быть допущен в полет.

В это время в международной ГА формировалась парадигма поддержания летной годности, в рамках которой ответ на этот вопрос формулируется иначе: в полет может быть допущено только пригодное к безопасному полету ВС. Для этого ВС должно иметь действующий сертификат летной годности и пройти техническое обслуживание, завершающееся сертификационной процедурой.

В связи с появлением в российских авиакомпаниях зарубежных типов ВС, использование которых по международным требованиям должно происходить путем поддержания летной годности, парадигма деятельности отечественной ИАС изменилась.

Более того, сами термины «инженерно-авиационная служба» и «техническая эксплуатация» ушли в прошлое.

Чтобы предотвратить повторение авиационных происшествий, а также снизить число инцидентов, Росавиация тщательно анализирует каждое авиационное происшествие и на основе результатов расследований вносит корректировки в дальнейшую работу. Для этих же целей регулярно проводятся отраслевые конференции по особенностям летной и технической эксплуатации воздушных судов, в том числе в рамках работы летно-методического совета [14].

Для МГТУ ГА и входящих в его состав колледжей, продолжающих подготовку инженеров, бакалавров, магистров и техников по технической эксплуатации, особенно в перспективе перехода на новые федеральные образовательные стандарты на основе профессиональных стандартов, принципиально важными являются ответы на вопросы, чем вновь формируемая система поддержания летной годности отличается от традиционной системы технической эксплуатации, а также как должны измениться (или почему должны сохраниться) названия направлений и специальностей в университете, содержание обучения, чтобы выпускники обладали необходимыми компетенциями и могли удовлетворить возрастающий спрос эксплуатационных предприятий и организаций на высококвалифицированные кадры. Ответам на эти вопросы будет посвящена вторая часть статьи.

## Список литературы

1. **Смолин А.П., Каперский В.П., Постнов И.В.** Наставление по техническо-эксплуатационной службе ВВС РККА / Под ред. А.П. Смолина. М.: Гос. воен. изд-во, 1933. 199 с.
2. **Виноградов А.В.** Воздушный кодекс СССР: с ком. и постатейно-систематизированными материалами / А.В. Виноградов, А.В. Кучкель, Л.А. Цеханович, А.А. Штипельман; под ред. и с предисл. А.В. Виноградова. М.: РИО Аэрофлота, 1938. 176 с.
3. **Виноградов А.В., Кучкель А.В.** Воздушный кодекс СССР: с ком. и постатейно-систематизированными материалами. М.: РИО Аэрофлота, 1949. 219 с.
4. **Александров А.В., Выржиковский Б.В., Галенко В.Г. и др.** Техническая эксплуатация авиационной техники. М.: Военное издательство, 1967. 416 с.
5. **Максимов Н.А.** Инженерно-авиационная служба и эксплуатация летательных аппаратов / Н.А. Максимов, С.А. Боборыкин, А.И. Виноградов, В.П. Кузьмин: под ред. Н.А. Максимова. Киев: КВИАВУ ВВС, 1969. 468 с.
6. **Пугачев А.И., Смирнов Н.Н., Черненко Ж.С. и др.** Техническая эксплуатация летательных аппаратов. М.: Транспорт, 1969. 480 с.
7. **Акиннеев А.Е.** Инженерно-авиационная служба и эксплуатация авиационного оборудования / А.Е. Акиннеев, В.Д. Константинов, С.В. Крауз, Е.А. Румянцев, Н.П. Сергеев, И.М. Синдеев; под ред. Е.А. Румянцева. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1970. 514 с.
8. **Техническая эксплуатация летательных аппаратов / Под ред. А.И. Пугачева.** М.: Транспорт, 1977. 440 с.
9. **Воробьев В.Г., Константинов В.Д.** Техническая эксплуатация авиационного оборудования. М.: Транспорт, 1990. 296 с.
10. **Воробьев В.Г., Зыль В.П., Кузнецов С.В.** Основы теории технической эксплуатации пилотажно-навигационного оборудования. М.: Транспорт, 1999. 336 с.

11. Смирнов Н.Н., Чинючин Ю.М. Основы теории технической эксплуатации летательных аппаратов: учебник. М.: МГТУ ГА, 2015. 579 с.

12. Чинючин Ю.М. Летная годность воздушных судов в системе управления безопасностью полетов: монография. Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. 188 с.

13. Кузнецов С.В. Техническая эксплуатация авиационных электросистем и авионики в системе поддержания летной годности ВС // XII Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского. М.: МГТУ ГА, 2024. С. 463–470.

14. Ядров Д.В. Доклад о результатах деятельности Росавиации за 2024 год, целях и задачах на 2025 год и плановый период до 2027 года. На коллегии Росавиации обсудили планы на будущее отрасли [Электронный ресурс] // ФАВТ. URL: <https://old.favt.gov.ru/novosti-novosti/?id=14968> (дата обращения: 25.03.2025).

## References

1. Smolin, A.P., Kapersky, V.P., Postnov, I.V. (1933). Manual on the technical and operational service of the Red Army Air Forces, in A.P. Smolin (Ed.). Moscow: Gosudarstvennoye voyennoye izdatelstvo, 199 p. (in Russian)

2. Vinogradov, A.V., Kuchkel, A.V., Tsekhanovich, L.A., Shtipelman, A.A. (1938). Air Code of the USSR: with commentary and article-by-article systematized materials, in A.V. Vinogradov (Ed.). Moscow: RIO Aeroflota, 176 p. (in Russian)

3. Vinogradov, A.V., Kuchkel, A.V. (1949). Air Code of the USSR: with commentary and article-by-article systematized materials. Moscow: RIO Aeroflot, 219 p. (in Russian)

4. Aleksandrov, A.V., Vyrzhikovskiy, B.V., Galenko, V.G. et al. (1967). Technical operation of aviation equipment. Moscow: Voyennoye izdatelstvo, 416 p. (in Russian)

5. Maksimov, N.A., Boborykin, S.A., Vinogradov, A.I., Kuzmin, V.P. (1969). Engi-

neering aviation service and aircraft operation, in N.A. Maksimov (Ed.). Kiev: KVIYAVU VVS, 468 p. (in Russian)

6. Pugachev, A.I., Smirnov, N.N., Chernenko, Zh.S. et al. (1969). Technical operation of an aircraft. Moscow: Transport, 480 p. (in Russian)

7. Akindeev, A.E., Konstantinov, V.D., Krauz, S.V., Rumyantsev, E.A., Sergeev, N.P., Sindeev, I.M. (1970). Engineering aviation service and operation of aviation equipment, in E.A. Rumyantsev (Ed.). Moscow: VVIA im. prof. N.E. Zhukovskogo, 514 p. (in Russian)

8. Pugachev, A.I. (Ed.). (1977). Technical operation of an aircraft. Moscow: Transport, 440 p. (in Russian)

9. Vorobyov, V.G., Konstantinov, V.D. (1990). Technical operation of aviation equipment. Moscow: Transport, 296 p. (in Russian)

10. Vorobyov, V.G., Zyl, V.P., Kuznetsov, S.V. (1999). Fundamentals of the theory of technical operation of flight and navigation equipment. Moscow: Transport, 336 p. (in Russian)

11. Smirnov, N.N., Chinyuchin, Yu.M. (2015). Fundamentals of the theory of technical operation of aircraft: Textbook. Moscow: MGTU GA, 579 p. (in Russian)

12. Chinyuchin, Yu.M. (2024). Airworthiness of the aircraft in the flight safety management system: Monograph. Vologda: Infra-Engineering, 188 p. (in Russian)

13. Kuznetsov, S.V. (2024). Technical operation of aviation electrical systems and avionics in the airworthiness maintenance system of the aircraft. In: *XII Scientific Readings on Aviation in the Memory of N.E. Zhukovskogo*. Moscow: MGTU GA, pp. 463–470. (in Russian)

14. Yadrov, D.V. (2024). Report on the results of Rosaviatsia's activities for 2024, goals and objectives for 2025 and the planned period until 2027. Plans for the future of the industry were discussed at the Rosaviatsia board. *FAVT*. Available at: <https://old.favt.gov.ru/novosti-novosti/?id=14968> (accessed: 25.03.2025). (in Russian)

## Сведения об авторах

**Кузнецов Сергей Викторович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической эксплуатации авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов МГТУ ГА, s.kuznetsov@mstuca.ru.

**Ядров Дмитрий Викторович**, руководитель Федерального агентства воздушного транспорта, pressa@favt.gov.ru.

## Information about the authors

**Sergey V. Kuznetsov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Technical Operation of Aviation Electrical Systems and Flight and Navigation Complexes Department, Moscow State Technical University of Civil Aviation, s.kuznetsov@mstuca.ru.

**Dmitry V. Yadrov**, The Head of the Federal Air Transport Agency, pressa@favt.gov.ru.

Поступила в редакцию	15.04.2025	Received	15.04.2025
Одобрена после рецензирования	12.05.2025	Approved after reviewing	12.05.2025
Принята в печать	24.07.2025	Accepted for publication	24.07.2025

**ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ**

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

**2.9.4. – Управление процессами перевозок;**

**2.9.6 – Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники;**

**2.9.8 – Интеллектуальные транспортные системы**

УДК: 656.7.084.12

DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-4-26-39

## **Bird detection in the airfield area as a factor in ensuring ornithological safety of aircraft flights**

**A.V. Vlasova<sup>1</sup>, B.P. Eliseev<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

**Abstract:** The article considers the problem of ensuring ornithological safety of aircraft flights in the aerodrome area, where collisions with birds pose a serious threat that can lead to serious consequences in the form of an aviation accident or an aviation incident. Also, such collisions often lead to significant financial losses for airports, airlines, and insurance companies. The purpose of the study is to analyze the existing bird detection system in the aerodrome area, assess the quality of these systems and develop recommendations for improving the efficiency of using systems that ensure ornithological safety. The article considers various methods of bird detection: visual observation, acoustic systems, radar systems. An assessment of the effectiveness of the methods is given taking into account the accuracy, range and applicability in various conditions. The methods of statistical data analysis, analysis of the probability of occurrence of a dangerous factor are applied. The study revealed the need to use special ornithological radar stations with improved detection range and automatic target recognition, as well as the use of acoustic systems to detect birds in adverse weather conditions. The importance of continuous monitoring of the ornithological situation in the airfield area and timely decision-making in the event of a dangerous factor is noted. To effectively ensure ornithological safety of aircraft flights, it is necessary to implement a comprehensive system that combines modern detection technologies, automated warning systems and bird scaring methods developed for each airport. Further research based on this work should be aimed at developing more accurate and effective radars in terms of bird detection range and improving the methods of forecasting and identifying the likelihood of a dangerous factor and a risk factor.

**Key words:** ornithological flight safety, aerodrome, dangerous factor, risk factor, radar systems, acoustic systems, visual observation.

**For citation:** Vlasova, A.V., Eliseev, B.P. (2025). Bird detection in the airfield area as a factor in ensuring ornithological safety of aircraft flights. Civil Aviation High Technologies, vol. 28, no. 4, pp. 26–39. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-4-26-39

## **Обнаружение птиц в районе аэродрома как фактор обеспечения орнитологической безопасности полетов воздушных судов**

**А.В. Власова<sup>1</sup>, Б.П. Елисеев<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Московский государственный технический университет гражданской авиации,  
г. Москва, Россия*

**Аннотация:** В статье рассматривается проблема обеспечения орнитологической безопасности полетов воздушных судов (ВС) в районе аэродрома, где столкновения с птицами представляют серьезную угрозу, которая может привести к тяжелым последствиям в виде авиационного происшествия или авиационного инцидента. Также подобные столкновения часто приводят к значительным финансовым потерям аэропортов, авиакомпаний, страховых компаний.

Целью исследования является анализ существующей системы обнаружения птиц в районе аэродрома, оценка качества функционирования этих систем и разработка рекомендаций по повышению эффективности использования систем, обеспечивающих орнитологическую безопасность. В статье рассмотрены различные методы обнаружения птиц: визуальное наблюдение, акустические системы, радиолокационные системы. Дана оценка эффективности методов с учетом точности, дальности и применимости в различных условиях. Применены методы статистического анализа данных, анализа вероятности возникновения появления опасного фактора. В рамках исследования было выявлено, что необходимо использование специальных орнитологических радиолокационных станций с улучшенной дальностью обнаружения и автоматическим распознаванием целей, а также применение методов акустических систем для обнаружения птиц в сложных метеоусловиях. Отмечается важность постоянного мониторинга орнитологической обстановки в зоне аэродрома и своевременного принятия решений в случае появления опасного фактора. Для эффективного обеспечения орнитологической безопасности полетов ВС необходимо внедрение комплексной системы, сочетающей в себе современные технологии обнаружения, автоматизированные системы оповещения и отработанные для каждого аэропорта методы отпугивания птиц. Дальнейшие исследования, основанные на материале данной статьи, должны быть направлены на разработку более точных и эффективных с точки зрения дальности обнаружения птиц радиолокаторов, а также на совершенствование методов прогнозирования и выявления вероятности возникновения опасного фактора и фактора риска.

**Ключевые слова:** орнитологическая безопасность полетов, аэродром, опасный фактор, фактор риска, радиолокационные системы, акустические системы, визуальное наблюдение.

**Для цитирования:** Власова А.В., Елисеев Б.П. Обнаружение птиц в районе аэродрома как фактор обеспечения орнитологической безопасности полетов воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 4. С. 26–39. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-4-26-39

## Introduction

The main purpose of air transportation is to ensure flight safety. Flight safety consists of minimizing risks and preventing aviation incidents using modern technologies, inspections, controls and strict safety standards. Annually, the damage to global aviation from bird strikes reaches 1.2 billion US dollars. Therefore, it is necessary to develop a system of measures to detect and scare away birds in the airfield area. Studies have shown that in 45% of recorded cases of such collisions, birds enter the engine (engines) of the aircraft, which can lead to its failure, fire or surge, and in 12% of cases, they enter the radome or flight deck windows, which under certain conditions threatens to depressurize the aircraft. The main problem is the detection of birds at night and in bad weather conditions. At the moment, there are no absolutely reliable technical means for completely scaring away birds from the airspace and the territory surrounding the airfield [1]. The effective prevention of aircraft-bird strikes requires an integrated approach based on timely bird detection and bird awareness. This paper examines current bird identification and detection technologies and discusses their potential application at airports to reduce the risk of strikes.

Paper [2] provides data that since 2004 the total number of ornithological aviation incidents and accidents in the Russian Federation in relation to the USA, per 100 thousand takeoffs and landings, has been significantly higher. For the Russian Federation, this figure was 1.55 in 2004, and in the USA in 2008 – 1.16, i.e. the difference was 1.34 times, and in 2017 this difference was already 1.52 and 3.71, i.e. it increased by 2.44 times.

In other words, our gap in safety indicators in terms of ornithological support for flights from the United States is increasing.

## Bird detection methods in the airport areas: review and efficiency analysis

The analysis of data presented in the works [2–6] indicates a significant increase in the number of bird strikes with civil aviation aircraft both worldwide and in the Russian Federation in recent years. This increase in ornithological incidents is brought about by a number of factors.

Firstly, there is a stable trend towards increased air traffic intensity in global civil aviation. Secondly, for various reasons, there is a natural increase in bird populations on a global

scale. Thirdly, and this is especially important, a significant number of bird strikes were not officially recorded in the past.

Currently, both ICAO and the Federal Air Transport Agency impose mandatory requirements for recording all collision incidents, regardless of the consequences for the aircraft. According to the Federal Air Transport Agency letter No. AN1.02-3056 dated September 18, 2015, aerodrome operators are required to organize the recording and analysis of such cases, as well as to prepare and send reports on collisions, including incidents with aircraft of foreign operators, to the Flight Safety Inspection Department. Similar requirements for the filing of reports are also imposed on aircraft operators.

It should be noted that the most collisions (approximately 90%) do not lead to aviation incidents or accidents, much less accidents or disasters. However, there are well-known examples in aviation literature where bird strikes have had catastrophic consequences. One of the tragic examples of the negative impact of the ornithological situation on flight safety is the aviation accident that occurred on July 29, 2007, involving the Antonov-12 aircraft operating a flight route Domodedovo – Omsk – Bratsk – Komsomolsk-on-Amur. Just 20 seconds after rotation, a critical failure of both right engines occurred, caused by birds getting into the power units.

The crew took measures to stabilize the aircraft, but the loss of speed led to a crash landing into a forested area a minute after the engines had failed. The subsequent destruction and fire of the structure led to the death of all six crew members and one passenger on board.

To illustrate the dynamics of the growth in the number of bird strikes with aircraft in the Russian Federation, Figure 1, compiled by the authors based on the Federal Air Transport Agency data on statistics of birds and other animals strikes, shows the dependence of the number of such incidents in recent years compared to 2010.<sup>1</sup> If in 2010 about 50 collisions were recorded, then in 2023 this number increased to

1299, which corresponds to an increase of 26 times. At the same time, in 2023 compared to 2022, there was an increase of 38% (an increase of 1.38 times).

The document – FAR-331 (Federal Aviation Rules 331) states that for monitoring the ornithological situation at the airport, visual or radar observation aids should be used. It should be noted that currently, radar surveillance of the ornithological situation is not used at Russian airports due to the lack of appropriate ornithological radars. To ensure ornithological safety, a number of international airports use specialized real-time bird detection systems. In particular, Seattle/Tacoma International Airport and John F. Kennedy International Airport use radar stations to monitor bird movements. Amsterdam Airport Schiphol and Atlas International Airport have implemented the Harrier and MERLIN systems, respectively, to achieve comprehensive radar coverage. Additionally, San Francisco International Airport uses a high-resolution video surveillance system designed to track bird activity in the controlled area [7]. This may be one of the reasons why the number of ornithological incidents and accidents in the U.S. is significantly lower than in Russia, as the U.S. major airports (New York, Dallas, Seattle) use radar systems of the “Harrier” and “Merlin” types [8]. For information, we present the technical data of these radars:

Signal type – Pulse with Doppler.  
Frequency range – centimeter.  
Range resolution: 10 m or 20 m.  
Number of frequency channels – 6.  
Range – 8 km.  
Azimuth angle – 360°.  
Elevation angle – 45°.

In the Russian Federation, a radar station called “ENOT” has been developed, which is not essentially an ornithological station, although it is stated in the list of its detected objects that it provides: automatic detection of moving targets such as “bird”, “drone”, “airplane”, “person”, “car” in the presence of direct visibility.

The main tactical and technical characteristics of the “ENOT” station correspond to American analogues, but the maximum detection range of a typical target is only 2500 m, which is more

<sup>1</sup> Birds and other animals strikes FAVT. FAVT. Available at: <https://favt.gov.ru/dejatelnostbezopasnost-poletov-stolknoveniya-ptici/> (accessed: 25.03.2025).

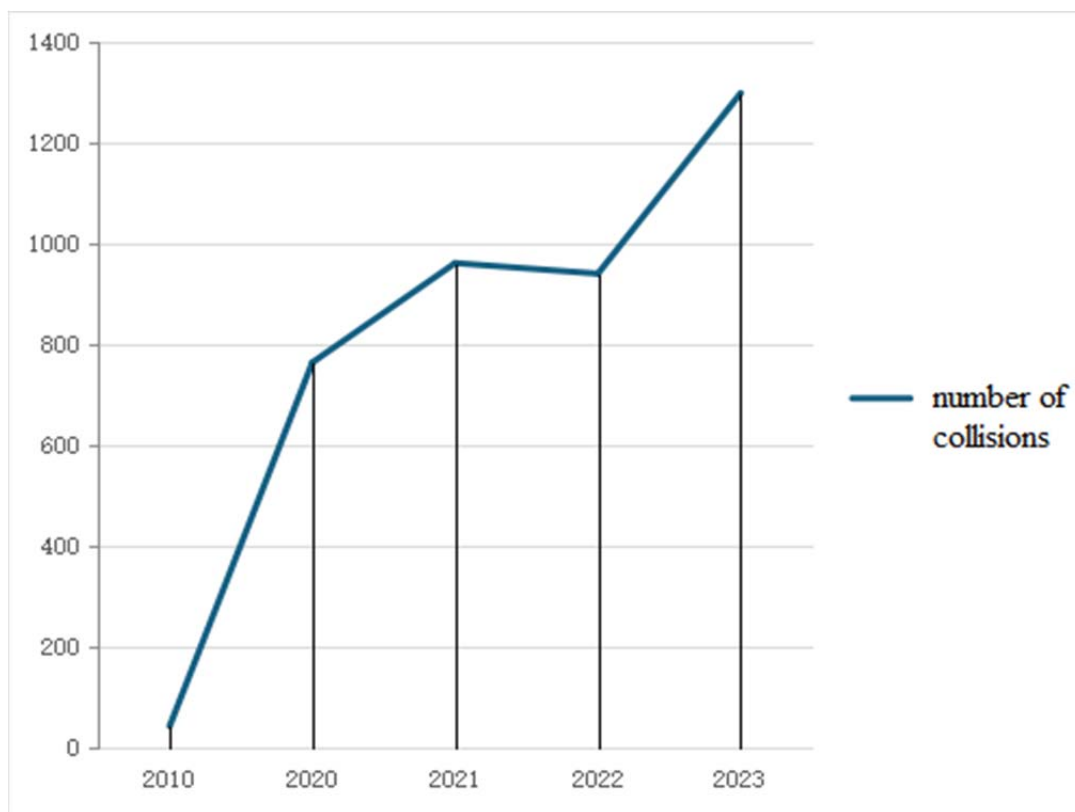


Fig. 1. Number of bird strikes with aircraft in the Russian Federation by years

than 3 times worse than American models. Taking into account the assigned task: the detection of birds – the range of detection of the “ENOT” system does not correspond at all to the concept of an “ornithological” radar.

Thus, it is necessary to solve the problem of using special ornithological radars at airports in the Russian Federation with complex ornithological conditions [9]. In this case, the concept of ornithological radar should include the function of identification and classification of detected birds.

Based on long-term analysis, certain patterns have been identified that characterize the threat posed by birds. More than 70% of all collisions occur during the day, with the most dangerous altitudes being up to 100 m (52–80% of all collisions). About 47–57% of collisions occur during the descent and landing stages, and 30–47% during the takeoff and climb stages. A striking example was the recent crash of the South Korean Boeing. According to the official preliminary investigation report, on Sunday, December 29,

2024, at about 04:30 (local time), a passenger flight of Jeju Air (HL8088, B737-800) took off from Suvarnabhumi International Airport in Thailand with 181 passengers on board, including 6 crew members and 175 passengers. At 08:54:43, HL8088 first contacted the Muan International Airport control tower for landing clearance. The tower cleared the aircraft to land on runway 01. As HL8088 approached the runway, the tower warned the crew to be careful of birds at 08:57:50. A few seconds later, HL8088 due to a bird strike, the aircraft issued a Mayday distress signal, which is used only in critical situations when the crew understands that the lives of people on board are in danger. As HL8088 was flying over the left side of RWY 01, it turned right and approached RWY 19 to land on it after aligning with the runway centerline. The aircraft belly-landed without landing gear extended, veered off the runway, crashed into an embankment, and caught fire. As a result of this accident, four crew members and 175 passengers were killed, and two crew members were seri-

ously injured. According to the report, the cockpit voice recorder and flight data recorder stopped recording four minutes before the accident. The pilots noticed a flock of birds while approaching Runway 01, and a surveillance camera captured HL8088 approaching the flock of birds during the go-around. Both engines were sent for examination, and feathers and blood stains from birds were found on each of them. The samples were sent to specialized organizations for DNA analysis, and a local organization identified them as belonging to Baikal teals (a duck family). Following the crash, South Korean officials said they would install bird-detection cameras and thermal imaging cameras at all airports in the country. The new equipment is said to help determine the size and trajectory of birds from a distance, allowing air traffic controllers to respond more quickly to threats and mitigate the risk [10]. Thus, the weight of the bird directly affects the degree of collision hazard for aircraft; the heavier the bird is, the higher is the risk of damage. Even a small bird, the size of a duck, is capable of breaking through a three-centimeter glass of the aircraft cockpit. International aircraft design standards require the stability of the cabin, engines, fuselage and wing to the impact of a bird weighing up to 1.8 kg, a collision with a flock or large birds, such as geese, ducks (up to 5 kg), can lead to serious damage, including engine destruction and deformation of the fuselage, wing, empennage. These requirements are set out in the airworthiness standards (AS) 35, which are harmonized with the relevant sections and appendices of the US AS FAR-35 with amendments up to and including 35-8 and with the requirements of the European airworthiness standards CS-P with amendment 1.<sup>2</sup>

A major engine failure can be seen in a serious incident that occurred on March 1, 2025, in Newark, New Jersey. The FedEx Boeing 767 cargo plane made an emergency landing nine minutes after takeoff. The emergency landing

was caused by an engine fire caused by a bird strike. Figures 2–3 show the aftermath of the collision.



Fig. 2. Destroyed engine as a result of a bird strike



Fig. 3. Destroyed engine nozzle because of a bird strike

<sup>2</sup> Order of the Federal Air Transport Agency No. 785-P dated 02.11.2022 On approval of the Airworthiness Standards of propellers NLG 35. ConsultantPlus. Available at: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_434288/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_434288/) (accessed: 25.03.2025).

Airports are required to use the radar to determine the size and dimensions of birds, which are generally proportional to their weight [11]. Determining the size of a bird from radar echoes

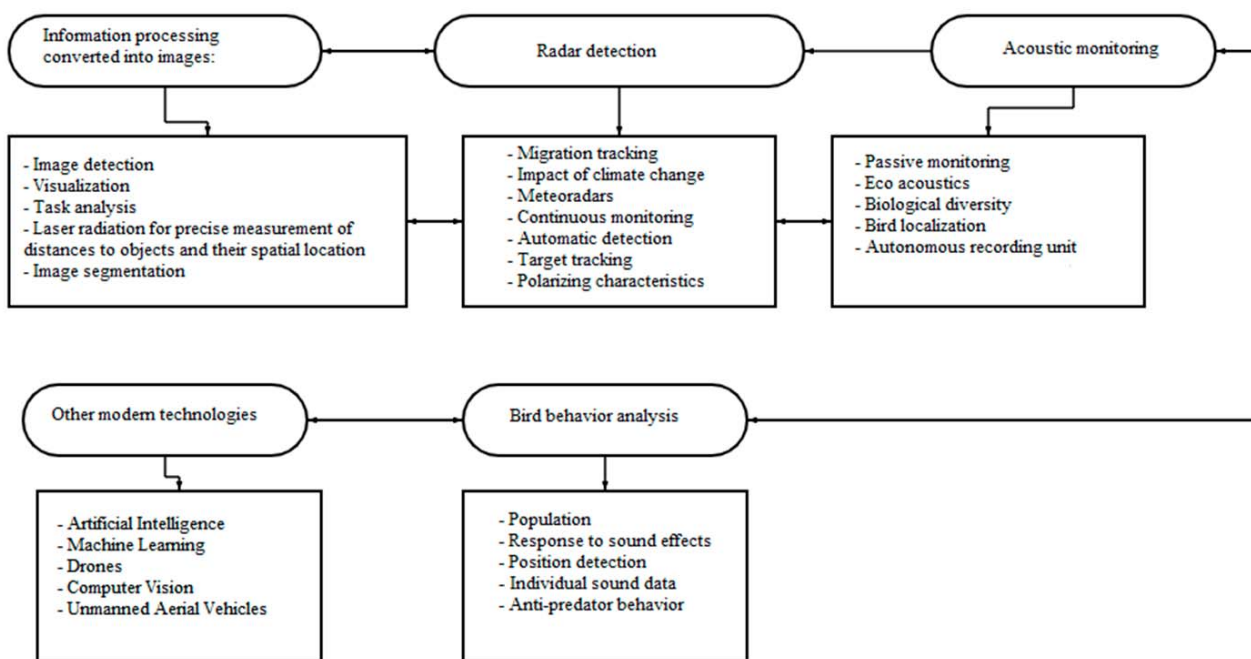


Fig. 4. Block diagram of a set of automated means for monitoring the ornithological situation

can quantify the level of bird strike hazard, thereby providing airports with guidance on how to deal with a bird strike threat.

### A set of automation tools for monitoring the ornithological situation at the airport

In order to improve the efficiency of ensuring ornithological flight safety in the aerodrome area, it is necessary to develop and implement a set of automated means for monitoring the ornithological situation, which is an integrated system for collecting, processing, analyzing and visualizing information on the presence and movement of birds. A set of automated means for monitoring the ornithological situation ensures continuous monitoring of the ornithological situation in real time, timely notification of airport services and aircraft crews about potential collision threats, and also provides analytical data for the development and implementation of effective risk management measures. Figure 4 shows a set of automated means for monitoring the ornithological situation in the form of a block diagram.

**Processing information converted into images.** Identification of bird species in the proposed system is carried out by analyzing images obtained using cameras, including thermal imaging [12]. The process consists of extracting relevant features from the image and then comparing them with reference data obtained as a result of preliminary training of the systems. The accuracy and speed of recognition directly depend on the volume and quality of the sample.

Key steps in the process of classifying bird images include object detection, feature extraction and image segmentation [13]. These steps are the subject of scientific research aimed at improving the accuracy and speed of target detection.

Feature extraction, which includes the analysis of morphological characteristics, appearance, and color parameters, is a preliminary processing stage aimed at identifying the most significant elements of an image. Researchers have found that identifying differences in the color of birds and the background color of the natural environment is particularly difficult, requiring the use of highly accurate image segmentation methods [9]. Image segmentation is a complex

and labor-intensive task in digital image processing and is an actively developing area of research in the field of object recognition.

**Radar detection:** The advantage of radar bird detection over other methods of detecting bird images is due to several factors:

1. Radars are capable of detecting birds at significant distances, reaching dozens of kilometers, which allows for early detection of bird flocks and taking measures to prevent collisions with aircraft.

2. Radars can provide continuous monitoring, operating around the clock, regardless of time of the day or lighting conditions.

3. Modern radars are capable of detecting birds in conditions of limited visibility, such as fog, haze, and rain.

4. Modern radar systems are equipped with automatic target detection and tracking systems, which allows tracking the movement of birds in real time.

5. Modern radars that use the polarization characteristics of the signal are able to distinguish the size and type of bird, providing more detailed information about the ornithological situation.

The above factors are extremely important for solving the problems of ensuring flight safety, but it should be noted that for high-quality work it is necessary that radar data be integrated with other systems, such as automatic information transmission systems in the aerodrome area, bird scaring systems, meteorological systems, which will allow the creation of a comprehensive system for ensuring ornithological safety.

However, at present, there is no way to obtain accurate information about bird species using radar detection in civil aviation. Despite significant advantages, there is a number of disadvantages and difficulties in implementing radars with the required characteristics to fully ensure flight safety in the airfield area [14]. Firstly, the cost of such installations is very high, so it will not be possible to install such radars in every airport in the Russian Federation in the foreseeable future. Secondly, there is a high probability of a false signal when various interferences oc-

cur, such as insects, weather conditions, drones, buildings, trees. Therefore, a radar is often used to study bird migrations and detect birds in the airfield area at night.

To mitigate the dependence on meteorological conditions, the ornithological radar must have a function of switching between the centimeter and millimeter range. The most complex interference situation arises at the input of the radar receiving devices due to the impact of interfering reflections from hydrometeors. This is due to the wide variety of different meteorological formations (fog, hail, rain of varying intensity, snowfall, etc.) [9]. At the same time, the level of signals from interfering reflections from hydrometeors can change significantly over time (change in the intensity of meteorological formations), in space (wind influence), i.e. it has a clearly expressed stochastic nature.

When strong interference occurs, the orientation angle of the polarization plane of the electromagnetic wave changes  $\beta_p$ , and in this case, the probability of correct detection will be presented in the following form [15]:

$$P_{cd} = 1 - F(h_0 - \sqrt{\frac{2E}{N_0}} \cos \beta_p). \quad (1)$$

In formula (1)  $h_0 = \sqrt{2}h/\sqrt{N_0E}$ ;  $F(x)$  is the Laplace function;  $h_0$  is the detection threshold;  $(2E/N_0)$  is the signal-to-noise ratio;  $\beta_p$  is the orientation angle of the plane of polarization of the electromagnetic wave;  $\cos(\beta_p)$  is the cosine of the orientation angle of the plane of polarization.

According to this ratio, it is easy to see that an increase in the angle  $\beta_p$  according to the presented ratio leads to a deterioration of detection parameters. At a fixed signal/noise ratio, a decrease in the probability of correct detection ( $P_{cd}$ ) is observed in the range from 1.1 to 1.7 times. Such a loss of sensitivity of the radar system can be qualified as the occurrence of a dangerous factor.

Doppler weather radar is more resistant to interference because the interference can be distinguished and removed during analysis. Refinement of radar echo signal is a prerequisite for improving detection and identification capabili-

ties. Due to its wider detection range, Doppler weather radar can analyze bird information while obtaining weather information. Therefore, it is widely used to study the impact of weather conditions on bird migration and to develop bird migration forecast models by combining artificial intelligence training and other methods.

**Acoustic monitoring.** Acoustic signals are one of the key methods used by environmental specialists to assess bird biodiversity. Researchers in this field often use separate autonomous recording devices to record sound signals. The large memory capacity of digital recorders used for acoustic monitoring allows long recording periods, and the recorded data is used for subsequent studies and reassessment. The recorded bird sounds data usually requires preprocessing operations such as bias correction to ensure accurate results. Acoustic monitoring can be used for a wide range of purposes, including bird identification, monitoring bird species diversity, and monitoring during night bird migration. Acoustic signals emitted by birds during different ecological processes (mating, reproduction, migration, etc.) are usually different, which makes acoustic monitoring of birds more challenging and at the same time presents high research value.

The three main methods described above are often used in combination with each other or with some other technical means, such as Machine Learning, Artificial Intelligence Training, Unmanned Aerial Vehicle (UAV) detection, and computer vision processing. Bird behavior highlights the adaptive process in which birds tend to give different responses to stimuli when faced with external influences.

Visual observation is limited by many factors and cannot meet the need for obtaining accurate information about birds.

**Other modern technologies.** Modern technologies such as Artificial Intelligence (AI), Machine Learning (ML), Computer Vision (CV) and Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have great potential to significantly improve the efficiency of ensuring ornithological flight safety. They allow automating and optimizing the processes of detection, identification, forecasting and scaring birds away, thereby reducing the risk

of collisions with aircraft. For example, ML allows processing a large volume of data received from acoustic and radar signals. AI can help develop forecasts based on available statistics. UAVs can be used both for monitoring and for prompt scaring birds away. The possibility of using each of these systems requires additional scientific research, but the effectiveness of these systems is obvious.

**Analysis of bird behavior.** The adaptive nature of bird behavior is determined by their ability to form various behavioral reactions in response to changing internal (physical) and external (environmental) conditions. These reactions cover a wide range of actions, including communication, strategies for protection from predators, methods of obtaining food, and the manifestation of rhythmic processes at the moment of influence of various systems.

To eliminate incidents involving collisions of birds with aircraft, means for repelling or destroying birds from the general list given in [5] are used:

1. Bioacoustic installations.
2. Gas guns.
3. Rattles.
4. Mirror balls.
5. Laser Repellers.
6. Nets.
7. Dummies imitating dead birds.
8. Chemical methods.
9. Radio-electronic and electromagnetic methods.
10. Specially trained birds and dogs.
11. Radio-controlled models.
12. Unmanned aircraft.

An analysis conducted by various authors [2, 5] showed that for various reasons the first 8 methods are ineffective due to the rapid habituation of birds to the corresponding impact. The 9<sup>th</sup> method is currently undergoing experimental testing and cannot yet be definitively recommended for use. The 10<sup>th</sup> method is quite difficult to apply and for obvious reasons cannot be recommended everywhere.

From the above, it follows that the use of radio-controlled models and unmanned aircraft is advisable as the primary means of scaring birds away from airfields. The study [5] examined various means of scaring birds and, regarding the possibility of using radio-controlled models, the following was said: “this method has not received wide application due to the difficulties of controlling the models and the need to have a specially trained specialist at the airfield.”

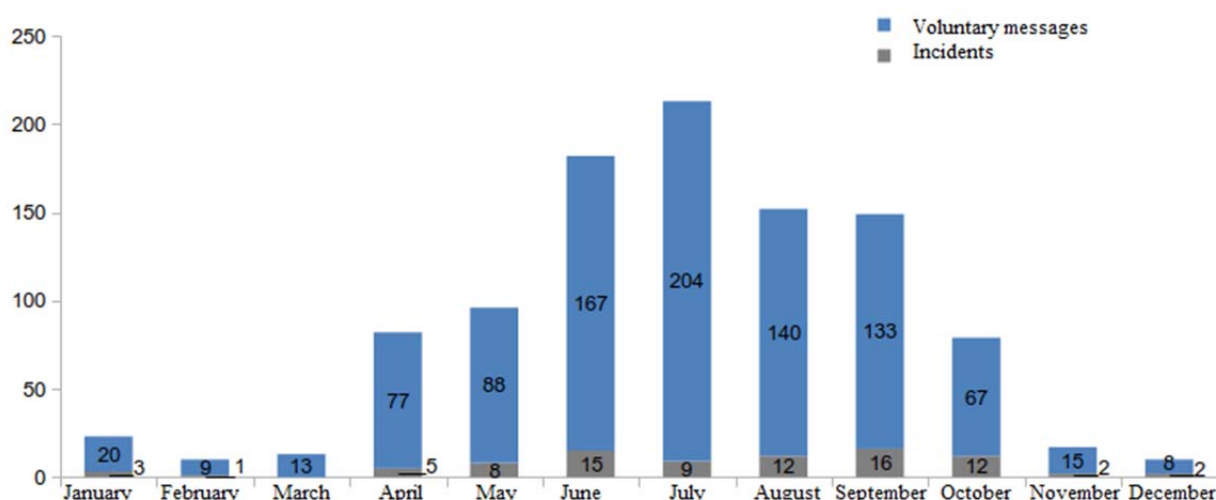


Fig. 5. Number of aircraft collisions (threats of collisions) with birds in 2022

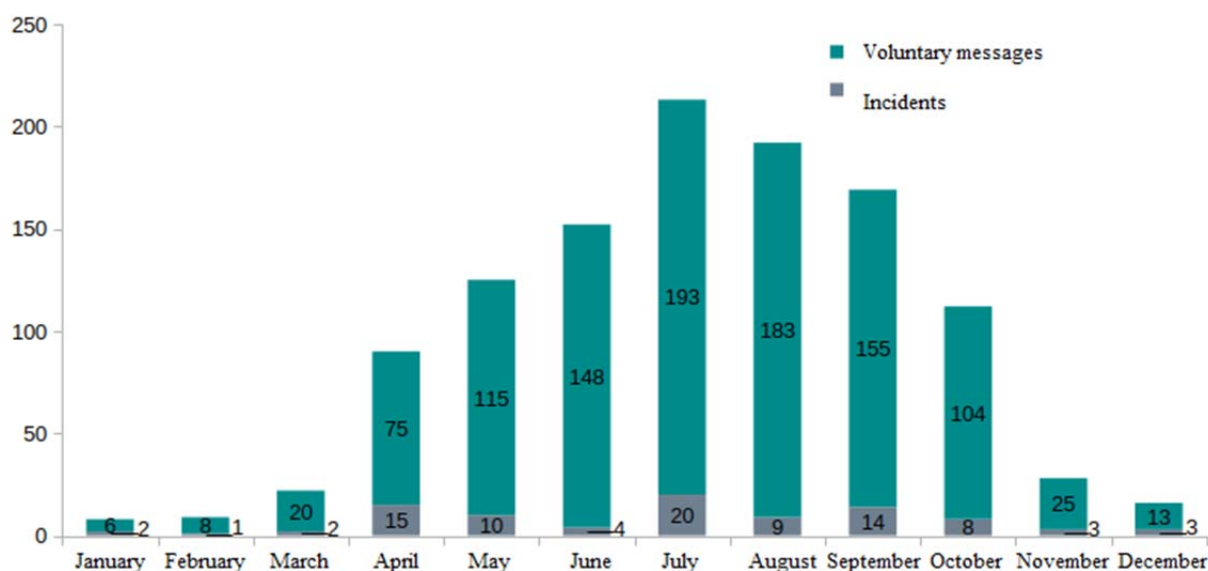
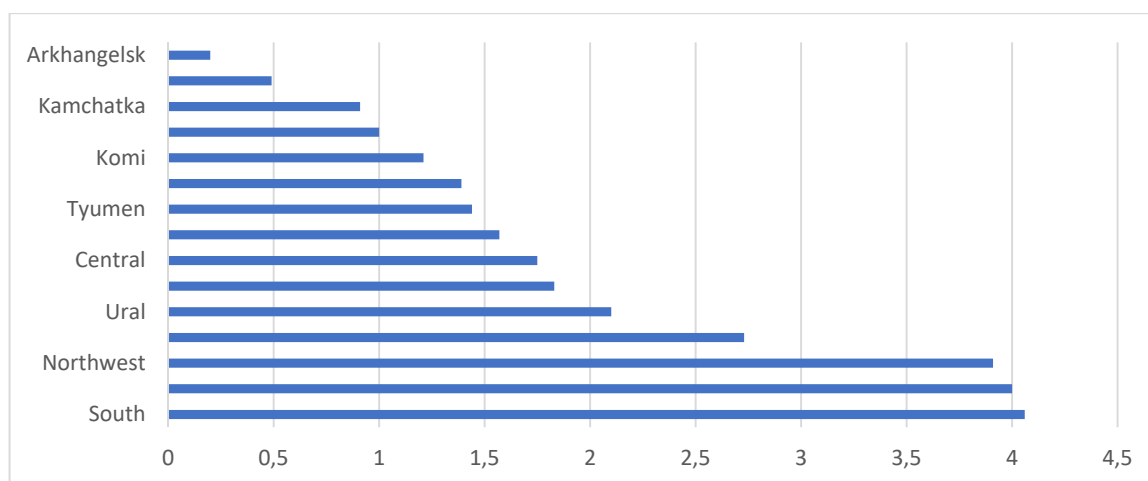


Fig. 6. Number of aircraft collisions (threats of collisions) with birds in 2023

However, the very concept of ensuring ornithological safety at airports implies the presence of specialized ornithological services staffed by trained personnel [3].

Airports are a central object in scientific research aimed at finding methods and ways to prevent bird strikes [16–18]. However, the geographical and ecological environment around the airport is complex and diverse, including various types of habitats such as wetlands, forests and agricultural lands, leading to a large number of birds that are difficult to monitor [19]. The likelihood of incidents related to aircraft collisions

with birds is influenced by various factors, such as flight maps and airport locations, weather conditions at airports, the season and time of day, types of aircraft in operation, the effectiveness of the ornithological support system at airports, as well as the knowledge and qualifications of aviation personnel in the field of ornithological flight safety. In general, birds pose the greatest threat to flights in summer, as their populations increase at this time of year due to reproduction. The annual peak of collisions occurs in July (Figure 5–6). The risk to flight safety increases during this period [6].



**Fig. 7.** Distribution of the relative number of incidents (Number of incidents per 100 thousand takeoffs and landings at airports (their areas)) associated with collisions with birds by local agencies of the Federal Air Transport Agency

The inconsistency of risk is also noted by territorial principle [4]. Analysis of the Federal Air Transport Agency data showed that the leader in the number of incidents per 100 thousand takeoffs and landings at airports (their areas) related to collisions with birds is the Southern Interregional Territorial Administration [20] (4.06 incidents) (fig. 7).

Airports find it difficult to analyze the overall situation with birds in the subzones, which complicates obtaining accurate data about birds to ensure flight safety. Therefore, detecting birds in the vicinity of the airport is of particular importance.

Most of the bird detection radars used at major airports around the world are marine radar systems with a horizontal detection range of 5 to 20 km, which cover a wide range and can detect birds that cannot be tracked visually and provide high-resolution images of bird movements. Airport bird detection radar systems can provide airport operators with information on bird activity in clear weather, so that bird scaring measures and control plans can be organized in advance.

Once again, it should be noted that radar systems cannot detect birds in the rain due to precipitation reflections. Some ground obstacles (such as buildings) and air interferences (such as insects) will affect the radar's ability to detect and track birds, leading to an inability to accu-

rately perceive this phenomenon. At the same time, radar systems are expensive and currently widely used mainly in European and American countries. Therefore, it is necessary to create comprehensive systems for detecting and identifying birds in the airfield area, as well as using methods to scare away and protect aircraft from collisions with them.

## Conclusion

Based on the above, a conceptual model for the widespread implementation of systems that ensure ornithological flight safety is proposed.

The proposed model divides the ornithological situation control zone in the aerodrome area into small, medium and large. The small zone is defined as the area in which an aircraft performs the following flight stages: taxiing, takeoff and landing, and is located within 8 km from the aerodrome perimeter. The medium zone covers the airspace at a distance of 8 to 50 km from the aerodrome perimeter and includes various natural objects that attract birds (e.g. lakes, wetlands, agricultural lands, forests). The large zone is an area from 50 km to the maximum range of the Doppler weather radar. The longest range of a Doppler weather radar can reach 460 km. For example, the radar meteorological stations of the NEXRAD network in the USA have a beam

width of 1° and observe a large area in a cycle lasting from 4.5 to 10 minutes.

In the small zone, the priority is to determine the ornithological situation in real time. Visual observation is supplemented by data from bird detection radars, information processing and its transformation into images. In the middle zone, airspace monitoring is carried out primarily using radars, with data integration and analysis to track bird trajectories and promptly develop recommendations. Each mid-zone object can be equipped with acoustic monitoring equipment that provides timely data transmission and analysis, allowing for advance (several hours ahead) forecasting of risks associated with bird activity. In the large zone, it is advisable to use Doppler radars to obtain information on bird migrations and subsequent forecasting of the ornithological situation for the coming days. The generated forecasts can serve as a guide for planning measures to manage ornithological risks and scare birds away on the airfield territory.

Ensuring ornithological safety is impossible without integrating various methods of bird detection: visual observation, use of radars, analysis of statistical data. Only a combined approach, taking into account the strengths of each method, allows to obtain the most complete picture of the ornithological situation in the airport area.

Systematic monitoring of ornithological activity in the airport area, including collection and analysis of data on bird species, their numbers and behaviour, will enable reliable forecasts of potential collision risks. Effective bird detection is not only a guarantee of flight safety, but also a key factor in improving the efficiency of airport operations and ensuring comfortable conditions for all air traffic participants.

The study confirms that effective detection of birds in the aerodrome area is a critical element in ensuring the ornithological safety of aircraft flights. An analysis of existing detection methods, from traditional visual observations to modern radar systems, revealed both their advantages and serious limitations. The problem is especially acute in southern regions, in conditions of poor visibility and difficult meteorological conditions, as well as when it is necessary to detect birds at a significant distance from the runway.

Despite existing measures, bird strikes continue to pose a serious threat, resulting in material losses, flight delays and accidents. This highlights the need for continuous improvement of bird detection technologies and methods.

The further direction of scientific work should be the development of specialized radar systems designed specifically for the tasks of ornithological protection of airfields.

## References

1. **Solomentsev, V.V., Ignatenko, O.A.** (2005). Specifics of operating technical and software tools of the ATC control system. *Nauchnyy vestnik MGTU GA*, no. 92, pp. 7–12. (in Russian)
2. **Guziy, A.G., Kostina, A.P.** (2022). Methodological approach to the quantitative assessment of risk caused by a collision between birds and aircraft. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 25, no. 5, pp. 12–24. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-5-12-24 (in Russian)
3. **Elisov, L.N., Ovchenkov, N.I., Filipov, V.L., Konyaev, E.A., Laptev, A.A.** (2019). System approach and human factor in ornithological airport security. *Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA)*, no. 29, pp. 99–106. (in Russian)
4. **Lyusov, E.V.** (2022). Issues of safe air transport operation. In: *Transport. Gorizonty razvitiya: materialy 2-go mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma*. Nizhniy Novgorod: VGUVT, p. 132. (in Russian)
5. **Parfenov, N.A., Matyukhin, D.I., Zvyagintseva, A.V.** (2022). Development of an automated system for the safe operation of aircraft. *Information technologies in construction, social and economic systems*, no. 3 (29), pp. 45–49. (in Russian)
6. **Vlasova, A.V.** (2023). Problems of the ornithological flight support services and their solutions. In: *Grazhdanskaya aviatsiya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva: sbornik tezisov dokladov mezhdunarodnykh nauchno-tekhn. konferentsiya, posvyashchennaya 100-letiyu otechestvennoy gra-*

*zhdanskoy aviatsii*. Moscow: ID Akademii imeni N.Ye. Zhukovskogo, pp. 511–512. (in Russian)

7. Meer Ahmad, A.M. (2019). Bird-strike aircraft accidents and their prevention. *Asian Journal of Science and Technology*, vol. 10, issue 01, pp. 9251–9257. Available at: <https://journalajst.com/sites/default/files/issues-pdf/6718.pdf> (accessed: 17.08.2024).

8. Phillips, A.C., Majumdar, S., Washburn, B.E. et al. (2018). Efficacy of avian radar systems for tracking birds on the airfield of a large international airport. *Wildlife Science Bulletin*, vol. 42, issue 3, pp. 467–477. DOI: 10.1002/wsb.910

9. Stepanenko, A.S. (2017). The development of navigation systems in civil aviation. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 20, no. 1, pp. 123–131. (in Russian)

10. Nechaev, V.N., Kulakov, M.V., Gasparyan, G.A., Goncharenko, Ya.V., Batalov, K.A. (2023). Investigation of the technology of the cooperation between the air traffic control and the ornithological service. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 26, no. 1, pp. 49–57. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-49-57 (in Russian)

11. Ilyichev, V.D., Silaeva, O.L., Zolotarev, S.S. (2007). Protection of aircraft and other objects from birds. Moscow: KMK, 337 p. (in Russian)

12. Rai, B.K., Sharma, S., Kumar, G., Kishor, K. (2022). Recognition of different bird category using image processing. *International Journal of Online and Biomedical Engineering*, vol. 18, no. 07, pp. 101–114. DOI: 10.3991/ijoe.v18i07.29639 (accessed: 17.08.2024).

13. Gerringer, M.B., Lima, S.L., DeVault, T.L. (2016). Evaluation of an avian radar system in a midwestern landscape. *Wildlife Science Bulletin*, vol. 40, issue 1, pp. 150–159. DOI: 10.1002/wsb.614

14. Yudkin, V.A., Grabovski, M.A. (2018). Quantitative method of estimate of aerodrome birds hazard risk. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 21, no. 4, pp. 48–59. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-4-48-59 (in Russian)

15. Kozlov, A.I., Logvin, A.I., Sarychev, V.A. (2005). Polarization of radio waves. The polarization structure of radar signals: Mon-

ograph. Moscow: Radiotekhnika, 702 p. (in Russian)

16. Davygora, A.V., Leneva, E.A., Ryabtsov, S.N. (2022). Ornithological situation at the Orenburg airport during the spring season. *Vestnik ZKU*, vol. 85, no. 1, pp. 170–187. DOI: 10.37238/1680-0761.2022.85(1).80

17. Malkov, Yu.G. (2019). Ornithological situation in the territory of the airport “Yoshkar-Ola” *Trudy Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnologicheskaya*, no. 7, pp. 23–32. (in Russian)

18. Kurnosenko, D.V., Baranov, A.A. (2019). Environmental ornithological characteristics of airport “Cheremshank” (air hand “Krasnoyarsk”) and its impact on safety of flights of civil aircraft. *Modern science: current problems of theory and practice. Series: Natural and technical sciences*, no. 4, pp. 7–10.

19. Stepanenko, E.V., Sheverdin, M.A., Nizametdinov, R.R. (2020). The business processes of the airline and the airport: commonalities and differences. *Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA)*, no. 33, pp. 69–77. (in Russian)

20. Stepanenko, A.S., Kurenkova, E.O. (2023). Integrated development of regional airports. *Nauchno-Tekhnicheskij Vestnik Bryanskogo Gosudarstvennogo Universiteta*, no. 3, pp. 269–278. DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-03-269-278 (in Russian)

## Список литературы

1. Соломенцев В.В., Игнатенко О.А. Особенности эксплуатации технических и программных средств АС УВД // Научный вестник МГТУ ГА. 2005. № 92. С. 7–12.

2. Гузий А.Г., Костина А.П. Методологический подход к количественному оцениванию риска, обусловленного столкновением воздушных судов с птицами // Научный вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 5. С. 12–24. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-5-12-24

3. Елисов Л.Н. Системный подход и человеческий фактор в орнитологической безопасности аэропорта / Л.Н. Елисов, Н.И. Ов-

ченков, В.Л. Филиппов, Е.А. Коняев, А.А. Лаптев // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2019. № 29. С. 99–106.

4. **Люсов Е.В.** Проблемные вопросы безопасной эксплуатации воздушного транспорта // Транспорт. Горизонты развития: материалы 2-го Международного научно-промышленного форума, Нижний Новгород, 07–09 июня 2022 года. Нижний Новгород: ВГУВТ, 2022. С. 132.

5. **Парфенов Н.А., Матюхин Д.И., Звягинцева А.В.** Разработка автоматизированной системы для безопасной эксплуатации летательных аппаратов // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. 2022. № 3 (29). С. 45–49.

6. **Власова А.В.** Проблемы орнитологической службы обеспечения полетов, и пути их решений // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества: сборник тезисов докладов Международной научно-техн. конференции, посвященной 100-летию отечественной гражданской авиации, Москва, 18–19 мая 2023 года. М.: ИД Академии имени Н.Е. Жуковского, 2023. С. 511–512.

7. **Meer Ahmad A.M.** Bird-strike aircraft accidents and their prevention [Электронный ресурс] // Asian Journal of Science and Technology. 2019. Vol. 10, iss. 01. Pp. 9251–9257. URL: <https://journalajst.com/sites/default/files/issues-pdf/6718.pdf> (дата обращения: 17.08.2024).

8. **Phillips A.C., Majumdar S., Washburn B.E. и др.** Efficacy of avian radar systems for tracking birds on the airfield of a large international airport // Wildlife Science Bulletin. 2018. Vol. 42, iss. 3. Pp. 467–477. DOI: 10.1002/wsb.910

9. **Степаненко А.С.** Развитие навигационных систем в гражданской авиации // Научный вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 1. С. 123–131.

10. **Нечаев В.Н.** Исследование технологии взаимодействия службы обслуживания воздушного движения и орнитологической службы / В.Н. Нечаев, М.В. Кулаков, Г.А. Гаспарян, Я.В. Гончаренко, К.А. Баталов // Науч-

ный вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 1. С. 49–57. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-49-57

11. **Ильичев В.Д., Силаева О.Л., Золотарев С.С.** Защита самолетов и других объектов от птиц. М.: КМК, 2007. 337 с.

12. **Rai B.K.** Recognition of different bird category using image processing / B.K. Rai, S. Sharma, G. Kumar, K. Kishor [Электронный ресурс] // International Journal of Online and Biomedical Engineering. 2022. Vol. 18, no. 07, pp. 101–114. DOI: 10.3991/ijoe.v18i07.29639 (дата обращения: 17.08.2024).

13. **Gerringer M.B., Lima S.L., DeVault T.L.** Evaluation of an avian radar system in a midwestern landscape // Wildlife Science Bulletin. 2016. Vol. 40, iss. 1. Pp.150–159. DOI: 10.1002/wsb.614

14. **Юдкин В.А., Грабовский М.А.** Количественный метод оценки орнитологической обстановки на аэродроме // Научный вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 4. С. 48–59. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-4-48-59

15. **Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А.** Поляризация радиоволн. Поляризационная структура радиолокационных сигналов: монография. М.: РАДИОТЕХНИКА, 2005. 704 с.

16. **Давыгора А.В., Ленева Е.А., Рябцов С.Н.** Орнитологическая обстановка в аэропорту города Оренбург в весенний сезон // Вестник ЗКУ. 2022. Т. 85, № 1. С. 170–187. DOI: 10.37238/1680-0761.2022.85(1).80

17. **Мальков Ю.Г.** Орнитологическая обстановка на территории аэропорта «Йошкар-Ола» и безопасность полетов // Труды Поволжского государственного технологического университета. Серия: Технологическая. 2019. № 7. С. 23–32.

18. **Курносенко Д.В., Баранов А.А.** Эколого-орнитологическая характеристика аэропорта «Черемшанка» (аэроузла «Красноярск») и ее влияние на безопасность полетов гражданских воздушных судов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2019. № 4. С. 7–10.

19. Степаненко Е.В., Шевердин М.А., Низаметдинов Р.Р. Бизнес-процессы авиакомпании и аэропорта: общность и различия // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2020. № 33. С. 69–77.

20. Степаненко А.С., Куренкова Е.О. Комплексное развитие региональных аэропортов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета. 2023. № 3. С. 269–278. DOI: 10.22281/2413-9920-2023-09-03-269-278

### Information about the authors

**Arusya V. Vlasova**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, the Chair of Transportation Organization on Air Transport, Moscow State Technical University of Civil Aviation [a.vlasova@mstuca.ru](mailto:a.vlasova@mstuca.ru).

**Boris P. Eliseev**, Doctor of Juridical Sciences, Professor, the Rector of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, [b.eliseev@mstuca.ru](mailto:b.eliseev@mstuca.ru).

### Сведения об авторах

**Власова Аруся Витальевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры организации перевозок на воздушном транспорте МГТУ ГА, [a.vlasova@mstuca.ru](mailto:a.vlasova@mstuca.ru).

**Елисеев Борис Петрович**, доктор юридических наук, профессор, ректор МГТУ ГА, [b.eliseev@mstuca.ru](mailto:b.eliseev@mstuca.ru).

Поступила в редакцию	28.02.2025	Received	28.02.2025
Одобрена после рецензирования	15.04.2025	Approved after reviewing	15.04.2025
Принята в печать	24.07.2025	Accepted for publication	24.07.2025

УДК 629.7

DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-4-40-49

## Mathematical model of threats to an aviation data network under unauthorized access

A.A. Ganichev<sup>1</sup>, V.I. Petrov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

**Abstract:** Due to the increasing integration of onboard and ground-based data networks in aviation and the associated rise in information threats, the development of comprehensive models capable of assessing the security of such systems against unauthorized access is becoming increasingly necessary. One promising direction for enhancing the resilience of aviation networks is the creation of mathematical models that consider not only technical malfunctions and random equipment failures but also deliberate cyberattacks by intruders. This paper proposes a mathematical model of threats to aviation data networks, developed in accordance with ICAO recommendations and the requirements of ARINC standards. The network structure is represented as a directed graph, the nodes and edges of which are characterized by probabilistic indicators of failures and vulnerability to attacks. A distinctive feature of the developed model is the integration of probabilistic characteristics of random equipment failures, intentional attack scenarios, and parameters reflecting the efficiency of systems detecting unauthorized access. Utilizing probabilistic theory approaches, we synthesized an algorithm enabling the calculation of an integral indicator representing the risk of network connectivity loss and performance degradation. A significant aspect of this algorithm is its ability to simultaneously account for various types of threats and quantitatively assess the vulnerability of network elements. Numerical simulations of the proposed model were conducted, and results evaluating the criticality of specific network nodes and data transmission channels are presented. The analysis confirmed that applying the developed mathematical model provides a sound basis for identifying the most vulnerable aviation network components and selecting appropriate protective measures.

**Key words:** unauthorized interference, aviation data network, network reliability, connectivity, attack detection, risk, threat model.

**For citation:** Ganichev, A.A., Petrov, V.I. (2025). Mathematical model of threats to an aviation data network under unauthorized access. Civil Aviation High Technologies, vol. 28, no. 4, pp. 40–49. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-4-40-49

## Математическая модель угроз авиационной сети передачи данных в условиях несанкционированного вмешательства

А.А. Ганичев<sup>1</sup>, В.И. Петров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Московский государственный технический университет гражданской авиации,  
г. Москва, Россия*

**Аннотация:** В связи с возрастающей степенью интеграции бортовых и наземных сетей передачи данных в авиации и ростом количества информационных угроз все более необходимой становится разработка моделей, позволяющих проводить комплексную оценку защищенности таких систем от несанкционированного вмешательства. Одним из перспективных направлений повышения устойчивости авиационных сетей является создание математических моделей, позволяющих учитывать не только технические сбои и случайные отказы оборудования, но и преднамеренные атаки нарушителей. В работе предложена математическая модель угроз авиационной сети передачи данных, выполненная в соответствии с рекомендациями ИКАО и требованиями стандартов ARINC. Представление структуры сети осуществляется в виде ориентированного графа, узлы и ребра которого характеризуются вероятностными показателями отказов и подверженностью атакам. Особенностью разработанной модели является объединение вероятностных характеристик случайных отказов оборудования и сценариев целенаправленных атак, а также параметров эффективности функционирования систем обнаружения несанкционированного вмешательства. На основе подходов теории вероятностей синтезирован алгоритм, позволяющий рассчитывать интегральный показатель риска потери связности сети

и деградации ее характеристик. Отличительная особенность алгоритма заключается в том, что он позволяет одновременно учитывать различные типы воздействий и производить количественную оценку уязвимости элементов сети. Выполнено численное моделирование предложенной модели, представлены результаты оценки критичности отдельных узлов сети и каналов передачи данных. Анализ результатов показал, что применение разработанной математической модели позволяет обоснованно определять наиболее уязвимые компоненты авиационной сети и выбирать адекватные меры защиты.

**Ключевые слова:** несанкционированное вмешательство, авиационная сеть передачи данных, надежность сети, связность, обнаружение атак, риск, модель угроз.

**Для цитирования:** Ганичев А.А., Петров В.И. Математическая модель угроз авиационной сети передачи данных в условиях несанкционированного вмешательства // Научный вестник МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 4. С. 40–49. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-4-40-49

## Introduction

Ensuring the protection of aviation transport networks from unauthorized interference is of paramount importance in the context of the digitalization of the aviation industry.<sup>1</sup> The transition of aviation communication systems from analog voice communication to the use of IP data transmission networks significantly expand their functionality, however, it is accompanied by a significant increase in the number of cyber threats<sup>2</sup> capable of disrupting the operation of airborne equipment and flight control systems [1–3]. In addition, the introduction of “Internet of Things” technologies and other intelligent technologies into the aviation infrastructure expands the attack coverage and leads to additional vulnerabilities [4, 5]. Interference in aviation activities can manifest itself in distorting the coordinates of the aircraft, transmitting false instructions to the crew, blocking communication channels or creating interference that prevents the exchange of critical data [2, 6]. These risks require the development of additional protective measures aimed at ensuring the reliability of aviation systems and preventing the destabilization of air traffic control [7–9].

In recent years, a number of studies have been conducted on improving protection against unauthorized interference hazards in air

transport: their topics cover a wide range of areas, from organizational measures at airports [10] and the creation of integrated on-board security systems [7, 11] to modeling unauthorized impacts on aviation systems [12, 13] and the use of machine learning methods for intrusion detection [14–16]. However, the approaches proposed in these works remain fragmented and do not cover the full range of current threats to aviation data transmission networks [17, 18]. In addition, industry standards and recommendations (for example, ICAO and IATA) often do not keep pace with the rapid development of unauthorized interference methods, and existing approaches to risk assessment and testing show that the available protection tools do not cover all possible attack scenarios [6, 19].

Modern research confirms the existence of a wide range of vulnerabilities in the architecture of aviation data transmission networks. Intruders are capable of distorting route information, intercepting control signals, and disrupting the functioning of interacting subsystems. In unmanned aircraft systems, as shown in [20, 21], stable mechanisms for countering unauthorized interference have not been implemented. Cases of malicious modifications, interception of controls and destructive effects on navigation units have been recorded.

The lack of formalized approaches significantly complicates the assessment of the aviation data transmission networks stability. In [22], a laboratory platform was proposed that focuses on reproducing real-world attack scenarios, including the using SDR (software defined radio) and analysis of intersystem interactions. In [23], typical vulnerabilities of aircraft network do-

<sup>1</sup> Compilation of cyber security regulations, standards, and guidance. (2022). IATA. Available at: <https://www.iata.org/contentassets/4c51b00fb25e4b60b38376a4935e278b/compilation-of-cyber-regs.pdf> (accessed: 20.11.2024).

<sup>2</sup> Security and Facilitation Strategic Objective: Aviation Cybersecurity Strategy (2019). ICAO, 8 p.

mains are systematized, errors in the logical isolation of subsystems and the vulnerabilities of standard security tools are demonstrated.

However, until recent, there has been no formalized model that makes it possible to quantify the impact of both accidental equipment failures and deliberate attacks by intruders on the connectivity of the aviation network. The present work is aimed at filling this gap by developing an integrated mathematical threat model.

## Methods

When the model was being developed, the recommendations of industry standards on aviation security were applied: the classification of communication channels according to ARINC 811<sup>3</sup> (division into protected and unsecured channels) was used and the methodological provisions of RTCA DO-356A<sup>4</sup> were taken into account when analyzing intervention scenarios. In accordance with this, the data transmission network (DTN) is represented as a graph of nodes and connections, for which a probabilistic reliability analysis is performed. Each node and channel of the model is characterized by uptime and failure probabilities, determined on the grounds of statistical data and the assumption of failure independence. The model introduces threats of unauthorized interference – deliberate impacts on nodes and communication lines – which are considered as additional probabilistic factors for the failure of network elements.

This approach, based on the theory of network reliability and the analysis of minimal vulnerable sets of components, makes it possible to formalize the task of ensuring the stability of the aviation network against unauthorized interfer-

ence in the form of a set of probabilistic indicators. The developed model is presented below.

## Development of a mathematical model

To begin with, we formalize the structure of the aviation DTN. We represent the network as a graph  $G$  with many nodes  $V$  and edges  $E$ :

$$G = (V, E). \quad (1)$$

Here  $V$  – set of nodes (vertices) of the graph, and  $E$  – multiple connections (edges) between them.

The nodes of the graph are on-board and ground computing devices (aircraft on-board computers, control center servers, repeaters, etc.). The edges of the graph correspond to data transmission channels (radio links, satellite channels, etc.) that provide communication between the nodes. It is assumed that the topology of the graph is fixed during the period under consideration, that is, the composition of nodes and the presence of channels are set initially and do not change over time.

Each element of the network has a certain reliability and, consequently, a non-zero probability of failure. Let's introduce the notation: let  $p_i$  be the probability of uptime of node  $i$  in the period under review. Then we can express:

$$q_i = 1 - p_i, \quad (2)$$

where  $q_i$  is the probability of failure of this node due to technical reasons.

Similarly, for each communication channel (edge)  $e \in E$ , we denote by  $p_e$  the probability of its proper functioning:

$$q_e = 1 - p_e, \quad (3)$$

where  $q_e$  is the probability of channel failure.

Let us take the simplifying assumption that failures of individual nodes and channels are statistically independent events (in reality, correlated failures may occur, but independence is allowed to facilitate analysis).

To evaluate the operability of the entire network, we introduce the concept of graph connec-

<sup>3</sup> ARINC Project Paper 658. Internet protocol suite (IPS) for aeronautical safety services roadmap document. (2017). ARINC Project Paper 658, 15 p. Available at: [https://www.icao.int/APAC/Meetings/2017%20ACSIC%20G4/IP05\\_USA%20AI.3%20-%20IPS%20Roadmap.pdf](https://www.icao.int/APAC/Meetings/2017%20ACSIC%20G4/IP05_USA%20AI.3%20-%20IPS%20Roadmap.pdf) (accessed: 20.11.2024).

<sup>4</sup> RTCA DO-356. Airworthiness security methods and consideration. (2018). GlobalSpec, 370 p. Available at: <https://standards.globalspec.com/std/10398650/rca-do-356> (accessed: 20.11.2024).

tivity. A network is considered connected and functioning if for any pair of important nodes (for example, an on-board control center) there is at least one path connecting them through serviceable nodes and channels. A connectivity disruption event, on the contrary, means that there will be at least one pair of nodes between which there is not a single workable data transmission route left. The probability of maintaining network connectivity can be considered as an indicator of its overall reliability. Calculating this probability is equivalent to the problem of estimating the reliability of a graph with given element reliabilities.

In general, an accurate calculation of the connectivity probability for an arbitrary graph is difficult, since it requires taking into account all possible combinations of element failures. However, analytical expressions can be written for some typical network configurations. For example, if two important nodes are interconnected by a sequential chain of  $n$  channels, then the network will remain connected only if each of these channels is operational. In this case, the probability of maintaining communication between nodes is determined by the product of channel reliability:

$$R_{conn} = \prod_{e=1}^N p_e. \quad (4)$$

On the contrary, with redundant channels (parallel independent communication lines), the network reliability increases. For the case of two parallel channels between the same nodes, the probability that communication is **completely** lost is equal to the product of the probabilities of failure of each channel. Accordingly, the probability of maintaining communication over at least one of the two channels is written as:

$$R_{conn} = 1 - (1 - p_1)(1 - p_2). \quad (5)$$

These simplified examples illustrate how the network topology affects its reliability: the presence of alternative routes (duplicate nodes or channels) reduces the likelihood of a complete communication failure. In a real aviation network, the structure may be more complex, including many nodes and intersecting routes. For

the general model, we introduce a set of minimal cuts of the graph – critical sets of components, the failure of which leads to a violation of connectivity. Let us denote by  $C$  the set of all minimal sections:

$$C = \{C_1, C_2, \dots, C_K\}, \quad (6)$$

where each  $C_i$  represents the minimum set of nodes and/or edges, at the simultaneous failure of which the graph  $G$  splits into disconnected parts. Thus, the elements of  $C_i$  are the “critical” nodes and lines that form the vulnerable point of the network.

Aviation DTN is subject not only to accidental failures, but also to targeted unauthorized influences. These include attacks on network nodes (for example, unauthorized entry into the on-board network or disabling the control server), intentional interference in communication channels (jamming the radio signal), the introduction of false commands or data, and other types of malicious actions that can disrupt the normal operation of the system. To quantify such threats, we introduce their probabilistic model. Let us assume that for each element of the network, it is possible to estimate the probability of a successful attack during the period under review. Then, by  $P_i^{attack}$  we will denote the probability that the node  $i \in V$  will be compromised by an attacker, i.e. it will be attacked, disrupting its functioning. Similarly, for the  $e \in E$  channel, we will introduce  $P_e^{attack}$  – the probability that a successful attack will be made on the net  $e$ . As a rule, the values of  $P_i^{attack}$  are relatively small, but non-zero, which reflects the very possibility of a successful attack under certain conditions.

The unauthorized interference, in fact, leads to the failure of a node or channel in a similar way to a technical failure, although it has a different nature. Therefore, it is natural to consider an attack as an additional reason for component failure. Let us combine two causes of disruption – accidental failure and a successful attack – in a single probabilistic model of a network element. If we consider these reasons to be statistically independent, then the final probability that the component  $i$  will fail (either due to a failure

or as a result of an attack) is determined by the expression:

$$q_j^{total} = 1 - (1 - q_j)(1 - P_j^{attack}). \quad (7)$$

Here,  $q_j^{total}$  is the total probability of the element being inoperable for any of two reasons. Formula (7) shows that the element will fail if at least one of two events occurs: an internal technical failure or a successful external impact. Equivalently, you can write down the probability of fail-safe operation, taking into account attacks:

$$p_j^{total} = (1 - q_j)(1 - P_j^{attack}) \quad (8)$$

in other words, the component will continue to function only in the absence of a failure and the absence of a successful attack.

Probabilities  $P_j^{attack}$  characterize the vulnerability of network elements. An attacker, as a rule, seeks to attack the most critical nodes and communication lines, the failure of which leads to maximum disruption of the network. In terms of the minimal cuts introduced earlier, a targeted attack can be aimed at disabling all components of a certain section  $C_K$ , which is guaranteed to disrupt the network connectivity. However, the possibility of implementing such a complex attack depends on the resources of the intruder and is reduced if the cut includes a significant number of elements. Nevertheless, the mathematical model must take into account various attack scenarios: from single attacks on individual nodes or channels to combined attacks targeting several network elements simultaneously. For each scenario, you can set the corresponding probability of threat implementation  $P_j^{attack}$  or a group of probabilities for a set of attacked elements.

An important factor reducing the impact of threats is a network-based unauthorized interference detection system. Let us assume that the monitoring and diagnostic tools have been implemented in the aviation data transmission system under consideration, which make it possible to detect anomalies in data transmission. These tools include attack detection systems, network traffic analyzers, message integrity monitoring

mechanisms, and other monitoring technologies. Their main task is to timely identify the facts of an attack or abnormal behavior of the network with a high probability with a minimum number of false warnings.

Let us model the process of detecting attacks in a probabilistic setting. Let us introduce two key indicators of the effectiveness of the detection system:

(1)  $p_d$  is the probability of correctly detecting an attack (system sensitivity);

(2)  $p_{fa}$  is the probability of a false alarm, i.e. the formation of an alarm in the absence of a real threat.

If an attack occurs in the DTN, it is likely that it will be detected by monitoring tools, and it is likely that the attack will remain unnoticed and the probability will be  $1 - p_d$ . A value of  $p_d$  close to 1 means effective detection of almost all attacks, while a decrease in  $p_d$  indicates an increased likelihood of threats being missed. The indicator  $p_{fa}$  characterizes the selectivity of the system: in the absence of attacks, false positives occur with a probability of  $p_{fa}$ . It is desirable that  $p_{fa}$  was minimal in order to avoid excessive strain on operators and incident response systems.

Thus, the probability of a successful attack that is not detected by monitoring decreases in proportion to the detection factor  $p_d$ . Formally, we introduce the effective probability of a successful attack, taking into account the operation of the detection system:

$$\tilde{P}_j^{attack} = P_j^{attack}(1 - p_d). \quad (9)$$

Substituting  $P_j^{attack}$  with  $\tilde{P}_j^{attack}$  in formula (7) for the probability of component failure, you can recalculate the total probability of its failure, taking into account the functioning of the monitoring system. From (7), taking into account (9), we obtain for any node or channel:

$$\tilde{q}_i = 1 - (1 - q_j)(1 - \tilde{P}_j^{attack}), \quad (10)$$

where  $q_j$  is the probability of a technical failure of a node or channel  $j$ ;  $\tilde{P}_j^{attack}$  is the probability

of a successful undetected attack on the component  $j$ .

The values defined above allow us to estimate the total risk for DTN. By risk  $P(F)$ , we mean the probability of an event  $F$  in which the network loses connectivity, that is, data exchange between some nodes becomes impossible. Such an event  $F$  occurs if all components of at least one of the minimal sections of the network graph  $C_K$  fail. The probability of connectivity disruption is thus determined by a combination of independent failures and undetected attacks affecting network nodes and channels. Assuming the independence of such outcomes for different sections, it is possible to obtain an approximate estimate of the total probability as the sum of the failure probabilities of all critical sets:

$$P(F) = \sum_{k=1}^K \prod_{j \in C_K} \tilde{q}_j. \quad (11)$$

Formula (11) takes into account all possible critical sections of the network and, in fact, adds up the risks of loss of connectivity for each of them. This amount slightly overestimates the true value of  $P(F)$ , since different sections may have common components (their failure events are not independent). For a more accurate calculation, the inclusion-exclusion principle or other methods of network reliability theory would be required. Nevertheless, the resulting expression provides a useful risk assessment and allows you to compare different network configurations and options for protective measures.

If any section of the network has a significantly higher probability of failure compared to the rest, then the overall risk  $P(F)$  is determined primarily by this “weak point”. For example, if there is a single critical node in the network through which all data passes, then the probability of a complete network failure is approximately equal to  $\tilde{q}_i$  – the effective probability of failure of this node (taking into account attacks). In more balanced networks, where the failure of a single element does not immediately lead to the collapse of the network, several terms in (11) contribute to the risk calculation.

## Discussion of the results

The obtained mathematical model makes it possible to quantify the impact of failures and unauthorized impacts on the functioning of the aviation DTN. Based on the model, it is possible to identify the most vulnerable network elements – nodes and channels included in the minimum sections with the highest probability of failure. Obviously, it is the failure of these critical components that determines the main contribution to the risk  $P(F)$ . The next step after assessing the risk is to develop measures to reduce it. Optimization of the aviation network protection strategy should be aimed at reducing the likelihood of successful attacks and failures of those elements that most significantly affect network connectivity, which will be reflected in future publications.

## Conclusion

The paper presents a mathematical model describing the threats to the functioning of the aviation SPD in conditions of unauthorized interference. The proposed approach integrates a probabilistic model of technical failures with a model of deliberate attacks and their detection. Based on the model, analytical expressions are obtained to estimate the probability of network connectivity loss (formulas (7)–(11)) and it is shown how various factors – network topology, node reliability, attack intensity and detection efficiency – affect the overall risk of disruption. The scientific novelty of the result consists in the formal consideration of unauthorized exposure factors and security monitoring in the task of network reliability. The practical value of the work lies in the fact that the model allows you to identify the most vulnerable elements of the network and justify priority protection measures. Improving the reliability of critical nodes and channels, as well as the introduction of effective airborne detection systems, reduces the likelihood of successful attacks and thereby increases flight safety. The developed model can be used in the design of advanced information systems for quantifying the risk of interference and optimal allocation of protection resources.

## References

1. **Ukwandu, E., Ben-Farah, M.A., Hindy, H. et al.** (2022). Cyber-security challenges in aviation industry: a review of current and future trends. *Information*, vol. 13, no. 3, ID: 146. DOI: 10.3390/info13030146 (accessed: 20.11.2024).
2. **Ben Mahmoud, M.S., Pirovano, A., Larrieu, N.** (2014). Aeronautical communication transition from analog to digital data: A network security survey. *Computer Science Review*, vol. 11–12, pp. 1–29. DOI: 10.1016/j.cosrev.2014.02.001
3. **Kızılcan, S., Mızrak, K.C.** (2022). Cyber attacks in civil aviation and the concept of cyber security. *International Journal of Disciplines Economics & Administrative Sciences Studies*, vol. 8, no. 47, pp. 742–752. DOI: 10.29228/ideas.65891
4. **Gaurav, D., Gaurav, Ch., Vikas, S., IIsun, Y., Kim-Kwang, R.Ch.** (2022). Cyber security challenges in aviation communication, navigation, and surveillance. *Computers & Security*, vol. 113. ID: 102516. DOI: 10.1016/j.cose.2021.102516 (accessed: 20.11.2024).
5. **Kagalwalla, N., Churi, P.P.** (2019). Cybersecurity in aviation: An intrinsic review. *In: 2019 5th International Conference On Computing, Communication, Control and Automation (ICCUBEA)*, India, Pune, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICCUBEA47591.2019.9128483 (accessed: 20.11.2024).
6. **Corretjer, P.J.** (2018). A Cybersecurity analysis of today's commercial aircrafts and aviation industry systems: A thesis master of science. USA, NY, Utica College, 22 p.
7. **Kulik, A.A., Bolshakov, A.A.** (2021). Methodological approaches to development of intelligent aviation safety control system. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, no. 3, pp. 41–48. DOI: 10.24143/2072-9502-2021-3-41-48 (in Russian)
8. **Basora, L., Olive, X., Dubot, T.** (2019). Recent advances in anomaly detection methods applied to aviation. *Aerospace*, vol. 6, no. 11, ID: 117. DOI: 10.3390/aerospace6110117 (accessed: 20.11.2024).
9. **Zhang, R., Liu, G., Liu, J., Nees, J.P.** (2018). Analysis of message attacks in aviation data-link communication. *IEEE Access*, vol. 6, pp. 455–463. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2767059 (accessed: 20.11.2024).
10. **Meshankov, D.V., Tikhonov, A.I.** (2021). Implementation of a new safety information system. *Moscow Economic Journal*, no. 10. DOI: 10.24411/2413-046X-2021-10601 (accessed: 20.11.2024). (in Russian)
11. **Koptev, D.S., Mukhin, I.E.** (2020). Concept of integrated airborne systems for providing aircraft operations safety, including systems for monitoring the functional state of the operator. *T-Comm*, vol. 14, no. 12, pp. 58–65. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-12-58-65
12. **Ganichev, A.A., Pitelinskiy, K.V., Britvina, V.V.** (2024). Statistical analysis of potential threats to information security in the aircraft on-board network. *Information security questions*, no. 1 (144), pp. 11–22. DOI: 10.52190/2073-2600\_2024\_1\_11 (in Russian)
13. **Petrov, V.I.** (2016). Undeclared Capabilities of Aircraft Onboard Computer Software. *In: Grazhdanskaya aviatsiya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva: sbornik tezisov dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 45-letiyu Universiteta*, p. 160. (in Russian)
14. **Taleqani, A.R., Nygard, K.E., Bridgell, R., Hough, J.** (2018). Machine learning approach to cyber security in aviation. *In: 2018 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT)*, Rochester, MI, USA, pp. 0147–0152. DOI: 10.1109/EIT.2018.8500165
15. **Wrana, M.M., Elsayed, M., Lounis, K., Mansour, Z., Ding, S., Zulkernine, M.** (2022). OD1NF1ST: True skip intrusion detection and avionics network cyber-attack simulation. *ACM Transactions on Cyber-Physical Systems*, vol. 6, no. 4, ID: 33, 27 p. DOI: 10.1145/3551893 (accessed: 20.11.2024).
16. **Mashoshin, A.O.** (2021). Message verification of the automatic dependent surveillance system under unauthorized intervention using the monolateration method. *Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil*

*Aviation (GosNII GA)*, no. 37, pp. 136–145. (in Russian)

17. **Ganichev, A.A., Pitelinskiy, K.V., Kesel, S.A., Pikov, V.A.** (2024). Threat model of unauthorized interference in wireless avionics information systems. *Information security questions*, no. 4 (147), pp. 35–43. DOI: 10.52190/2073-2600\_2024\_4\_35 (in Russian)

18. **Petrov, V.I.** (2017). The technique of analysis of software of on-board computers of air vessel to absence of undeclared capabilities by signature-heuristic way. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 20, no. 1, pp. 186–193. (in Russian)

19. **Kessler, G.C., Craiger, J.P.** (2018). Aviation cybersecurity: An overview. In: *The National Training Aircraft Symposium (NTAS) 2018*. Available at: <https://commons.erau.edu/ntas/2018/presentations/37/> (accessed: 20.11.2024).

20. **Israfilov, A.** (2024). Contemporary challenges in cybersecurity of unmanned aerial systems. *Universum: Technical Sciences*, no. 2 (119). Available at: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/16760> (accessed: 20.11.2024). (in Russian)

21. **Lyanguzov, D.A., Plyusnin, N.I.** (2023). Security and vulnerability of unmanned aerial vehicle networks: a review. *Izvestiya Tullskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskkiye nauki*, issue 7, pp. 528–529. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-7-528-529 (in Russian)

22. **Costin, A., Turtiainen, H., Khandker, S., Hämmäläinen, T.** (2023). Towards a unified cybersecurity testing lab for satellite, aerospace, avionics, maritime, drone (SAAMD) technologies and communications. *Cryptography and Security*. DOI: 10.48550/arXiv.2302.08359 (accessed: 20.11.2024).

23. **Habler, E., Bitton, R., Shabtai, A.** (2022). Evaluating the security of aircraft systems. *Cryptography and Security*, 38 p. DOI: 10.48550/arXiv.2209.04028 (accessed: 20.11.2024).

## Список литературы

1. **Ukwandu E., Ben-Farah M.A., Hindy H. и др.** Cyber-security challenges in aviation industry: a review of current and future trends [Электронный ресурс] // *Information*.

2022. Vol. 13, no. 3. ID: 146. DOI: 10.3390/info13030146 (дата обращения: 20.11.2024).

2. **Ben Mahmoud M.S., Pirovano A., Larrieu N.** Aeronautical communication transition from analog to digital data: A network security survey // *Computer Science Review*. 2014. Vol. 11–12. Pp. 1–29. DOI: 10.1016/j.cosrev.2014.02.001

3. **Kızılcan S., Mızrak K.C.** Cyber attacks in civil aviation and the concept of cyber security // *International Journal of Disciplines Economics & Administrative Sciences Studies*. 2022. Vol. 8, no. 47. Pp. 742–752. DOI: 10.29228/ideas.65891

4. **Gaurav D.** Cyber security challenges in aviation communication, navigation, and surveillance / D. Gaurav, Ch. Gaurav, S. Vikas, Y. Ilun, R.Ch. Kim-Kwang [Электронный ресурс] // *Computers & Security*. 2022. Vol. 113. ID: 102516. DOI: 10.1016/j.cose.2021.102516 (дата обращения: 20.11.2024).

5. **Kagalwalla N., Churi P.P.** Cybersecurity in aviation: An intrinsic review [Электронный ресурс] // 2019 5th International Conference On Computing, Communication, Control and Automation (ICCUBEA). India, Pune, 2019. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICCUBEA47591.2019.9128483 (дата обращения: 20.11.2024).

6. **Corretjer P.J.** A Cybersecurity analysis of today's commercial aircrafts and aviation industry systems: A thesis master of science. USA, NY, Utica College, 2018. 22 p.

7. **Кулик А.А., Большаков А.А.** Методологические подходы к разработке интеллектуальной авиационной системы управления безопасностью полетов // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика*. 2021. № 3. С. 41–48. DOI: 10.24143/2072-9502-2021-3-41-48

8. **Basora L., Olive X., Dubot T.** Recent advances in anomaly detection methods applied to aviation [Электронный ресурс] // *Aerospace*. 2019. Vol. 6, no. 11. ID: 117. DOI: 10.3390/aerospace6110117 (дата обращения: 20.11.2024).

9. **Zhang R.** Analysis of message attacks in aviation data-link communication / R. Zhang, G. Liu, J. Liu, J.P. Nees [Электронный ресурс] // *IEEE Access*. 2018. Vol. 6. Pp. 455–463. DOI:

10.1109/ACCESS.2017.2767059 (дата обращения: 20.11.2024).

10. **Мешанков Д.М., Тихонов А.И.** Внедрение новой информационной системы обеспечения безопасности полетов [Электронный ресурс] // Московский экономический журнал. 2021. № 10. DOI: 10.24411/2413-046X-2021-10601 (дата обращения: 20.11.2024).

11. **Коптев Д.С., Мухин И.Е.** Концепция разработки комплексных бортовых систем обеспечения безопасности полетов воздушных судов, включая системы контроля функционального состояния оператора // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14, № 12. С. 58–65. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-12-58-65

12. **Ганичев А.А., Пителинский К.В., Бритвина В.В.** Статистический анализ потенциальных угроз информационной безопасности в бортовой сети воздушного судна // Вопросы защиты информации. 2024. № 1 (144). С. 11–22. DOI 10.52190/2073-2600\_2024\_1\_11

13. **Петров В.И.** Недекларированные возможности программного обеспечения бортовых компьютеров воздушного судна // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества: сборник тезисов докладов Международной научно-техн. конференции, посвященной 45-летию Университета. Москва, 18–20 мая 2016 года. М.: ИД Академии имени Н.Е. Жуковского, 2016. С. 160.

14. **Taleqani A.R.** Machine learning approach to cyber security in aviation / A.R. Taleqani, K.E. Nygard, R. Bridgelall, J. Hough // 2018 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT). USA, MI, Rochester, 2018. Pp. 0147–0152. DOI: 10.1109/EIT.2018.8500165

15. **Wrana M.M.** OD1NF1ST: True skip intrusion detection and avionics network cyber-attack simulation / M.M. Wrana, M. Elsayed, K. Lounis, Z. Mansour, S. Ding, M. Zulkernine [Электронный ресурс] // ACM Transactions on Cyber-Physical Systems. 2022. Vol. 6, no. 4. ID: 33. 27 p. DOI: 10.1145/3551893 (дата обращения: 20.11.2024).

16. **Машошин А.О.** Определение истинности сообщений системы автоматического зависящего наблюдения в условиях несанкционированного вмешательства на управление воздушным движением за счет метода монолатерации // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2021. № 37. С. 136–145.

17. **Ганичев А.А.** Модель угроз несанкционированного вмешательства в беспроводных информационных системах авионики / А.А. Ганичев, К.В. Пителинский, С.А. Кесель, В.А. Пиков // Вопросы защиты информации. 2024. № 4 (147). С. 35–43. DOI: 10.52190/2073-2600\_2024\_4\_35

18. **Петров В.И.** Методика анализа программного обеспечения бортовых компьютеров воздушного судна на отсутствие недеklarированных возможностей сигнатурно-эвристическим способом // Научный вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 1. С. 186–193.

19. **Kessler G.C., Craiger J.P.** Aviation cybersecurity: An overview [Электронный ресурс] // The National Training Aircraft Symposium (NTAS) 2018. URL: <https://commons.erau.edu/ntas/2018/presentations/37/> (дата обращения: 20.11.2024).

20. **Исрафилов А.** Современные вызовы в области кибербезопасности беспилотных авиационных систем [Электронный ресурс] // Universum: технические науки. 2024. № 2 (119). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/16760> (дата обращения: 20.11.2024).

21. **Лянгузов Д.А., Плюснин Н.И.** Безопасность и уязвимость сетей беспилотных летательных аппаратов: обзор // Известия ТулГУ. Технические науки. 2023. Вып. 7. С. 528–529. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-7-528-529

22. **Costin A.** Towards a unified cybersecurity testing lab for satellite, aerospace, avionics, maritime, drone (SAAMD) technologies and communications / A. Costin, H. Turtiainen, S. Khandker, T. Hämäläinen [Электронный ресурс] // Cryptography and Security. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2302.08359 (дата обращения: 20.11.2024).

23. **Habler E., Bitton R., Shabtai A.** Evaluating the security of aircraft systems [Электронный ресурс] // Cryptography and Security. 2022. 38 p. DOI: 10.48550/arXiv.2209.04028 (дата обращения: 20.11.2024).

### Information about the authors

**Alexandr A. Ganichev**, Senior Lecturer, the Chair of Fundamentals of Radio Engineering and Information Security, Moscow State Technical University of Civil Aviation, alexunderlich@gmail.com.

**Viktor I. Petrov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, the Head of the Chair of Fundamentals of Radio Engineering and Information Security, the Dean of the Faculty of Aviation Systems and Complexes, Moscow State Technical University of Civil Aviation, v.petrov@mstuca.ru.

### Сведения об авторах

**Ганичев Александр Александрович**, старший преподаватель кафедры основ радиотехники и защиты информации МГТУ ГА, alexunderlich@gmail.com.

**Петров Виктор Иванович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой основ радиотехники и защиты информации, декан факультета авиационных систем и комплексов МГТУ ГА, v.petrov@mstuca.ru.

Поступила в редакцию	24.03.2025	Received	24.03.2025
Одобрена после рецензирования	30.04.2025	Approved after reviewing	30.04.2025
Принята в печать	24.07.2025	Accepted for publication	24.07.2025

**МАШИНОСТРОЕНИЕ**

- 2.5.12 – Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов;  
2.5.13 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов;  
2.5.14 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов;  
2.5.15 – Тепловые электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов;  
2.5.16 – Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов

УДК 629.7.048.3

DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-4-50-66

**Анализ современных требований к разработке системы кондиционирования воздуха воздушных судов**

**Д.Ю. Парубин<sup>1</sup>, И.Г. Кирпичев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ОКБ Сухого, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский государственный технический университет гражданской авиации,  
г. Москва, Россия

**Аннотация:** Проведено исследование современных требований к разработке системы кондиционирования воздуха (СКВ) гражданских воздушных судов (ВС) транспортной категории в контексте их актуализации и гармонизации с международным передовым опытом в области проектирования и сертификации авиационной техники (АТ). Установлено, что конкурентоспособность ВС непосредственно коррелирует с полнотой и детализированностью норм летной годности (НЛГ), что в свою очередь оказывает значительное влияние на безопасность полетов и эффективность эксплуатации ВС. Рассмотрены рекомендации Международной организации гражданской авиации (ИКАО) к разработке национальных НЛГ и обеспечению их единообразия у государств – разработчиков АТ, рекомендации ИКАО к разработке СКВ ВС. Рассмотрены и обобщены передовые практики Федеральной авиационной администрации (FAA), Европейского агентства по безопасности полетов (EASA) в области непрерывной системной актуализации и гармонизации НЛГ. Сформулированы и описаны основные факторы: процедуры сертификации АТ, взаимодействие авиационных властей с предприятиями-разработчиками, международные двусторонние соглашения о безопасности полетов (BASA), – в совокупности определяющие единообразие зарубежных сертификационных систем в рамках обеспечения высокого уровня безопасности полетов и эффективной эксплуатации ВС. Выполнен сравнительный анализ национальных НЛГ Российской Федерации, Европейского союза, США AP 25 и НЛГ 25, CS 25, Part 25 соответственно к СКВ. Выявлены сходства и различия требований Российской Федерации, Европейского союза и США; представлена оценка степени единообразия отечественных и зарубежных НЛГ к СКВ ВС. Сформулированы концептуальные предложения по актуализации и дополнению отечественных НЛГ с целью повышения эксплуатационно-технических характеристик данной функциональной системы ВС.

**Ключевые слова:** гражданская авиация, воздушное судно, конкурентоспособность, безопасность полетов, эффективность эксплуатации, система кондиционирования воздуха, ИКАО, нормы летной годности, сертификация.

**Для цитирования:** Парубин Д.Ю., Кирпичев И.Г. Анализ современных требований к разработке системы кондиционирования воздуха воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 4. С. 50–66. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-4-50-66

**Analysis of modern requirements for the development of aircraft air conditioning system**

**D.Yu. Parubin<sup>1</sup>, I.G. Kirpichev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>EDB Sukhoi, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

**Abstract:** The article presents a study of modern requirements for the development of air conditioning systems (ACS) of transport category civil aircraft in the context of their updating and harmonization with international best practices in the field of aircraft

design and certification. It has been established that the competitiveness of an aircraft directly correlates with the completeness and detail of airworthiness standards (AS), which, in turn, has a significant impact on flight safety and operational efficiency of aircraft. Consideration is given to the recommendations from the International Civil Aviation Organization (ICAO) regarding the development of national AS and ensuring their uniformity among states-developers of aircraft, and to ICAO recommendations for the ACS development. Advanced practices by the Federal Aviation Administration (FAA), the European Aviation Safety Agency (EASA) in the field of continuous systemic updating and harmonization of AS have been reviewed and summarized. The key factors: aircraft certification procedures, interaction between aviation authorities and development enterprises, international bilateral agreements on flight safety (BASA) – all of which together determine the uniformity of foreign certification systems to ensure a high level of flight safety and efficient operation of aircraft – have been formulated and described. A comparative analysis of the Russian Federation, the EU, the USA national AS has been performed: AP 25 and Airworthiness Norms 25 by Rosaviatsia, CS 25, Part 25, respectively, to the aircraft ACS. Similarities and differences in the requirements between the Russian Federation, the USA, and the EU have been identified along with an assessment of uniformity levels between domestic and foreign AS related to the aircraft ACS. Conceptual proposals for updating and supplementing the AS for increasing operational and technical characteristics of this functional aircraft system have been formulated.

**Key words:** civil aviation, aircraft, competitiveness, flight safety, operating efficiency, air conditioning system, ICAO, airworthiness standards, certification.

**For citation:** Parubin, D.Yu., Kirpichev, I.G. (2025). Analysis of modern requirements for the development of aircraft air conditioning system. Civil Aviation High Technologies, vol. 28, no. 4, pp. 50–66. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-4-50-66

## Введение

Конкурентоспособность воздушного судна (ВС) как сложной технической системы может быть достигнута прежде всего за счет повышения эксплуатационно-технических характеристик (ЭТХ) входящих в его состав подсистем, разрабатываемых на основании рекомендаций Международной организации гражданской авиации (ИКАО), национальных норм летной годности (НЛГ) и требований сертификационного базиса. НЛГ содержат минимальные государственные технические требования к ВС гражданского назначения. Полнота и детализированность НЛГ существенно влияет на безопасность полетов (БП) и эффективность эксплуатации ВС.

Одной из жизненно важных функциональных систем ВС является система кондиционирования воздуха (СКВ), предназначенная для поддержания нормируемых условий внутри отдельных герметичных отсеков при воздействии знакопеременных внешних тепловых нагрузок и внутренних источников тепла.

Текущей актуальной проблематикой обеспечения требуемого уровня БП и эффективности эксплуатации российских ВС на внешнем и внутреннем рынках является отставание отечественной нормативной правовой базы (НПБ) от зарубежной [1–5]. Как минимум за 15 лет интенсивной эксплуатации зарубежной АТ в качестве основной для Рос-

сийской Федерации наблюдается значительное отставание в области проектирования и сертификации ВС нового поколения [6]. Несмотря на происходящие процессы гармонизации российской НПБ с иностранной, прослеживаются определенные сложности при сертификации отечественных ВС по зарубежным стандартам.

В современной отечественной научной литературе тематика конструктивно-технического устройства СКВ и ее подсистем широко освещена. Работы российских научных деятелей д. т. н. А.В. Чичиндаева, к. т. н. И.В. Тищенко, к. т. н. А.В. Суворова, Д.И. Смагина и многих других посвящены вопросам оптимизации и улучшения конструкции, агрегатов, экспериментальным и численным исследованиям теплогазодинамических процессов, протекающих в СКВ, ВС в целом. Тематике актуализации и гармонизации авиационной НПБ посвящены работы д. т. н. В.С. Шапкина, д. т. н. А.А. Кулешова, к. т. н. А.Я. Книвелю, к. т. н. А.В. Явкина и многих других. Рассмотрение требований НЛГ к СКВ в изученных научных трудах не производилось ранее и, следовательно, не охватывает вопросы анализа отличительных особенностей авиационных правил (АП), разработанных Федеральной авиационной администрацией (FAA), Европейским агентством по безопасности полетов (EASA), Федеральным агентством воздушного транспорта (Росавиация).

В рамках одной функциональной системы проведено исследование АП Российской Федерации, США, Европейского союза (ЕС) для выявления различий и оценки степени единообразия отечественных и зарубежных НЛГ к СКВ гражданских ВС транспортной категории в контексте их актуализации и гармонизации с международным передовым опытом в области разработки АТ. Целью данного исследования является повышение ЭТХ СКВ отечественных ВС вследствие развития и совершенствования требований к данной функциональной системе.

Для достижения поставленных целей были использованы методы теоретического исследования, включающие абстрагирование, анализ и синтез, индукцию и дедукцию, а также методы эмпирического исследования: наблюдение и сравнение.

## Рекомендации и требования к сертификации воздушных судов

Процесс разработки отечественных НЛГ, отвечающих современным авиационным стандартам «качества», базируется на следующих фундаментальных положениях:

- рекомендациях ИКАО к разработке ВС и обеспечению степени единообразия НЛГ государств-разработчиков;
- ранее действовавших в СССР и отмененных Нормах летной годности гражданских самолетов СССР (НЛГС): НЛГС-1, НЛГС-2, НЛГС-3; АП 25 (Межгосударственного авиационного комитета (МАК), введенных в действие приказом Министерства транспорта Российской Федерации от 5 июля 1994 года № 48<sup>1</sup>, а затем перевыпущенных на основании приказа Минтранса России от 25 января 2016 года № 13<sup>2</sup>);

- национальных НЛГ передовых авиационных государств-разработчиков: США, ЕС.

На основании Приложения 8<sup>3</sup> к Конвенции о международной гражданской авиации<sup>4</sup> каждое государство разрабатывает национальные НЛГ, которые определяют содержание минимальных и достаточных требований, необходимых конкретному государству для сертификации и поддержания летной годности (ЛГ) ВС. Статья 37 Конвенции и политика ИКАО рекомендуют, чтобы государства – разработчики АТ предусматривали сотрудничество, направленное на достижения в максимально возможной степени единообразия правил, стандартов, процедур и организации в отношении ВС, в области которых такое единообразие будет способствовать воздушной навигации и совершенствовать ее. Процесс гармонизации с точки зрения ИКАО направлен на создание единой согласованной государствами-разработчиками системы, которая учитывает и признает различия стандартов, но при этом обеспечивает единые принципы, подходы и методы для определения критических требований.

Рекомендации ИКАО к разработке СКВ ВС, изложенные в приложениях 6, 8, представлены в табл. 1.

На данный момент ведущими мировыми центрами сертификации ВС являются ЕС и США. Вследствие этого многие государства – разработчики АТ, в том числе Российская Федерация, берут за основу их НПБ или полностью признают требования, а также выданные FAA и EASA сертификаты типа [7, 8]. Частичная гармонизация отдельных разделов российских НЛГ и процедур сертификации привела к тому, что организации – разработчики АТ в настоящее время в Российской Федерации вынуждены работать

<sup>1</sup> Приказ Министерства транспорта РФ № 48 от 5 июля 1994 г. О введении в действие авиационных правил [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901985015> (дата обращения: 01.09.2024).

<sup>2</sup> Приказ Министерства транспорта РФ № 13 от 25 января 2016 г. О введении в действие авиационных

правил [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420344821> (дата обращения: 01.09.2024).

<sup>3</sup> Annex 8: Airworthiness of Aircraft. 13th ed. // ICAO, 2022. 346 p.

<sup>4</sup> Конвенция о международной гражданской авиации. 9-е изд., 2006. 51 с.

Таблица 1  
Table 1

Рекомендации ИКАО к СКВ<sup>3,5</sup>  
ICAO recommendations for the air conditioning system<sup>3,5</sup>

Стандарты ИКАО	Рекомендации
Приложение 6, глава 6, пункт 6.7. Все самолеты: высотные полеты. Подпункты 6.7.1–6.7.6	К обеспечению самолета кислородным оборудованием и средствами сигнализации о разгерметизации кабины
Приложение 8, часть ШВ, глава 4, пункт 4.2. Особенности проектирования систем. Подпункты: h – защита людей на борту самолета, i – защита кабины летного экипажа от дыма и газов	К предотвращению возможности разгерметизации кабины, вредного действия дыма или других токсичных газов на пассажиров и летный экипаж
Приложение 8, часть ШВ, глава 4, пункт 4.4. Особенности размещения людей на борту. Подпункт 4.4.2. Условия в кабине	К обеспечению в кабине надлежащих условий при выполнении предполагаемого полета и операций на земле или на воде

бессистемно с набором как отечественных, так и зарубежных стандартов, не всегда соответствующих последним актуальным редакциям. В то же время зарубежные государства-разработчики, например США, ЕС, Канада, Бразилия и другие, осуществляют процесс разработки АТ системно, непрерывно и тесно сотрудничают в процессе разработки и эксплуатации АТ, внедряют инновационные решения в рамках единой непрерывной системы актуализации и гармонизации НЛГ. Данная система определяется факторами 1–3.

### 1. Процедура сертификации АТ

До 2015 года в Российской Федерации Авиационный регистр Межгосударственного авиационного комитета (АР МАК), являющийся департаментом МАК, осуществлял сертификацию АТ, ее разработчиков и изготовителей, а также признание действующих систем сертификации авиационных властей других государств. 28 ноября 2015 года в соответствии с постановлением Правительства (ПП) Российской Федерации № 1283<sup>5</sup>

функции и полномочия по обязательной сертификации, которые были возложены на МАК, переданы Минтрансу России, Минпромторгу России и Росавиации. 7 октября 2016 года в соответствии с ПП Российской Федерации № 1011<sup>6</sup> функции и полномочия по сертификации АТ забрали у Минпромторга России и оставили Минтрансу России и Росавиации. Данные изменения повлекли за собой усложнение процедуры сертификации АТ в Российской Федерации.

На рис. 1 представлены блок-схемы процедур сертификации АТ в Российской Федерации, США, ЕС.

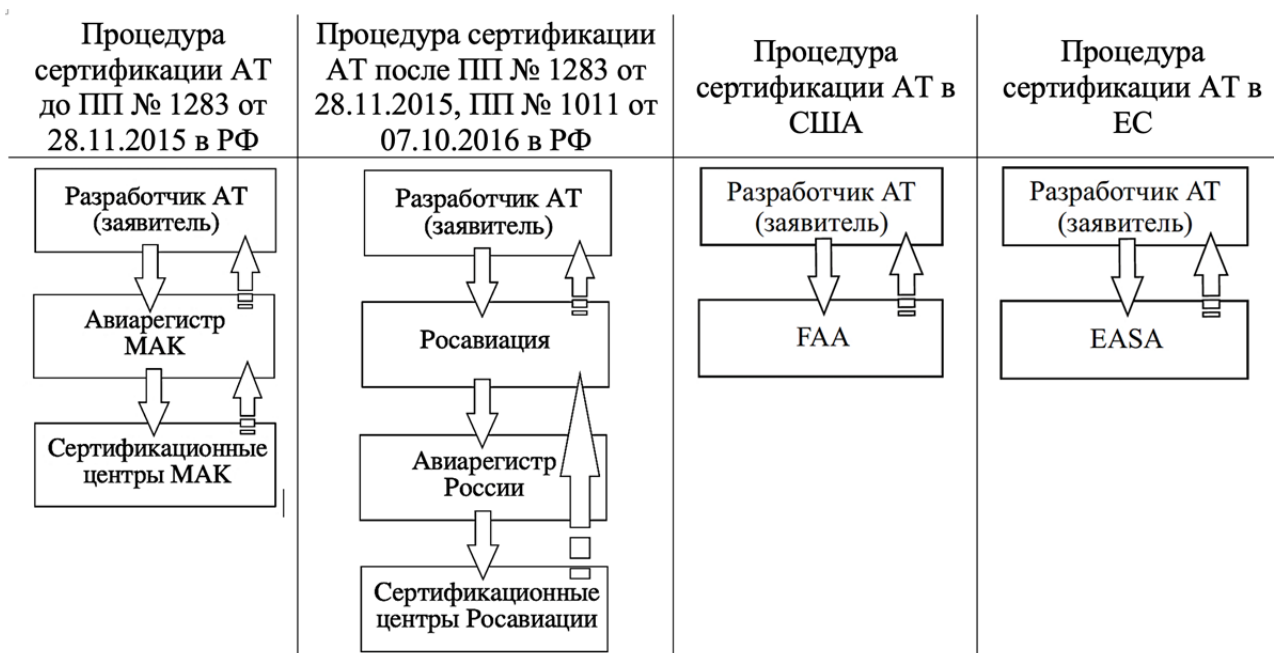
До ПП № 1283 от 28.11.2015 в соответствии с АП 21<sup>7</sup> разработчик (заявитель) ВС

ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420319252> (дата обращения: 01.09.2024).

<sup>6</sup> Постановление Правительства Российской Федерации № 1011 от 7 октября 2016 г. О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации и признании утратившими силу отдельных положений актов Правительства Российской Федерации [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420378631> (дата обращения: 01.09.2024).

<sup>7</sup> Авиационные правила. Сертификация авиационной техники, организаций разработчиков и изготовителей. Часть 21. Утв. приказом Минтранса России

<sup>5</sup> Постановление Правительства Российской Федерации № 1283 от 28 ноября 2015 г. Об изменении и признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации [Электронный



**Рис. 1.** Блок-схемы процедур сертификации АТ в Российской Федерации, США, ЕС  
**Fig. 1.** Flowcharts of aircraft certification procedures in the Russian Federation, the United States of America, the European Union

подавал заявку образца АТ в АР МАК, который в соответствии с Положением об АР МАК, утвержденным МАК, осуществлял утверждение сертификационного базиса и методов оценки соответствия (МОС) в рамках НЛГ, формировал и назначал комиссию и при необходимости привлекал сертификационные центры (СЦ), аккредитованные АР МАК. По результатам работ по сертификации АР МАК от имени МАК оформлял одобрительный документ и направлял заявителю.

После ПП № 1283 от 28.11.2015<sup>7</sup> и ПП № 1011 от 07.10.2016<sup>8</sup> в соответствии с ФАП 21<sup>8</sup> разработчик ВС подает заявку об-

разца АТ в Росавиацию, которая принимает и регистрирует заявку, проводит ее первичную оценку и направляет в Авиационный регистр Российской Федерации (далее – Авиарегистр). Авиарегистр по результатам рассмотрения заявки осуществляет утверждение сертификационного базиса и МОС в рамках НЛГ, оформляет заключение о готовности заявителя к проведению оценок соответствия и направляет его в Росавиацию [9]. Росавиация формирует комиссию для проведения аудитов, состоящую из представителей Росавиации, Авиарегистра и при необходимости СЦ, аккредитованных Росавиацией для проведения работ по сертификации. По результатам работ по сертификации Авиарегистр формирует заключение и оформляет одобрительный документ, на основании которого Росавиация оформляет сертификат типа и направляет его заявителю.

В США и ЕС полный цикл сертификации АТ, разработчика, изготовителя, признание действующей системы сертификации авиационных властей других государств заключен в рамках одного федерального органа [10, 11] – FAA, являющегося федеральным

№ 474 от 19.12.2013 [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/499069233> (дата обращения: 01.09.2024).

<sup>8</sup> Федеральные авиационные правила. Сертификация авиационной техники, организаций разработчиков и изготовителей. Часть 21. Утв. приказом Минтранса России № 184 от 17.06.2019 с изменениями на 29 мая 2023 г. [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/560537769> (дата обращения: 01.09.2024).

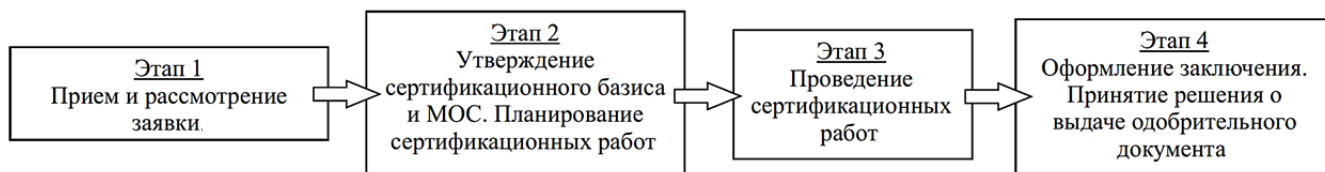


Рис. 2. Блок-схема этапов процедуры сертификации АТ  
Fig. 2. Aircraft certification procedure stages flowchart

правительственным учреждением США в составе Министерства транспорта США, или EASA, являющегося агентством Европейской комиссии – высшим органом исполнительной власти ЕС соответственно. На основании Part 21<sup>9</sup> (США) и Part 21<sup>10</sup> (ЕС) FAA и EASA, а также входящие в их состав службы определяют основные направления сертификации, стандарты, утверждают сертификационный базис и МОС, осуществляют планирование, подготовку и проведение сертификационных работ и регламентируют ключевые решения на всех этапах сертификации АТ, приведенных на рис. 2.

В отечественной практике Росавиация выполняет управленческие функции в соответствии с этапами 1–4 процедуры сертификации АТ, являясь федеральным органом исполнительной власти по оказанию государственных услуг и управлению государственным имуществом в сфере воздушного транспорта. В свою очередь Авиарегистр осуществляет выполнение работ по сертификации типовой конструкции ВС и его компонентов, а также подтверждение соответствия типовой конструкции требованиям ФАП. Вследствие данной схемы распределения компетенций процедура сертификации АТ

в Российской Федерации состоит из трех ступеней администрирования, в то время как в США и ЕС – из одной ступени. Разветвленный процесс сертификации АТ увеличивает бюрократическую составляющую, сокращая временную и экономическую эффективность данной процедуры.

## 2. Взаимодействие авиационных властей с предприятиями-разработчиками

Немаловажную роль в высокой степени единообразия норм, правил и стандартов гражданской авиации в рамках системы гармонизации играет фактор взаимодействия авиационных властей с предприятиями-разработчиками [12, 13]. На основе действующих зарубежных документов WI.RPRO.00048-003. SSCC and Sub-SSCC Rule of Procedure<sup>11</sup> в ЕС, а также The FAA and Industry to product certification<sup>12</sup> в США деятельность EASA и FAA осуществляется в тесном сотрудничестве с компаниями авиационной промышленности в рамках разработки авиационных стандартов, консультирования и поддержки их исполнения, мониторинге и оценке их эффективности, а также в обеспечении постоянного об-

<sup>9</sup> Part 21 – Certification procedures for product and articles. Amendment 21-10. 16 October 2009 [Электронный ресурс] // Federal Aviation Administration. URL: <https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-C/part-21> (дата обращения: 01.09.2024).

<sup>10</sup> Acceptable means of compliance (AMC) and guidance material (GM) to Part 21. Issue 2. Amendment 16, 20 October 2023. 252 p. [Электронный ресурс] // European Union Aviation Safety Agency. URL: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/acceptable-means-of-compliance-and-guidance-materials/amc-gm-part-21-issue-2-14> (дата обращения: 01.09.2024).

<sup>11</sup> WI.RPRO.00048-003. SSCC and Sub-SSCC Rule of Procedure [Электронный ресурс] // EASA, 2014. Iss. 003. 9 p. URL: [https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/WI.RPRO\\_00048%20-%20SSCC%20and%20sub-SSCC%20Rule%20of%20Procedure\\_0.pdf](https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/WI.RPRO_00048%20-%20SSCC%20and%20sub-SSCC%20Rule%20of%20Procedure_0.pdf) (дата обращения: 01.09.2024).

<sup>12</sup> The FAA and industry to product certification. 3rd ed. [Электронный ресурс] // Federal Aviation Administration. 2017. URL: [https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/aircraft/air\\_cert/design\\_approvals/transport/CPI\\_guide.pdf](https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/aircraft/air_cert/design_approvals/transport/CPI_guide.pdf) (дата обращения: 01.09.2024).

новления и пересмотра на всех этапах жизненного цикла изделия.

В Российской Федерации отсутствуют документы, определяющие систему сотрудничества авиационных властей с предприятиями разработчиками и изготовителями АТ, несмотря на предпринимаемые попытки осуществления данного взаимодействия.

### 3. Международные двусторонние соглашения

США и ЕС имеют единообразную структуру норм, правил и стандартов, осуществляя активное сотрудничество для поддержания степени их гармонизации, основанной на международных двусторонних соглашениях. Для стандартизации сертификации типа, производства, технического обслуживания и эксплуатации ВС EASA и национальные авиационные органы стран – членов ЕС заключили двусторонние соглашения об авиационной безопасности (BASA) с многочисленными странами, в том числе с США, Канадой, Бразилией и др. Фундаментальными целями соглашений BASA прежде всего являются:

- содействие высокому уровню безопасности воздушного движения;
- обеспечение на высоком уровне сотрудничества и гармонизации в области проектирования, производства и поддержания ЛГ.

В дополнение к данным фундаментальным целям соглашения BASA уделяют особое внимание взаимному признанию авиационных властей и их органов, взаимному признанию сертификатов продукции АТ и ее компонентов, а также утверждению организаций по техническому обслуживанию.

FAA и EASA признают компетенции авиационных органов власти друг друга по исполнению функций сертификации и валидации, что позволяет наиболее эффективно, с минимальными временными и экономическими затратами осуществлять процессы разработки ВС и экспорта АТ на внешний рынок.

В 1998 году сотрудничество между FAA и на тот момент МАК РФ было заключено в противоречивом документе «Процедуры реализации летной годности», известном как «Двустороннее соглашение о безопасности полетов», обусловившее интенсивную эксплуатацию в Российской Федерации зарубежной АТ, включая «старые», с большим налетом иностранные ВС [14]. В свою очередь Российская Федерация имела возможность экспортировать за рубеж только новые ВС с иностранными комплектующими: двигателями, системами, авионикой и подобным [9], что обусловило неравноправие данного соглашения по отношению к Российской Федерации в рамках поставок ВС на внешний рынок.

Рабочее соглашение о ЛГ между Росавиацией и EASA было заключено в 2018 году и нацелено на создание формализованных правил сотрудничества между двумя органами авиационной власти в области сертификации АТ.

Однако на данный момент степень единообразия сертификационных требований Российской Федерации с сертификационными требованиями FAA, EASA недостаточна для подписания полноценных двусторонних соглашений. Попытка сотрудничества Росавиации и FAA изложена в документе «Двустороннее соглашение о безопасности авиации – Исполнительное соглашение» на официальном сайте FAA от 2016 года. Результаты дальнейшего развития и подписание данного соглашения отсутствуют, что объясняется также наложенными FAA и EASA санкциями в отношении ЛГ отечественных ВС.

Вследствие этого процессы гармонизации НПБ в Российской Федерации на данный момент происходят дискретно ввиду отсутствия единой системы с зарубежными передовыми странами в области проектирования, производства и сертификации АТ. Данные особенности являются бесспорным следствием прочных позиций таких компаний, как Boeing и Airbus, на рынке поставок гражданских ВС по всему миру.

Таблица 2  
Table 2

Качественные критерии для оценки степени единообразия  
отечественных и зарубежных НЛГ к СКВ  
Qualitative criteria for assessing the uniformity degree of domestic and foreign  
airworthiness standards for air conditioning system

№ критерия	Наименование критерия	Характеристика критерия
1	Структура построения АП	Определяет наличие МОС в составе НЛГ
2	Нумерация и наименование глав, параграфов, пунктов, подпунктов требований	Определяет структуру сертификационного ба-зиса
3	Объем (количество) требований	Определяет степень детального рассмотрения критически важных требований
4	Физический смысл и суть требова-ний	Определяет конкретные характеристики, пара-метры, конструктивные и функциональные требования к системе

### Отечественные и зарубежные нормы летней годности к системе кондиционирования воздуха воздушных судов

В Российской Федерации действующими требованиями к гражданским ВС транспортной категории являются НЛГ 25<sup>13</sup>, а также АП 25<sup>14</sup> – юридически действуют в Российской Федерации в связи с отсутствием аннулирующих АП 25 нормативных правовых документов (НПД) и с непрерывным процессом сертификации АТ. Сравнительный анализ НЛГ 25 и АП 25 в части требований к СКВ

показал, что требования не претерпели изменений и идентичны последней редакции АП 25.

В ЕС действующими АП являются CS 25<sup>15</sup>, в США – Part 25<sup>16</sup>.

В АП 25, НЛГ 25 требования к СКВ изложены в разделе D «Проектирование и конструкция» и разделе F «Оборудование». В параграфах 25.831–25.833 изложены требования к вентиляции и отоплению; в параграфах 25.841–25.843 – к герметичности кабин и испытаниям герметических кабин; в параграфе 25.1438 – к системам наддува и пневмосистемам.

Сравнительный анализ требований НЛГ 25, CS 25, Part 25 к СКВ и ее подсистемам производился по качественным критериям 1–4, приведенным в табл. 2.

<sup>13</sup> Нормы летной годности самолетов транспортной категории НЛГ 25. Утв. приказом Федерального агентства воздушного транспорта № 961-П от 27.12.2022, ревизия 01 [Электронный ресурс] // Федеральное агентство воздушного транспорта, 2022. 379 с. URL: <https://favt.gov.ru/public/materials/f/a/2/a/1/fa2a15afd4447e2d98ec15d70297a04a.pdf> (дата обращения: 01.09.2024).

<sup>14</sup> Авиационные правила. Часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. Утв. постановлением 28-й сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства от 11.12.2023, 7-е издание с поправками 1-10 [Электронный ресурс] // Агентство гражданской авиации, 2022. 358 с. URL: [https://www.uzcaa.uz/uploads/menu\\_main/f41f18d1a45adaa6345db68215f0a40.pdf](https://www.uzcaa.uz/uploads/menu_main/f41f18d1a45adaa6345db68215f0a40.pdf) (дата обращения: 01.09.2024).

<sup>15</sup> Certification specifications and acceptable means of compliance for large aeroplanes. Amendment 28 [Электронный ресурс] // EASA, 2023. 1515 p. URL: <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/certification-specifications/cs-25-amendment-28> (дата обращения: 01.09.2024).

<sup>16</sup> Part 25 – Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes [Электронный ресурс] // Federal Aviation Administration, 2024. 1074 p. URL: <https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-C/part-25?toc=1> (дата обращения: 01.09.2024).

В табл. 3–8 представлен сравнительный анализ отдельных пунктов требований Российской Федерации, США и ЕС к СКВ ВС. Обобщенные выводы по результатам прове-

денного анализа представлены в подразделе статьи «Результаты проведенного исследования».

Таблица 3  
Table 3

Сравнение отечественных и зарубежных НЛГ к СКВ  
в части вентиляции и отопления<sup>14,16,17</sup>  
Comparison of domestic and foreign airworthiness standards  
for air conditioning system in terms of ventilation and heating<sup>14,16,17</sup>

№ пункта, подпункта	Требования	Государство – разработчик ВС		
		РФ (НЛГ 25)	США (Part 25)	ЕС (CS 25)
Раздел D. Проектирование и конструкция. Вентиляция и отопление Параграф 25.831. Вентиляция				
(a)	К количественному составу вентиляционного воздуха	+	+	+
(b) (1)–(2)	К содержанию вредных или опасных концентраций газов или паров вентиляционного воздуха	+	+	+
(c)	К обеспечению выполнения условий, предписанных в пункте (b), при отказе или повреждении системы	+	+	+
(d)	К удалению скопления опасного количества дыма	+	+	+
(e) (1)–(2); (f) (1)–(3)	К средствам регулирования температуры и количества воздуха для вентиляции кабины экипажа, пассажирской кабины	+	+	+
(g)	К значениям температуры в зависимости от времени работы системы после возникновения отказа (Part 25)	*	+	–
(a*)	К количественному составу воздуха на каждого человека в случае отказа половины подсистем отбора сжатого воздуха	+	–	–
(b*)	К количеству источников сжатого воздуха для наддува кабины. К значениям температуры в зависимости от времени работы системы после возникновения отказа	+	–	–
(c*)	К подаче сжатого воздуха на потребители при отказе 50 % источников	+	–	–
(d*)	К предельно допустимой концентрации токсичных примесей	+	–	–
(e*)	К обеспечению питьевого режима экипажу	+	–	–
(f*)	К наличию запорных устройств в СКВ для включения/выключения подачи сжатого воздуха. К времени аварийного отключения СКВ от источников сжатого воздуха	+	–	–
(g*)	К диапазону значений установившейся температуры и времени ее достижения в кабинах самолета	+	–	–

Продолжение таблицы 3  
Continuation of Table 3

№ пункта, подпункта	Требования	Государство – разработчик ВС		
		РФ (НЛГ 25)	США (Part 25)	ЕС (CS 25)
Раздел D. Проектирование и конструкция. Вентиляция и отопление Параграф 25.831. Вентиляция				
(h*)	К значениям температуры воздуха в кабинах самолета при пониженных и повышенных температурах наружного воздуха СКВ	+	–	–
(i*)	К значениям температуры отдельных поверхностей интерьера	+	–	–
(j*)	К значениям температуры воздуха, подаваемого на обогрев кабины, из раздаточных устройств	+	–	–
Условные обозначения: + – пункт, подпункт требований присутствует в АП – – пункт, подпункт отсутствует * – пункт, подпункт зарезервирован				

Таблица 4  
Table 4

Сравнение отечественных и зарубежных НЛГ к СКВ  
в части концентрации озона в кабине<sup>14,16,17</sup>  
Comparison of domestic and foreign airworthiness standards  
for air conditioning system in terms of cabin ozone concentration<sup>14,16,17</sup>

№ пункта, подпункта	Требования	Государство – разработчик ВС		
		РФ (НЛГ 25)	США (Part 25)	ЕС (CS 25)
Раздел D. Проектирование и конструкция. Вентиляция и отопление Параграф 25.832. Концентрация озона в кабине				
(a) (1)–(2)	К концентрации озона в кабине	+	+	+
(b)	К условиям, эквивалентным уровню моря	+	+	+
(c) (1)–(2)	К условиям эксплуатации самолета и ограничениям его характеристик в части концентрации озона и регулирования содержания озона в кабине	+	+	+
Условные обозначения: + – пункт, подпункт требований присутствует в АП – – пункт, подпункт отсутствует * – пункт, подпункт зарезервирован				

Таблица 5  
Table 5

Сравнение отечественных и зарубежных НЛГ к СКВ  
в части систем отопления на жидком топливе<sup>14,16,17</sup>  
Comparison of domestic and foreign airworthiness standards  
for air conditioning system in terms of combustion heating systems<sup>14,16,17</sup>

№ пункта, подпункта	Требования	Государство – разработчик ВС		
Раздел D. Проектирование и конструкция. Вентиляция и отопление Параграф 25.833. Системы отопления на жидком топливе		РФ (НЛГ 25)	США (Part 25)	ЕС (CS 25)
Отсутствует	К обогревателям, работающим на жидком топливе	+	+	+
Условные обозначения: + – пункт, подпункт требований присутствует в АП – – пункт, подпункт отсутствует * – пункт, подпункт зарезервирован				

Таблица 6  
Table 6

Сравнение отечественных и зарубежных НЛГ к СКВ  
в части герметичности кабин<sup>14,16,17</sup>  
Comparison of domestic and foreign airworthiness standards  
for air conditioning system in terms of cabin pressurization integrity<sup>14,16,17</sup>

№ пункта, подпункта	Требования	Государство – разработчик ВС		
Раздел D. Проектирование и конструкция. Герметичность Параграф 25.841. Герметические кабины		РФ (НЛГ 25)	США (Part 25)	ЕС (CS 25)
(a) (1) – НЛГ 25, Part 25 (a) – CS 25	К обеспечению значения давления в герметичных кабинах на максимальной рабочей высоте при нормальных эксплуатационных условиях	+	+	+
(a) (2) (i)–(ii)	К исключению воздействия давления, соответствующего высотам (i)–(ii), вследствие разгерметизации кабины	+	+	–
(a) (3)	К рассмотрению отказов конструкции, систем ВС при оценке разгерметизации кабины	+	+	–
(b) (1)–(8)	К регулирующим клапанам, органам управления, индикаторам для регулирования давления в кабине	+	+	+
(c) (1)–(2)	К системе регулирования давления в кабине при взлете и посадке в высокогорном аэропорту	–	+	–
(d) (1)–(3)	К сигналу предупреждения о высоком давлении в кабине при взлете и посадке в высокогорном аэропорту	–	+	–

Продолжение таблицы 6  
Continuation of Table 6

(a*)	Зарезервирован – РФ	*	–	–
(b*)	К скорости изменения давления при вероятном отказе	+	–	–
(c*)	К системе регулирования давления в части предотвращения попадания воды внутрь кабины при аварийной посадке на воду	+	–	–
(d*)	К конструкции теплозвукоизоляции для предотвращения скопления влаги в ней	+	–	–
Условные обозначения: + – пункт, подпункт требований присутствует в АП – – пункт, подпункт отсутствует * – пункт, подпункт зарезервирован				

Таблица 7  
Table 7

Сравнение отечественных и зарубежных НЛГ к СКВ  
в части испытания герметических кабин<sup>14,16,17</sup>  
Comparison of domestic and foreign airworthiness standards  
for air conditioning system in terms of tests for pressurized cabins<sup>14,16,17</sup>

№ пункта, подпункта	Требования	Государство – разработчик ВС		
		РФ (НЛГ 25)	США (Part 25)	ЕС (CS 25)
Раздел D. Проектирование и конструкция. Герметичность Параграф 25.843. Испытания герметических кабин				
(a)	К испытанию клапанов на перепад давления	+	+	–
(b)	К испытаниям на функционирование герметических кабин	+	+	+
(1)	К проверкам работы и пропускной способности клапанов перепадов давления и аварийного предохранительного клапана	+	+	+
(2)	К испытаниям системы наддува для демонстрации ее безотказной работы	+	+	+
(3)	К летным испытаниям для доказательства безотказной работы систем наддува, регуляторов давления и расхода воздуха, индикаторов и сигнализаторов	+	+	+
Условные обозначения: + – пункт, подпункт требований присутствует в АП – – пункт, подпункт отсутствует * – пункт, подпункт зарезервирован				

Таблица 8  
Table 8

Сравнение отечественных и зарубежных НЛГ к СКВ  
в части систем наддува и пневматической системы<sup>14,16,17</sup>  
Comparison of domestic and foreign airworthiness standards  
for air conditioning system in terms of pressurization and pneumatic systems<sup>14,16,17</sup>

№ пункта, подпункта	Требования	Государство – разработчик ВС		
		РФ (НЛГ 25)	США (Part 25)	ЕС (CS 25)
Раздел F. Оборудование. Прочее оборудование Параграф 25.1438. Система наддува и пневмосистемы				
(a)	К испытаниям давлением элементов систем наддува	+	+	–
(b)	К испытаниям давлением элементов пневмосистемы	+	+	–
(c)	К выполнению пунктов (a) и (b) путем замены испытаний эквивалентными	+	+	–
(a*)	К исключению взрыва систем наддува и пневмосистемы	+	–	–
(b*)	К размещению трубопроводов и агрегатов СКВ	+	–	–
Отсутствует	К безопасной эксплуатации и исключению отрицательного воздействия на другие важные и критические части самолета	–	–	+
Условные обозначения: + – пункт, подпункт требований присутствует в АП – – пункт, подпункт отсутствует * – пункт, подпункт зарезервирован				

## Результаты проведенного исследования

На основании проведенного сравнительного анализа НЛГ Российской Федерации, США, ЕС по вышеизложенным критериям выявлены следующие особенности.

1. Структуры построения АП: НЛГ 25, CS 25, Part 25 имеют различия, которые следуют из наименования данных НЛГ. В Российской Федерации – это НЛГ, в США – стандарты (нормы) летной годности, в ЕС – сертификационные спецификации (CS) и приемлемые средства обеспечения соответствия (АМС). Европейские АП представляют собой набор сертификационных спецификаций и приемлемых средств соответствия – необязательных стандартов, принятых EASA

для иллюстрации средств установления соответствия основному регламенту и его правилам реализации.

Структура построения НЛГ 25 наиболее схожа со структурой Part 25 и по сравнению с CS 25 НЛГ Российской Федерации и США не содержат в составе МОС, ссылки на руководящие материалы и стандарты для подтверждения соответствия.

Содержание в составе НЛГ МОС может значительно сократить номенклатуру НЛГ, используемую при проектировании и сертификации ВС, систематизируя требования и МОС данным требованиям в одном документе.

2. Нумерация и наименование глав, параграфов требований к СКВ в НЛГ 25, Part 25, CS 25 гармонизированы. В части нумерации

пунктов и подпунктов требований к СКВ присутствуют различия, связанные с наличием индивидуальных требований или отсутствием требований в рассмотренных НПД вовсе, что объясняется разным объемом (количеством) критических требований к рассматриваемой системе.

Идентичные нумерация и наименования глав, параграфов, пунктов, подпунктов отечественных и зарубежных НЛГ способствуют унификации структуры сертификационного базиса ВС и идентичной систематизации требований в нем, упрощают навигацию при визуальном сравнении, в процессе корректировок и при анализе требований.

3. Объем (количество) требований, изложенных в НЛГ 25 к СКВ, включает не менее 16 дополнительных пунктов требований с указательной пометкой «\*», по отношению к CS 25, Part 25: пункты (a\*)–(d\*) в параграфе 25.831 «Вентиляция»; пункты (a\*)–(d\*) в параграфе 25.841 «Герметические кабины»; (a\*), (b\*) в параграфе 25.1438 «Система наддува и пневмосистемы». Часть дополнительных пунктов в НЛГ 25 сохранилась из НЛГС-3.

Стоит отметить, что рассмотренные дополнительные пункты требований в НЛГ 25 существуют в зарубежной НПД, изложены в АМС EASA и американском авиационном циркуляре AC 25-20<sup>17</sup> по оценке соответствия систем давления, вентиляции и кислорода.

НЛГ 25 включают в себя полный перечень требований, изложенных в Part 25, кроме пункта (g), изложенного в параграфе 25.831, а также пунктов и подпунктов (c) (1), (2); (d) (1), (2), (3), изложенных в параграфе 25.841. Причина данного различия требует особого внимания при последующем совершенствовании требований к данной функциональной системе. По объему (количеству) требований (без учета дополнительных требований) к СКВ НЛГ 25 превосходят CS 25 и содержат

все требования, изложенные в НЛГ ЕС. В свою очередь CS 25 содержат в своем составе многочисленный состав АМС (МОС), позволяющих исключить перегруженность АП избыточными требованиями и сократить их объем (количество).

Оценить степень недостаточности или переизбыточности требований, изложенных в НЛГ 25, на данный момент невозможно ввиду отсутствия официальных утвержденных публикаций МОС к СКВ авиационной властью Российской Федерации.

4. Физический смысл и суть требований к СКВ, присутствующих одновременно в НЛГ 25, CS 25, Part 25 (кроме пунктов требований (g) в параграфе 25.831; (c) (1), (2), (d) (1), (2), (3) в параграфе 25.841) гармонизирован; характеристики, параметры, конструктивные и функциональные требования к данной функциональной системе идентичны требованиям EASA и FAA.

## Заключение

Исследование отечественных НЛГ к СКВ в контексте их актуализации и гармонизации с международными требованиями EASA и FAA, а также передовым опытом в области разработки гражданских ВС транспортной категории показало, что степень гармонизации НЛГ 25 с зарубежными стандартами осуществлена на приемлемом уровне. Однако присутствуют различия в отечественной и зарубежных процедурах сертификации АТ, подходах к разработке, актуализации и гармонизации НЛГ, а также в структуре построения, нумерации, объеме (количестве) и физическом смысле, сути требований НЛГ. Данное исследование продемонстрировало необходимость регулярного пересмотра и актуализации НЛГ. В то же время существенные различия присутствуют в области отечественных и зарубежных МОС типовой конструкции ВС НЛГ.

Для развития и совершенствования требований к СКВ, а также ВС в целом для повышения ЭТХ сформулированы следующие концептуальные предложения.

<sup>17</sup> AC 25-20 – Pressurization, ventilation and oxygen systems assessment for subsonic flight including high altitude operation [Электронный ресурс] // Federal Aviation Administration. 1996. 12 p. URL: [https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory\\_Circular/AC\\_25-20.pdf](https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC_25-20.pdf) (дата обращения: 01.09.2024).

1. Проведение подобных сравнительных анализов для всех систем ВС с целью выявления проблемных мест в отечественных НЛГ и принятие неотложных мер по их ликвидации.

2. Организация и проведение органами авиационной власти Российской Федерации полного сравнительного анализа различий действующих зарубежных систем, процессов сертификации, правил, процедур, методов, стандартов в части разработки и сертификации ВС с целью выявления различий и принятие неотложных мер по их ликвидации [11, 12]. Упрощение процедуры сертификации АТ в Российской Федерации посредством предоставления Росавиацией больших полномочий Авиарегистру, оставив за собой только оформление и выдачу сертификатов типа, что позволит значительно упростить и сократить процесс администрирования.

3. Организация постоянной и непрерывной информационной поддержки разработчиков АТ по вопросам международных требований и практик, современных МОС, передовых технологий разработки и испытания АТ, процедур сертификации, например посредством создания специальных информационно-аналитических систем (электронных пространств). Данное концептуальное предложение подкреплено требованиями воздушного кодекса Российской Федерации<sup>18</sup>, статья 8 «Информационная система обязательной сертификации типовой конструкции АТ».

4. Переход к процессу всеобъемлющей гармонизации законодательств ведущих авиационных стран с целью взаимопризнания зарубежных и отечественных правил, процедур, методов, стандартов в части разработки и сертификации ВС; подписания полноценных и равноправных двусторонних соглашений (BASA) с последующей организацией сотрудничества авиационной власти Россий-

ской Федерации с иностранными коллегами из ЕС, США в рамках системы гармонизации НПБ.

5. Актуализация и дополнение состава требований НЛГ 25 к СКВ, а именно в части подсистемы вентиляции (охлаждения) авионики ввиду отсутствия требований, а также упоминания данной подсистемы в контексте требований. Предлагается введение подпункта (h) в пункт 25.831 НЛГ 25 со следующим описанием: «Система вентиляции должна обеспечивать приемлемую работу бортового радиоэлектронного оборудования (авионики) при экстремально высокой и экстремально низкой температуре окружающего воздуха на этапах полета с минимальным расходом воздуха в СКВ».

## Список литературы

1. **Чинючин Ю.М., Босых Н.Н., Трифонов Ю.М.** Основы поддержания летной годности воздушных судов. Современные проблемы поддержания летной годности воздушных судов: учеб. пособие. М.: ИД Академии Жуковского, 2020. 96 с.

2. **Кирпичев И.Г., Кулешов А.А., Шапкин В.С.** Основы стратегии формирования конкурентных преимуществ Российской авиационной техники на современном этапе. 2-е изд. М.: Воздушный транспорт, 2007. 334 с.

3. **Дутов А.В.** О мерах по повышению конкурентоспособности авиационной техники российского производства / А.В. Дутов, В.С. Шапкин, С.Б. Гальперин, В.В. Ключков, А.А. Фридлянд // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2017. № 16 (327). С. 7–15.

4. **Тешева П.Д.** Тенденции обновления парка воздушных судов в авиакомпаниях РФ на современном этапе // Наукосфера. 2023. № 5-2. С. 330–334.

5. **Ахметшин Т.Ф.** Сертификация авиационной техники // Вестник УГАТУ. 2014. Т. 18, № 2 (63). С. 10–18.

6. **Базикова И.В.** Проблемы экспорта российских гражданских самолетов на мировом рынке // Современная экономика: акту-

<sup>18</sup> Воздушный кодекс РФ №60-ФЗ от 19.03.1997 (ред. от 08.08.2024) [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/9040995> (дата обращения: 01.09.2024).

альные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XXVIII Международной научно-практической конференции. Пенза, 25 мая 2019 г. Пенза: Наука и просвещение, 2019. С. 192–195.

7. **Лесничий И.В., Самойлов И.А., Страдомский О.Ю.** Мировые системы сертификации авиационной техники // Научный вестник ГОСНИИ ГА. 2017. № 1 (327). С. 16–26.

8. **Сухова Т.С., Алексашина О.В., Ларцева Т.А.** Процедура сертификации авиационной техники в Российской Федерации // Контроль качества продукции. 2020. № 8. С. 13–19.

9. **Книгель А.Я.** О сертификации типа, разработчиков и изготовителей гражданской авиационной техники // Международный авиационно-космический журнал. 2017. № 5 (67). С. 4–8.

10. **Баталов А.А.** Правовое регулирование вопросов обеспечения безопасности полетов в рамках Европейского Союза // Журнал зарубежного законодательства и сравнительного правоведения. 2022. Т. 18, № 1. С. 80–92. DOI: 10.12737/jflcl.2022.013

11. **Иглин А.В.** Актуальные вопросы работы европейских авиационных организаций // Научный вестник УВАУ ГА (И). 2015. № 7. С. 93–98.

12. **Явкин А.В.** Анализ различий сертификационных систем Европейского союза (ЕС), США и Российской Федерации [Электронный ресурс] // НИЦ Институт им. Жуковского, 2019. 20 с. URL: [https://aviatp.ru/files/legalcom/21.02.2019/Report%20\(project\).pdf](https://aviatp.ru/files/legalcom/21.02.2019/Report%20(project).pdf) (дата обращения: 01.09.2024).

13. **Бочарова О.Ю.** Сравнение сертификационных систем гражданской авиации США, ЕС и РФ // Наука настоящего и будущего. 2022. Т. 1. С. 163–165.

14. **Явкин А.В.** Действительно ли мы стремимся к технологическому суверенитету в авиации или только делаем вид? [Электронный ресурс] // AviaSafety. 2023. URL: <https://aviasafety.ru/43348/> (дата обращения: 01.09.2024).

## References

1. **Chinyuchin, Yu.M., Bosykh, N.N., Trifonov, Yu.M.** (2020). Fundamentals of maintaining aircraft airworthiness. Modern problems of maintaining the airworthiness of aircraft: Tutorial. Moscow: ID Akademii Zhukovskogo, 96 p. (in Russian)

2. **Kirpichev, I.G., Kuleshov, A.A., Shapkin, V.S.** (2007). Fundamentals of the strategy for forming competitive advantages of Russian aviation equipment at the present stage. 2nd ed. Moscow: Vozdushnyy transport, 334 p. (in Russian)

3. **Dutov, A.V., Shapkin, V.S., Galperin, S.B., Klochkov, V.V., Fridlyand, A.A.** (2017). Measures to increase competitiveness of Russian-made aviation technology. *Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA)*, no. 16 (327), pp. 7–15. (in Russian)

4. **Tesheva, P.D.** (2023). The trends in the renewal of the fleet of aircraft in the Russian airlines at the present stage. *Naukosfera*, no. 5-2, pp. 330–334. (in Russian)

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

6. **Bazikova, I.V.** (2019). Problems of exporting Russian civil aircraft to the global market. In: *Sovremennaya ekonomika: aktualnyye voprosy, dostizheniya i innovatsii: sbornik statey XXVIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*, pp. 192–195. (in Russian)

7. **Lesnichiy, I.V., Samoylov, I.A., Stradomskiy, O.Yu.** (2017). Aircraft certification system in the world. *Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA)*, no. 16 (327), pp. 16–26. (in Russian)

8. **Sukhova, T.S., Aleksashina, O.V., Lartseva, T.A.** (2020). The procedure of aviation equipment certification in the Russian Federation. *Production quality control*, no. 8, pp. 13–19. (in Russian)

9. **Knivel, A.Ya.** (2017). On the certification of type, developers and manufacturers of civil aviation equipment. *Mezhdunarodnyy*

*aviatsionno-kosmicheskiy zhurnal*, no. 5 (67), pp. 4–8. (in Russian)

**10. Batalov, A.A.** (2022). Legal regulation of aviation safety within the European union. *Journal of Foreign Legislation and Comparative Law*, vol. 18, no. 1, pp. 80–92. DOI: 10.12737/jflcl.2022.013 (in Russian)

**11. Iglin, A.V.** (2015). Actual questions of european aviation organizations operation. *Nauchnyy vestnik UVAU GA (I)*, no. 7, pp. 93–98. (in Russian)

**12. Yavkin, A.V.** (2019). Analysis of differences between certification systems of the Eu-

ropean Union (EU), the USA and the Russian Federation. Available at: [https://aviatp.ru/files/legalcom/21.02.2019/Report%20\(project\).pdf](https://aviatp.ru/files/legalcom/21.02.2019/Report%20(project).pdf) (accessed: 01.09.2024). (in Russian)

**13. Bocharova, O.Yu.** (2022). Comparison of civil aviation certification systems of the USA, EU and RF. *Nauka nastoyashchego i budushchego*, vol. 1, pp. 163–165. (in Russian)

**14. Yavkin, A.V.** (2023). Are we truly approaching technological sovereignty in aviation or are we just pretending? *AviaSafety*. Available at: <https://aviasafety.ru/43348/> (accessed: 01.09.2024). (in Russian)

### Сведения об авторах

**Парубин Денис Юрьевич**, инженер-конструктор 1 категории ПАО «ОАК “ОКБ Сухого”», [parubin.denis@yandex.ru](mailto:parubin.denis@yandex.ru).

**Кирпичев Игорь Геннадьевич**, доктор технических наук, профессор МГТУ ГА, [ig.kirpichev@gmail.com](mailto:ig.kirpichev@gmail.com).

### Information about the authors

**Denis Yu. Parubin**, 1<sup>st</sup> Category Design-engineer of PJSC UAC EDB Sukhoi, [parubin.denis@yandex.ru](mailto:parubin.denis@yandex.ru).

**Igor G. Kirpichev**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Moscow State Technical University of Civil Aviation, [ig.kirpichev@gmail.com](mailto:ig.kirpichev@gmail.com).

Поступила в редакцию	11.11.2024	Received	11.11.2024
Одобрена после рецензирования	08.04.2025	Approved after reviewing	08.04.2025
Принята в печать	24.07.2025	Accepted for publication	24.07.2025

УДК 623.746  
DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-4-67-83

## Формирование облика беспилотного летательного аппарата вертолетного типа в части взлетно-посадочных устройств, обеспечивающих взлет и посадку на взлетно-посадочную площадку корабля

Д.В. Титов<sup>1</sup>, А.Е. Парненков<sup>1,2</sup>, А.В. Киселев<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Национальный центр вертолетостроения им. М.Л. Миля и Н.И. Камова, Томилино, Россия

<sup>2</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Московский энергетический институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

**Аннотация:** В связи с растущими требованиями к флоту в части повышения эффективности решения поставленных задач с учетом постоянно усложняющейся оперативной обстановки требуется более широкое использование беспилотных летательных аппаратов, в том числе на кораблях малого и среднего водоизмещения. Таким образом, важной тенденцией развития беспилотных летательных аппаратов вертолетного типа (БЛА ВТ) является адаптация их к корабельным условиям базирования. Ключевой проблемой адаптации является обеспечение взлета и посадки на взлетно-посадочную площадку (ВППл) корабля. В данной статье рассматриваются вопросы влияния условий корабельного базирования, важнейшим из которых является качка, и требований к выполнению взлетно-посадочных операций, включая необходимость адаптации к системам принудительной посадки, на формирование облика ползкового шасси корабельного БЛА ВТ и формулируются специфические относительно шасси летательного аппарата берегового базирования технические требования к конструкции. При этом для исследования динамической и статической совместимости БЛА ВТ с кораблем детерминированные, или вероятностные, характеристики качки корабля должны задаваться в виде амплитуд и периодов качки, спектральных плотностей качки, дисперсий перемещений и скоростей центра ВППл, а также перемещений, скоростей и ускорений в центре ВППл. Исходя из заданных параметров рассчитывается кинематика движения центра ВППл, ее пространственно-сложных положений для решения задачи динамической совместимости БЛА ВТ с кораблем. Динамическая совместимость включает определение устойчивости и управляемости БЛА ВТ, раскрутку и остановку несущего винта, взлет и посадку, транспортировку БЛА ВТ по ВППл. Существующие и перспективные принципиальные конструктивные схемы ползкового шасси разделяются на четыре основных типа и оцениваются на предмет соответствия специфике эксплуатации на корабле, особое внимание при оценке уделяется возможности адаптации к системам принудительной посадки на палубу. По результатам оценки предлагается конструктивная схема шасси для перспективного корабельного БЛА ВТ параллелограммно-рычажного типа с выносным амортизатором. В качестве подтверждения соответствия предложенной схемы сформулированным требованиям приводятся результаты расчета динамической модели шасси при посадке и при бортовой качке, выполненного в программном комплексе Simcenter Motion. Предложенная схема возможна к реализации как для БЛА ВТ, так и для пилотируемых вертолетов корабельного и берегового базирования.

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат вертолетного типа (БЛА ВТ), взлетно-посадочные устройства, корабельное базирование.

**Для цитирования:** Титов Д.В., Парненков А.Е., Киселев А.В. Формирование облика беспилотного летательного аппарата вертолетного типа в части взлетно-посадочных устройств, обеспечивающих взлет и посадку на взлетно-посадочную площадку корабля // Научный вестник МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 4. С. 67–83. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-4-67-83

## The formation of technical appearance of a helicopter-type unmanned aerial vehicle in part of take-off and landing devices that provide take-off and landing on the ship's helicopter landing pad

D.V. Titov<sup>1</sup>, A.E. Parnenkov<sup>1,3</sup>, A.V. Kiselev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National Helicopter Center Mil & Kamov, Tomilino, Russia

<sup>2</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

<sup>3</sup>Moscow Power Engineering Institute (National Research University), Moscow, Russia

**Abstract:** Due to the growing requirements to the fleet in terms of increasing the efficiency of solving assigned tasks, taking into account the ever-increasing operational situation, increased use of unmanned aerial vehicles is required, including small and medium-displacement ships. Thus, an important trend in the development of helicopter-type unmanned aerial vehicles (HT UAVs) is their adaptation to ship-based conditions. The key problem of adaptation is ensuring the take-off and landing on the ship's landing pad (runway). This article discusses the influence of ship-based conditions, the most important of which is ship's pitching, and requirements for performing takeoff and landing operations, including the need to adapt to forced landing systems, on the formation of the design of the landing gear of a HT UAV, and formulates the design specifications typical to the landing gear of a shore-based aircraft. At the same time, to study the dynamic and static compatibility of the HT UAV with the ship, deterministic or probabilistic characteristics of the ship's pitching should be set in the form of pitching amplitudes and periods, pitching spectral densities, variances of displacements and velocities of the runway center, as well as displacements, velocities and accelerations in the runway center. Based on the specified parameters, the kinematics of the movement of the center of the runway and its spatially complex positions are calculated to solve the problem of dynamic compatibility of the VTOL UAV with the ship. Dynamic compatibility includes determining the stability and controllability of the HT UAV, unwinding and stopping the main rotor, take-off and landing, and transporting the HT UAV along the runway. The existing and prospective basic design schemes of the skid landing gear are divided into four main types and evaluated for compliance with the specifics of operation on the ship, special attention is paid to the possibility of adaptation to forced landing systems on deck. Based on the evaluation results, a design scheme of the landing gear for a promising HT parallelogram-lever type UAV with an external shock absorber is proposed. As a confirmation of the compliance of the proposed scheme with the formulated requirements, the results of the calculation of the dynamic landing gear model during landing and rolling, performed in the Simcenter Motion software package, are presented. The proposed scheme can be implemented for both HT UAVs and manned ship-based and shore-based helicopters.

**Key words:** helicopter-type unmanned aerial vehicle (HT UAV), take-off and landing devices, ship-based.

**For citation:** Titov, D.V., Parnenkov, A.E., Kiselev, A.V. (2025). The formation of technical appearance of a helicopter-type unmanned aerial vehicle in part of take-off and landing devices that provide take-off and landing on the ship's helicopter landing pad. Civil Aviation High Technologies, vol. 28, no. 4, pp. 67–83. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-4-67-83

### Введение

В современных условиях разведывательные и ударные комплексы с беспилотными авиационными системами признаются одним из важнейших средств повышения боевых возможностей соединений, частей и подразделений различных видов и родов войск вооруженных сил, в том числе кораблей военно-морского флота. Основная ставка делается на сравнительно дешевые БЛА, способные длительное время находиться в воздухе, нести любую полезную нагрузку в зависимости от предназначения и решаемых задач [1].

Таким образом, одной из важных тенденций создания и применения робототехниче-

ских и роботизированных воздушных комплексов с высокой степенью автономности<sup>1</sup> является разработка перспективных беспилотных летательных аппаратов вертолетного типа (БЛА ВТ) способных осуществлять взлет и посадку на взлетно-посадочную площадку (ВППл) корабля.

В мировой истории развития беспилотной авиации существует ряд БЛА ВТ, адаптированных к корабельным условиям базирования.

<sup>1</sup> Типы беспилотных летательных аппаратов. Обзор [Электронный ресурс] // Aviatest.aero. URL: <https://aviatest.aero/articles/typy-bespilotnykh-letatelnykh-apparatov-obzor/> (дата обращения: 23.12.2024).



**Рис. 1.** БЛА ВТ MQ-8B Fire Scout  
**Fig. 1.** HT UAV MQ-8B Fire Scout



**Рис. 2.** БЛА ВТ Airbus VSR 700  
**Fig. 2.** HT UAV Airbus VS 700

Американский MQ-8B Fire Scout, представленный на рис. 1, компании Northrop Grumman предназначен для решения задач воздушной разведки, выполнения целеуказания, поддержки высадки на побережье морского десанта и борьбы с надводными целями. Представляет собой БЛА ВТ одновинтовой схемы с взлетной массой 1 430 кг [2]. Шасси выполнено ползковым рычажного типа с выносным амортизатором, имеется система принудительной посадки на палубу.

Французский VSR700, представленный на рис. 2, компании Airbus Helicopters предназначен для ведения воздушной разведки, вы-

полнения целеуказания и корректировки огня, ретрансляции, борьбы с надводными целями, решения противолодочных задач и ведения радиоэлектронной борьбы<sup>2</sup>. Представляет собой БЛА ВТ одновинтовой схемы с взлетной массой 700 кг. Шасси выполнено ползковым рессорного типа.

Шведский Skeldar V-200, представленный на рис. 3, компании Saab AB предназначен для решения задач воздушной разведки, мо-

<sup>2</sup> VSR700 Rotary Wing UAV [Электронный ресурс] // helis.com. URL: <https://www.helis.com/database/news/vsr700-eyes/> (дата обращения: 23.12.2024).



**Рис. 3.** БЛА VT Skeldar V-200  
**Fig. 3** HT UAV Skeldar V-200



**Рис. 4.** БЛА VT AWHero  
**Fig. 4.** HT UAV AWHero

ниторинга и целеуказания. Представляет собой БЛА VT одновинтовой схемы с взлетной массой 245 кг<sup>3</sup>. Шасси выполнено ползковым рессорного типа.

Итальянский AWHero, представленный на рис. 4, компании Leonardo предназначен для решения задач воздушной разведки, мониторинга, выполнения целеуказания и поиска

подводных лодок. Представляет собой БЛА VT одновинтовой схемы с взлетной массой 205 кг. Шасси выполнено ползковым рычажного типа с выносным амортизатором<sup>4</sup>. В 2023 году на выставке SeaFuture была показана модернизированная модель с трехпорным рессорным шасси<sup>5,6</sup>.

<sup>3</sup> SKELDAR V-200 unmanned VTOL system trusted by naval forces worldwide [Электронный ресурс] // umsskeldar. URL: <https://umsskeldar.aero/unmanned-vtol-system-v-200-skeldar/#Technical-specification> (дата обращения: 23.12.2024).

<sup>4</sup> Military certification for AWHero drone [Электронный ресурс] // helis.com. URL: <https://www.helis.com/database/news/daaa-certificate-awhero/> (дата обращения: 24.02.2025).

<sup>5</sup> AWHero [Электронный ресурс] // leonardo.com. URL: <https://uncrewed.leonardo.com/en/products/awhero> (дата обращения: 23.12.2024).

Анализируя зарубежный опыт, можно отметить, что ползковое шасси в силу минимального веса [3], простоты конструкции и меньшего аэродинамического сопротивления получило широкое распространение на БЛА ВТ. Тем не менее при разработке конструкции ползкового шасси для корабельных БЛА ВТ необходимо учитывать ряд специфических факторов, влияющих на технический облик шасси корабельных вертолетов.

В АО «НЦВ Миль и Камов» холдинга «Вертолеты России» в настоящее время в инициативном порядке ведется разработка перспективного комплекса с корабельным БЛА ВТ.

Перспективный корабельный БЛА ВТ предназначен для решения задач воздушной разведки, поиска и спасения, ретрансляции сигналов, транспортировки грузов. БЛА ВТ выполняется по соосной схеме, обладающей при равной взлетной массе меньшими габаритами по сравнению с одновинтовой [4], с взлетной массой 1 200 кг.

## Особенности условий корабельного базирования и требования к шасси

Корабельные условия и их особенности характеризуются рядом факторов, вносящих определенную специфику, влияющую на технический облик БЛА ВТ, и в частности на взлетно-посадочные устройства [4, 5].

Факторы, влияющие на взлетно-посадочные устройства:

- волнение моря и качка корабля;
- сложные метеорологические условия.

Следствие влияния факторов:

- неустойчивость БЛА ВТ на качающейся взлетно-посадочной площадке;
- сложности транспортировки БЛА ВТ по палубе корабля.

Рекомендации по снижению влияния факторов:

- выбор кинематической схемы взлетно-посадочных устройств;

- определение параметров и характеристик шасси;
- применение системы принудительной посадки.

Взлет и посадка производятся на ВППл корабля, которая подвержена сложному пространственному движению по крену, дифференту, высоте и курсу. Качка корабля на регулярном волнении описывается гармоническими функциями и амплитудно-фазовыми характеристиками. При регулярном волнении свободные колебания быстро демпфируются и наблюдаются вынужденные колебания с частотой морского волнения, напоминая хорошо известную динамическую систему грузика на упругой опоре с демпфированием, имеющую гармоническое возбуждение опоры. В общем случае под действием волн корабль движется как твердое тело с шестью степенями свободы, совершает малые гармонические колебания и его движение может быть выражено системой из шести уравнений.

При этом для исследования динамической и статической совместимости БЛА ВТ с кораблем детерминированные, или вероятностные, характеристики качки корабля должны задаваться в виде амплитуд и периодов качки, спектральных плотностей качки, дисперсий перемещений и скоростей центра ВППл, а также перемещений, скоростей и ускорений в центре ВППл.

Исходя из заданных параметров, рассчитывается кинематика движения центра ВППл, ее пространственно-сложных положений для решения задачи динамической совместимости БЛА ВТ с кораблем. Динамическая совместимость включает определение устойчивости и управляемости БЛА ВТ, раскрутку и остановку несущего винта, взлет и посадку, транспортировку БЛА ВТ по ВППл.

Следствием описанных условий корабельного базирования являются специфические относительно шасси ЛА берегового базирования технические требования к конструкции ползкового шасси корабельных БЛА ВТ [4]:

- большая величина противокapotажного угла;
- большой ход в вертикальной плоскости;

<sup>6</sup> RUAS Leonardo AWHero at SeaFuture 2023 [Электронный ресурс] // helis.com. URL: <https://www.helis.com/database/news/seafuture2023-awhero/> (дата обращения: 23.12.2024).

- чувствительность к малым нагрузкам (малая величина начального усилия страгивания штока амортизатора).

С целью расширения эксплуатационных возможностей БЛА ВТ в части обеспечения устойчивости на ВППл при кренах корабля более  $15^\circ$ , дифферентах более  $3^\circ$  и рыскании  $1,5-2,0^\circ$ , предотвращения его соскальзывания и опрокидывания, а также для обеспечения посадки в сложных гидрометеорологических условиях предпочтительно использовать систему принудительной посадки на палубу [4], обеспечивающую:

- автоматический захват и фиксацию ЛА на палубе в момент посадки,
- силовое подтягивание ЛА к палубе с целью предотвращения сползания, разворотов и опрокидывания в условиях качки,
- удержание ЛА на палубе перед взлетом с отцеплением по команде оператора.

Стоит отметить, что применение подобной системы наиболее актуально для кораблей небольшого водоизмещения (предназначенных для базирования группы БЛА ВТ вместо одного вертолета типа Ка-27), более восприимчивых к качке.

### **Подходы к формированию технического облика системы принудительной посадки**

Современные системы принудительной посадки на палубу («Гарпун») предусматривают размещение устройства обеспечения механической связи (механизма фиксации) между ЛА и кораблем в нижней части фюзеляжа вертолета (БЛА ВТ) вблизи центра тяжести. При несомненных выгодах в части восприятия нагрузок подобное размещение механизма фиксации накладывает определенные ограничения в части размещения топливных баков и целевой нагрузки.

Поскольку перспективный корабельный БЛА ВТ представляет собой универсальный носитель, целевое оборудование которого размещено в съемном модуле, устанавливаемом на подфюзеляжные узлы навески, рациональным решением является фиксация по-

средством захвата за ползки. В свою очередь подобное конструктивное решение выдвигает требование к обеспечению минимальных изменений колеи шасси при обжати амортизаторов.

Также требования к простоте конструкции захватов самой системы принудительной посадки на палубу ограничивают применение роботизированных шасси, рассмотренных в работах [6–9], для которых возможна реализация специфических технических требований к конструкции, упомянутых выше, поскольку у таких схем контакт с ВППл осуществляется в точке, а не по линии, как у ползкового шасси, что к тому же ужесточает требования по точности приземления.

### **Подходы к формированию технического облика ползкового шасси БЛА ВТ корабельного базирования**

1. Классическое ползковое шасси рессорного типа представлено на рис. 5. При всей простоте и надежности конструкции оно имеет ряд неустраняемых недостатков для целей обеспечения корабельного базирования. Поскольку амортизация и поглощение энергии происходят за счет упругих деформаций рессор и трения ползков о поверхность, сложно обеспечить большой ход в вертикальной плоскости и чувствительность к малым нагрузкам, шасси является достаточно жестким [10, 11]. Кроме того, по мере прогиба рессоры монотонно растет колея шасси, что затрудняет использование системы принудительной посадки с фиксацией за ползки.

2. Ползковое шасси рычажного типа с выносным амортизатором представлено на рис. 6. Опоры шарнирно прикреплены к силовой конструкции фюзеляжа. Ось шарнира является центром окружности, по которой движутся ползки при обжати амортизатора. Для восприятия продольной нагрузки могут быть установлены дополнительные продольные тяги между опорами и фюзеляжем. Такая кинематическая схема позволяет реализовать большой ход в вертикальной плос-

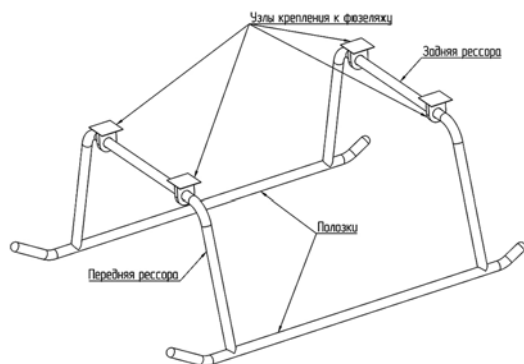


Рис. 5. Полосковое шасси рессорного типа  
Fig. 5. Spring-type skid landing gear

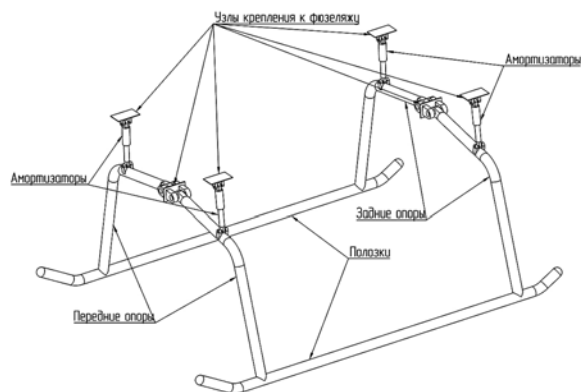


Рис. 6. Полосковое шасси рычажного типа с выносным амортизатором  
Fig. 6. Lever-type skid landing gear with external shock absorber

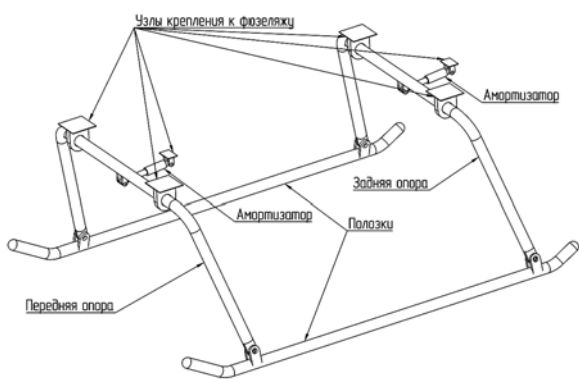


Рис. 7. Полосковое шасси параллелограмного типа с выносным амортизатором  
Fig. 7. Parallelogram type skid landing gear with external shock absorber

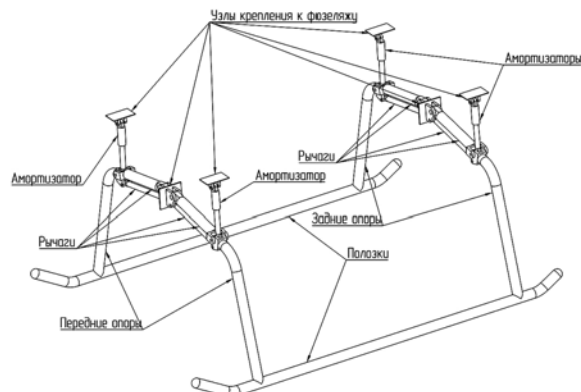


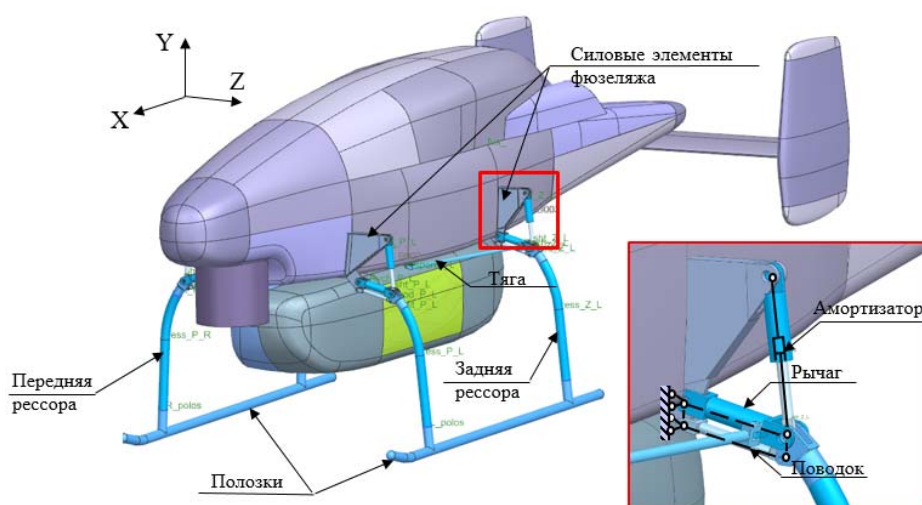
Рис. 8. Полосковое шасси параллелограммно-рычажного типа с выносным амортизатором  
Fig. 8. Parallelogram-lever type skid landing gear with external shock absorber

кости и чувствительность к малым нагрузкам (за счет правильного выбора параметров и характеристик амортизатора, методика расчета которого рассмотрена, например, в работе [12]). Но остается проблема использования системы принудительной посадки с фиксацией за полоски, поскольку при обжати амортизатора колея шасси монотонно растет.

3. Полосковое шасси параллелограмного типа с выносным амортизатором представлено на рис. 7. Опоры шасси совместно с полосками и силовой конструкцией фюзеляжа формируют параллелограммный механизм. Эта схема позволяет реализовать большой ход в вертикальной плоскости, чувствительность к

малым нагрузкам, а также сохранение постоянной колеи при обжати шасси. Но при этом имеет критический недостаток, связанный с перемещением центра тяжести БЛА ВТ вдоль продольной оси при обжати шасси, что может привести в условиях качки к возникновению незатухающих колебаний и последующей аварийной ситуации. Кроме того, требуется тщательный подбор параметров и характеристик опор с целью исключения эффекта «запирания механизма» при обжати.

4. Полосковое шасси параллелограммно-рычажного типа с выносным амортизатором представлено на рис. 8. Каждая опора прикрепляется к силовой конструкции фюзеляжа



**Рис. 9.** Установка шасси на БЛА VT  
**Fig. 9.** Installing the landing gear onto a VT UAV

парой рычагов, формируя параллелограммные механизмы. Для восприятия продольной нагрузки могут быть установлены дополнительные продольные тяги между опорами и фюзеляжем. Данная кинематическая схема шасси позволяет соединить достоинства двух предыдущих вариантов. Коля шасси при обжатии амортизатора изменяется незначительно. Таким образом, по совокупности преимуществ и по полноте соответствия сформулированным выше требованиям для перспективного корабельного БЛА VT использование подобной схемы является предпочтительным.

## Расчет шасси

Кинематическая схема шасси перспективного корабельного БЛА VT представлена на рис. 9.

Для подтверждения соответствия требований выбранной схемы сформулированы следующие расчетные условия:

- посадка на два ползка с эксплуатационной скоростью;
- стоянка на ВППл в условиях качки.

В настоящем анализе, основной целью которого является проверка работоспособности конструкции и выявление основных законо-

мерностей в поведении элементов шасси под нагрузкой, влияние бокового ветра при посадке и ветровой нагрузки на стоянке не учитывались.

Также принято размещение БЛА VT при посадке и базировании в центре ВППл симметрично диаметральной плоскости корабля, что в целом соответствует предполагаемым условиям эксплуатации БЛА VT на кораблях одиночного базирования малого водоизмещения.

Для создания динамической модели применены программное обеспечение и методики моделирования, успешно апробированные и валидированные при разработке шасси различных типов винтокрылых летательных аппаратов АО «НЦВ Миль и Камов» [13]<sup>7</sup>.

Динамическая модель БЛА VT на шасси, представленная на рис. 10, разработана в программном комплексе Simcenter Motion из так называемых субмеханизмов. Каждый из субмеханизмов в свою очередь является динамической моделью и состоит из перемещаемых тел и их соединений. Перемещаемые тела в данном расчете считаются абсолютно жесткими. Для каждого перемещаемого тела

<sup>7</sup> Предварительный расчет жесткости и демпфирования шасси: технический отчет: АО «НЦВ Миль и Камов». М., 2023. 165 с.

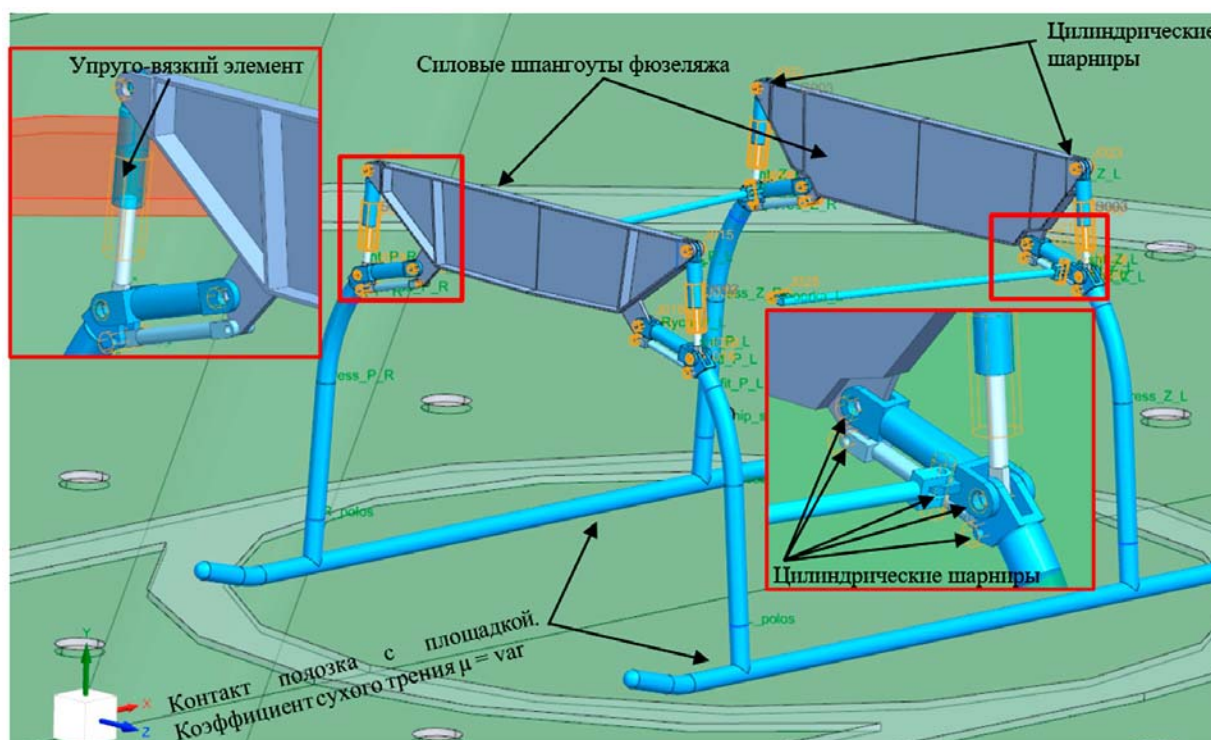


Рис. 10. Динамическая модель шасси  
Fig. 10. Dynamic model of landing gear

задаются его центр тяжести, масса и моменты инерции.

Амортизаторы шасси пневмогидравлические и смоделированы упруго-вязкими элементами (пружины, демпферы).

Характеристика упругого элемента амортизатора соответствует политропному процессу сжатия газа и задана в соответствии с формулой (1) и представлена на рис. 11.

$$Q_{\Gamma} = \frac{p_0 F_{\Gamma}}{\left(1 - \frac{y}{H}\right)^n} = \frac{p_0 \pi d^2}{4 \left(1 - \frac{s}{H}\right)^n}, \quad (1)$$

где  $p_0$  – начальное давление зарядки газовой камеры амортизатора;  $F_{\Gamma}$  – площадь эффективного сечения газовой камеры;  $H$  – конструктивный ход амортизатора;  $s$  – ход амортизатора;  $n = 1,2$  – показатель политропы;  $d$  – диаметр штока амортизатора.

Характеристика вязкого элемента задана в соответствии с формулой (2) и представлена на рис. 12.

$$Q_{\text{ж}} = \zeta \frac{\rho F_{\text{ж}}}{2} \left(\frac{F_{\text{ж}}}{f}\right)^2 \cdot \dot{s}^2, \quad (2)$$

где  $\zeta$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $\rho$  – плотность жидкости;  $F_{\text{ж}}$  – площадь давления на жидкость;  $f$  – площадь проходных отверстий;  $\dot{s}$  – скорость обжатия амортизатора.

Контакт между ползочками и посадочной площадкой задан с использованием функции 3D contact, которая позволяет учитывать жесткость контактных пар на взаимное проникновение, а также коэффициенты трения скольжения и трения покоя.

В рамках расчета посадки на два ползочка с эксплуатационной скоростью проведено моделирование посадок БЛА ВТ на неподвижную жесткую площадку. Динамическая модель посадки представлена на рис. 13.

Для расчета были приняты следующие величины:

начальная скорость вертикальной посадки  $V_y = 2$  м/с;

начальная тяга  $T_0 = 2/3G$ , где  $G$  – масса БЛА ВТ;

коэффициенты трения между ползочком и посадочной площадкой  $\mu = 0,05; 0,5$ .

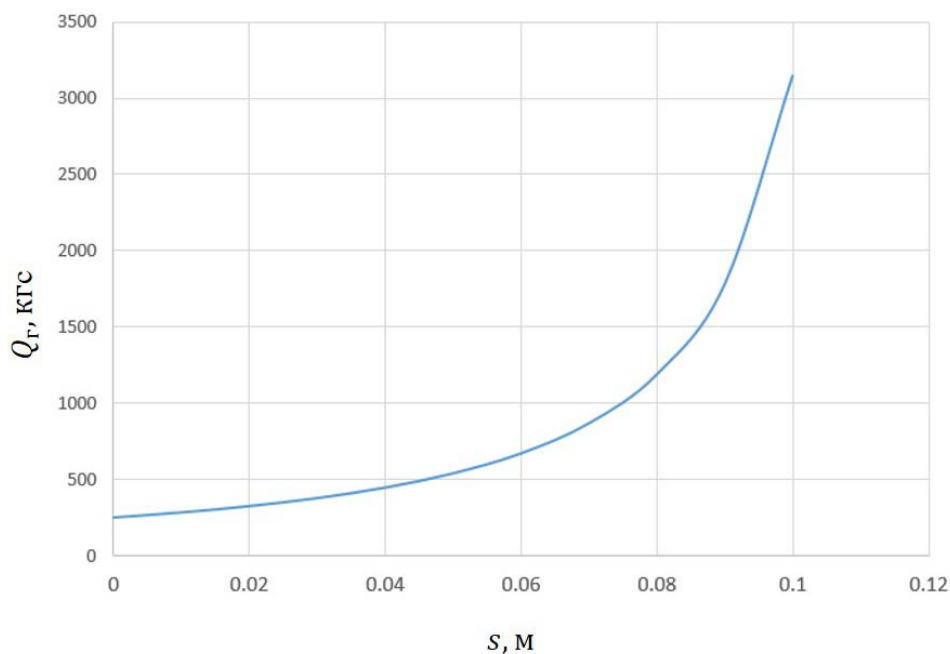


Рис. 11. Диаграмма обжатия амортизатора  
Fig. 11. Shock absorber compression diagram

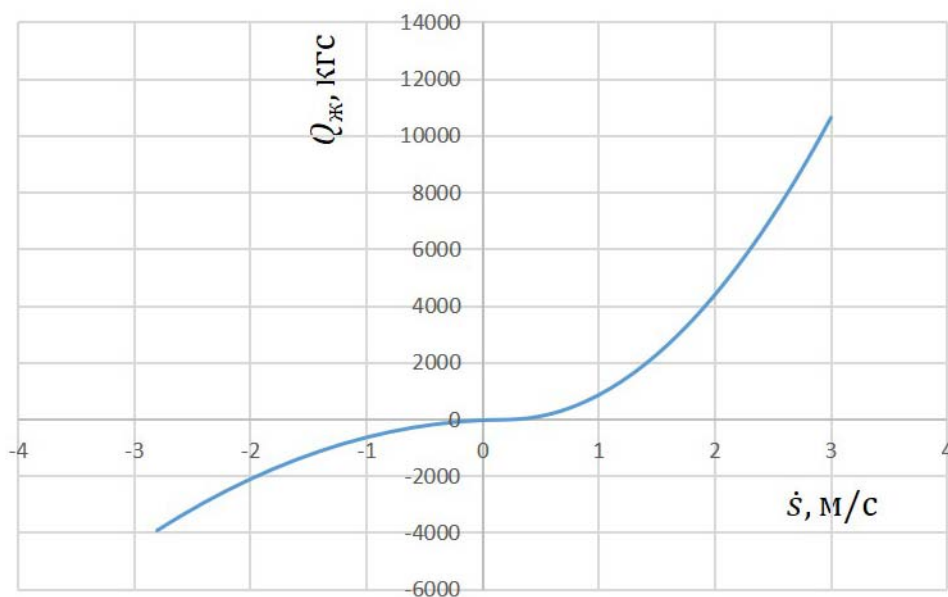


Рис. 12. Диаграмма демпфирования амортизатора  
Fig. 12. Shock absorber damping diagram

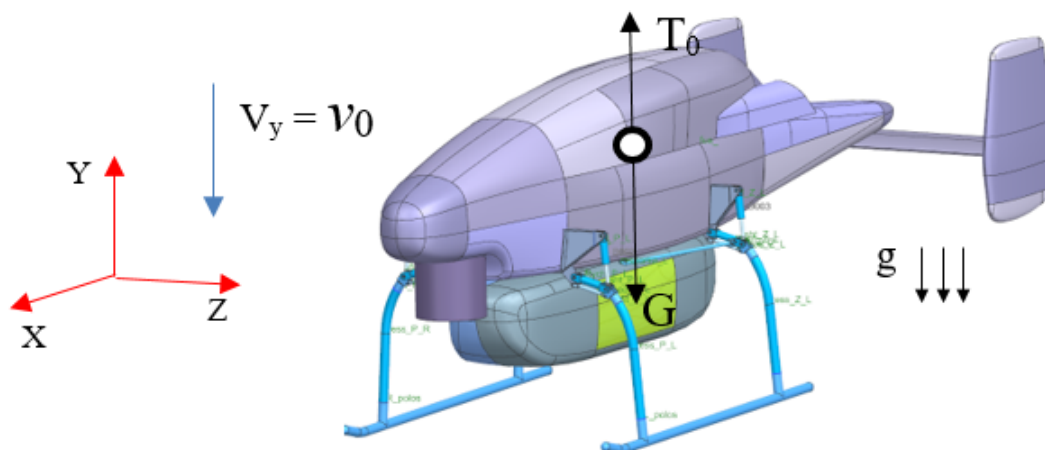
Начальные условия для системы:

$$y(t=0) = 0 \text{ м};$$

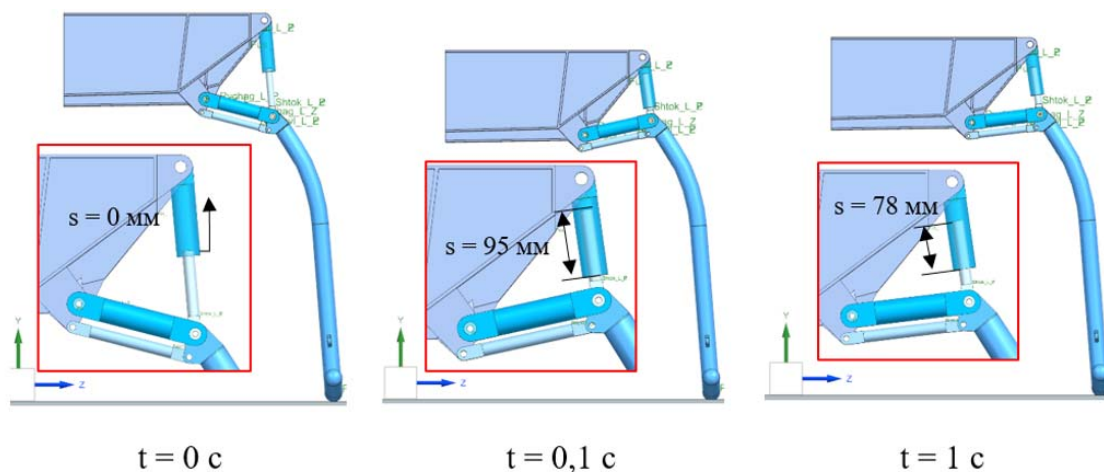
$$V_y(t=0) = -2 \text{ м/с}.$$

Время интегрирования  $t = 2$  с.

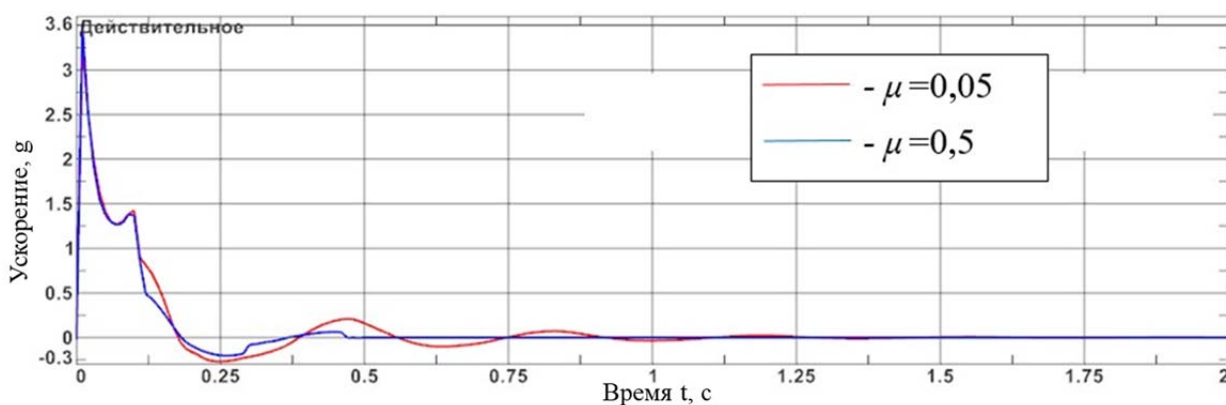
Шаг интегрирования  $h = 0,01$  с.



**Рис. 13.** Динамическая модель посадки  
**Fig. 13.** Dynamic model of landing



**Рис. 14.** Отображения момента посадки с начальной скоростью  $V_y = 2$  м/с  
**Fig. 14.** Displays the moment of landing with an initial velocity of  $V_y = 2$  m/s



**Рис. 15.** Вертикальная перегрузка центра масс при посадке с начальной скоростью  $V_y = 2$  м/с, g  
**Fig. 15.** Vertical overload of the center of mass during landing with an initial velocity of  $V_y = 2$  m/s, g

Результаты расчета посадки представлены на рис. 14–18.

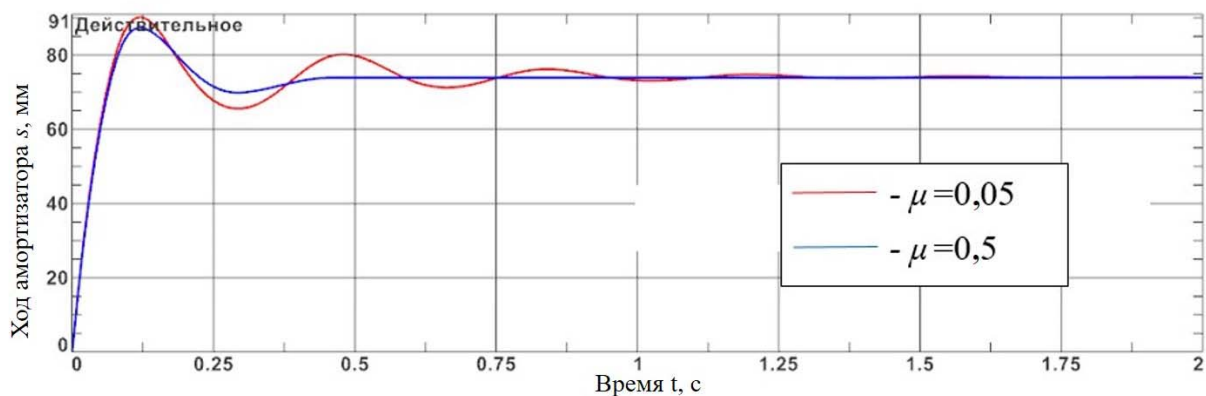


Рис. 16. Ход заднего амортизатора при посадке с начальной скоростью  $V_y = 2$  м/с, мм  
Fig. 16. The stroke of the rear shock absorber during landing with an initial velocity of  $V_y = 2$  m/s, mm

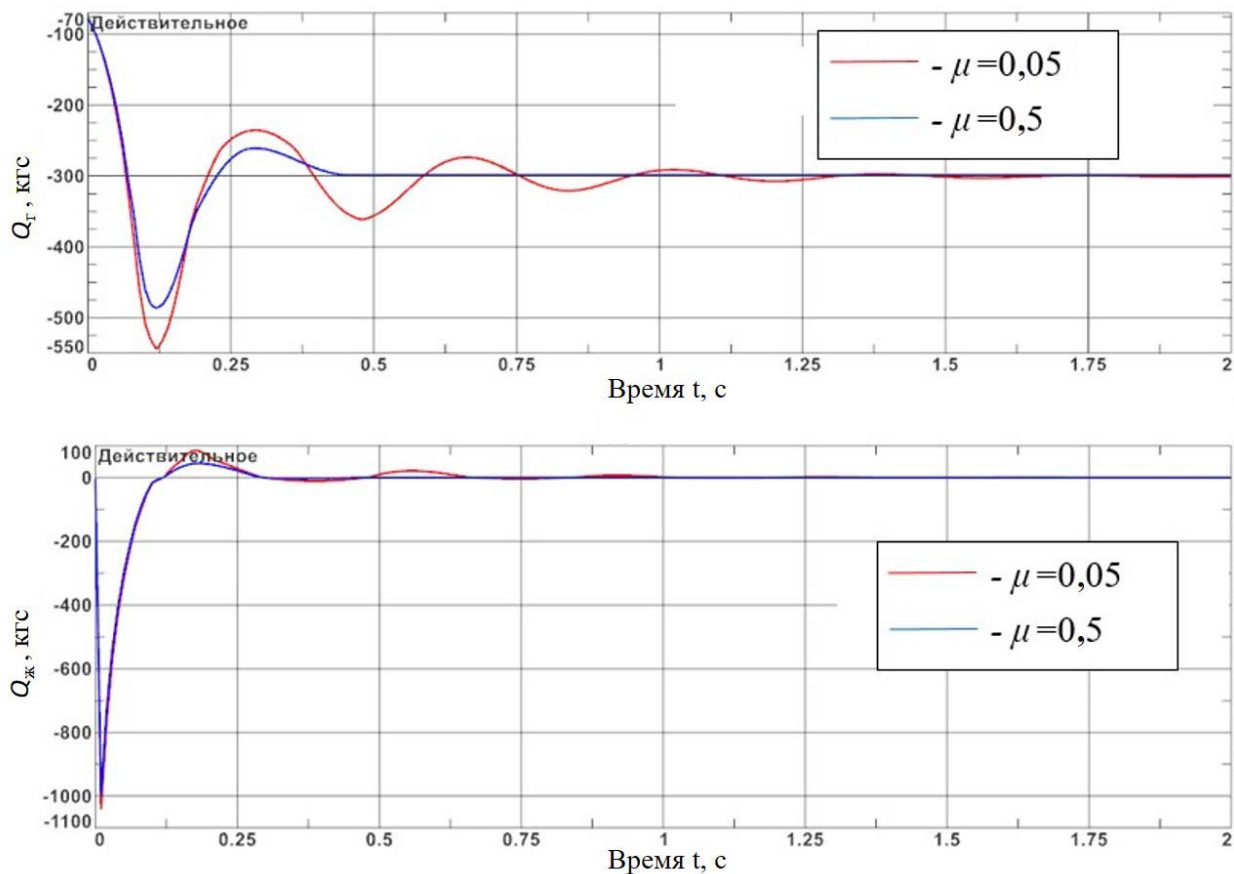
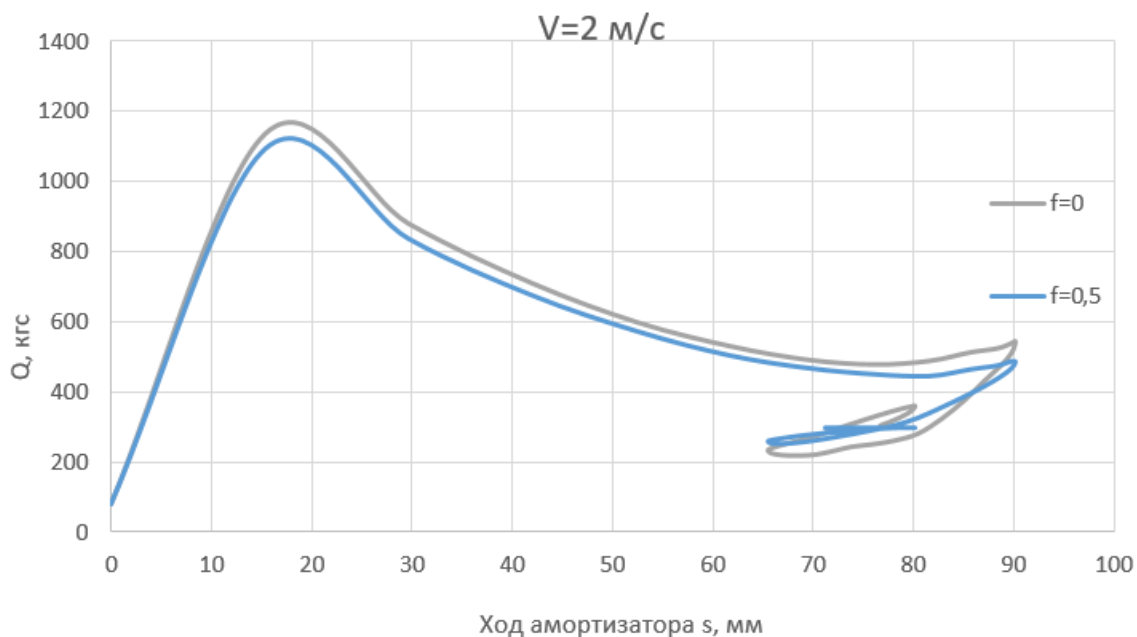


Рис. 17. Усилия в заднем амортизаторе при посадке с начальной скоростью  $V_y = 2$  м/с, кгс  
Fig. 17. Forces in the rear shock absorber during landing with an initial velocity of  $V_y = 2$  m/s, kgf



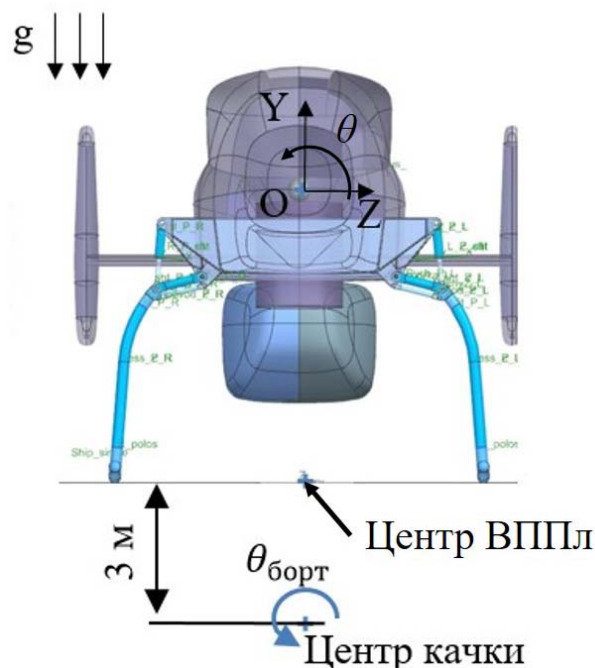
**Рис. 18.** Диаграмма обжатия заднего амортизатора при посадке с начальной скоростью  $V_y = 2$  м/с, кгс  
**Fig. 18.** Compression diagram of the rear shock absorber during landing with an initial velocity of  $V_y = 2$  m/s, kgf

В рамках расчета колебаний на стоянке на ВППл рассмотрены колебания БЛА ВТ на корабле малого водоизмещения в условиях морского волнения. Под морским волнением понимается качка корабля определенной балльности с заданной амплитудой и периодом качания. Килевая и вертикальная качка корабля приводит в основном к изменению вертикальной перегрузки в центре масс БЛА ВТ [4], следствием чего является изменение величины усилий в амортизаторах и нагрузок, приходящихся со стороны шасси на фюзеляж. Детальный расчет на прочность элементов шасси и конструкции фюзеляжа не входит в цели настоящего анализа. Для определения устойчивости БЛА ВТ на корабле достаточно рассмотреть бортовую качку, что позволит проверить выбранную схему на факт наличия незатухающих колебаний и рассчитать величину корректировки противокapotажного угла, определяемую различным обжатием амортизаторов при наклоне БЛА ВТ на качающейся палубе [4]. Предполагается действие бортовой и килевой качек независимо друг от друга. На рис. 19 представлена расчетная схема бортовой качки.

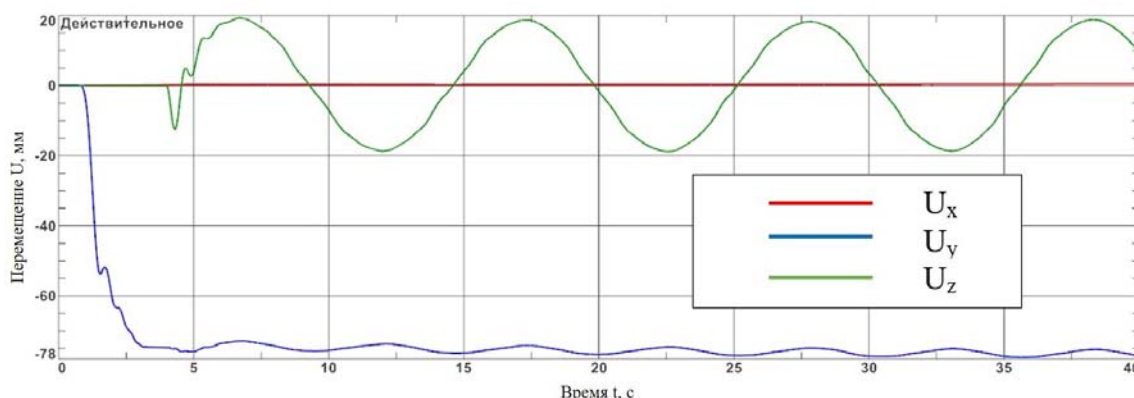
Бортовая качка задается как регулярное гармоническое кинематическое возмущение

в соответствии с формулой (3), приложенное к центру качки:

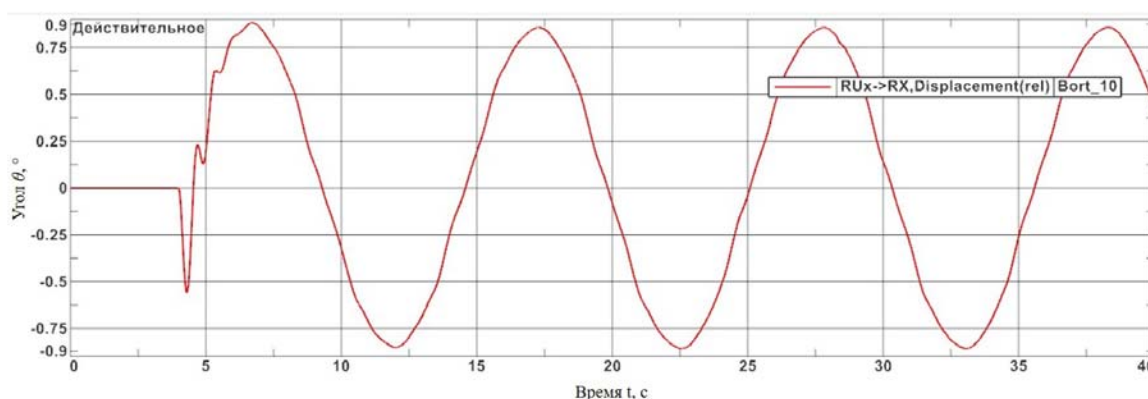
$$\theta_{\text{борт}} = \theta_0 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T_{\text{борт}}} \cdot t\right). \quad (3)$$



**Рис. 19.** Расчетная схема бортовой качки  
**Fig. 19.** Calculation scheme of on-board pitching



**Рис. 20.** Линейные перемещения ЦМ БЛА ВТ относительно ВППл, бортовая качка, мм  
**Fig. 20.** Linear movements of the HT UAV center of mass relative to the landing pad, side pitching, mm



**Рис. 21.** Угол поворота БЛА ВТ относительно ВППл  $\theta$ , бортовая качка, град  
**Fig. 21.** Angle of rotation of the HT UAV relative to the landing pad  $\theta$ , side roll, deg

Для расчета были приняты следующие величины:

коэффициенты трения между ползком и посадочной площадкой  $\mu = 0,5$ ,  
время интегрирования  $t = 40$  с,  
шаг интегрирования  $h = 0,01$  с.

Результаты расчета посадки представлены на рис. 20–23.

Величину корректировки противокapotажного угла [4] для принятой в расчете геометрии БЛА ВТ можно определить в соответствии с формулой

$$\Delta\phi = \frac{\Delta s'}{B} = \frac{2\Delta s}{B} = \frac{2 \cdot 0,004}{1,5} = 0,3^\circ, \quad (4)$$

где  $\Delta s'$  – разница вертикальных перемещений ползков по левому и правому борту;  $\Delta s$  – разница хода амортизаторов по левому и правому борту;  $B$  – колея шасси.

Можно отметить, что полученная величина является незначительной по сравнению с минимально допустимой величиной противокapotажного угла  $\gamma$ , равной  $35^\circ$ , следовательно, данная схема шасси демонстрирует хорошую устойчивость при размещении на корабле.

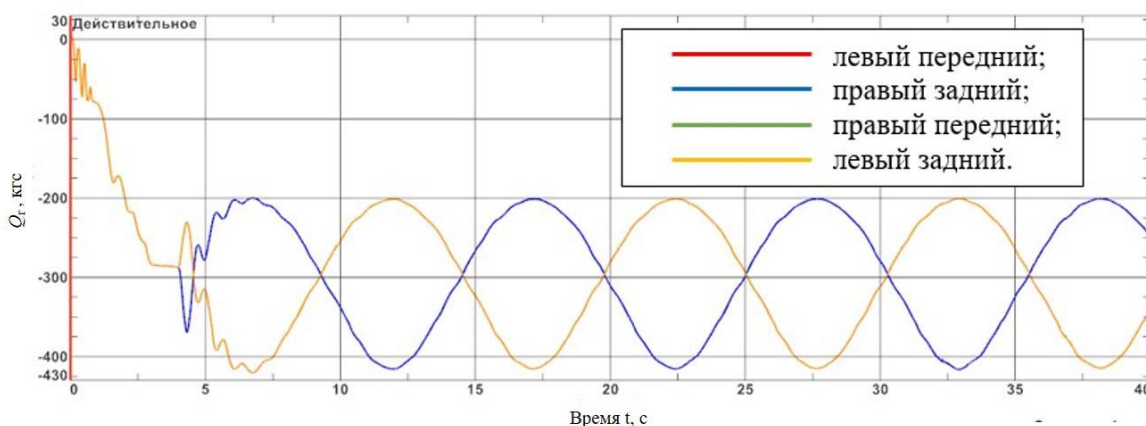


Рис. 22. Усилия в амортизаторах  $Q_r$ , бортовая качка, кгс  
Fig. 22. Forces in shock absorbers  $Q_r$ , side pitching, kgf

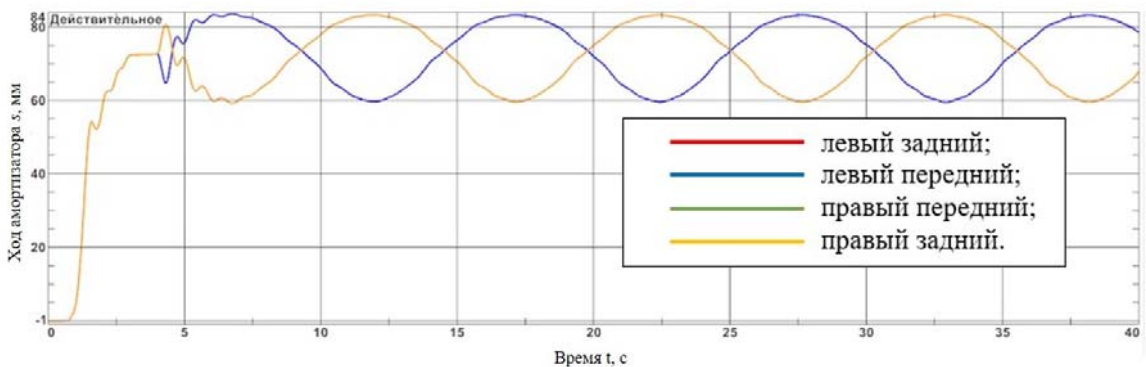


Рис. 23. Ход амортизаторов шасси, бортовая качка, мм  
Fig. 23. Stroke of the landing gear shock absorbers, side pitching, mm

## Заключение

Технический облик корабельного БЛА ВТ в части взлетно-посадочных устройств определяется спецификой условий базирования на корабле.

С учетом наложенных ограничений на конструкцию шасси установлено, что наиболее предпочтительной для перспективного БЛА ВТ является схема ползкового шасси рычажно-параллелограммного типа с выносным амортизатором, так как она обеспечивает заданный клиренс при посадке и неизменяемую поперечную базу для возможности применения механизма принудительной посадки с фиксацией за ползки при относительно малых посадочных перегрузках, а также устойчивое и не приводящее к возникновению незатухающих колебаний поведение на корабле малого водоиз-

мещения. Подобная схема может быть применена также для пилотируемых вертолетов берегового и корабельного базирования.

В дальнейшем необходимо провести работы для выбранной конструкции шасси, связанные с оптимизацией конструкции по массе, определением достаточной прочности, а также, по отстройке системы «шасси – фюзеляж» от автоколебаний типа земной резонанс.

## Список литературы

1. Кошкин Р.П. Беспилотные авиационные системы. М.: Стратегические приоритеты, 2016. 676 с.
2. Рябов К. Семейство беспилотных летательных аппаратов MQ-8 (США) [Электронный ресурс] // Военное обозрение. 2015.

URL: <https://topwar.ru/67878-semeystvo-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov-mq-8-ssha.html> (дата обращения: 23.12.2024).

3. **Тищенко М.Н., Некрасов А.В., Радин А.С.** Вертолеты. Выбор параметров при проектировании. М.: Машиностроение, 1976. 368 с.

4. **Сокоиков Ю.Г.** Применение вертолетов с авианесущих кораблей. М.: Военное издательство, 1989. 180 с.

5. **Hodge S.J.** Simulating the environment at the helicopter-ship dynamic interface: research, development and application / S.J. Hodge, J.S. Forrest, G.D. Padfield, I. Owen // *The Aeronautical Journal*. 2012. Vol. 116, iss. 1185. Pp. 1155–1184. DOI: 10.1017/S0001924000007545

6. **Kiefer J., Ward M., Costello M.** Rotorcraft hard landing mitigation using robotic landing gear [Электронный ресурс] // *Journal of dynamic systems, measurement, and control*. 2016. Vol. 138. ID: 031003. DOI: 10/1115/1/4032286 (дата обращения: 23.12.2024).

7. **León B.L., Rimoli J.J., Di Leo C.V.** Rotorcraft dynamic platform landings using robotic landing gear [Электронный ресурс] // *Journal of dynamic systems, measurement, and control*. 2021. Vol. 143, iss. 11. ID: 111006. 19 p. DOI: 10/1115/1/4051751 (дата обращения: 23.12.2024).

8. **Boix D.M., Goh K., McWhinnie J.** Modelling and control of helicopter robotic landing gear for uneven ground conditions // 2017 Workshop on research, education and development of unmanned aerial systems (RED-UAS). Sweden, Linköping, 2017. Pp. 60–65. DOI: 10.1109/RED-UAS.2017.8101644

9. **Stolz B., Bröderman T., Castiello E. et al.** An adaptive landing gear for extending the operational range of helicopters // 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Spain, Madrid, 2018. Pp. 1757–1763. DOI: 10.1109/IROS.2018.8594062

10. **Урбанович В.А., Червоная Е.А., Шепель И.Н.** Метод расчета характеристик общего напряженно-деформированного состояния ползкового шасси вертолета при его посадке на авторотации // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сборник научных трудов*. 2017. Вып. 75. С. 163–172.

11. **Михайлов С.А., Коротков Л.В., Неделько Д.В.** К расчету статического нагружения трубчатого ползкового шасси вертолета // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2010. № 4. С. 3–6.

12. **Загидулин А.Р.** К расчету жидкостно-газовой амортизации шасси летательного аппарата / А.Р. Загидулин, Е.Г. Подружин, Г.И. Расторгуев, В.И. Максименко // *Научный вестник НГТУ*. 2017. № 4 (69). С. 117–128. DOI: 10.17212/1814-1196-2017-4-117-128

13. **Кручинин М.М.** Методика выбора параметров колесного шасси на основе формально-имитационных математических моделей: дис. ... канд. тех. наук. М.: МАИ, 2019. 170 с.

## References

1. **Koshkin, R.P.** (2016). Unmanned aerial systems. Moscow: Strategicheskkiye prioritety, 676 p. (in Russian)

2. **Ryabov, K.** (2015). MQ-8 family of unmanned aerial vehicles (USA). *Voyennoye obozreniye*. Available at: <https://topwar.ru/67878-semeystvo-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov-mq-8-ssha.html> (accessed: 23.12.2024). (in Russian)

3. **Tishchenko, M.N., Nekrasov, A.V., Radin, A.S.** (1976). Helicopters. Selection of parameters in design. Moscow: Mashinostroyeniye, 368 p. (in Russian)

4. **Sokovikov, Yu.G.** (1989). The use of helicopters from aircraft-carrying ships. Moscow: Voyennoye izdatelstvo, 180 p. (in Russian)

5. **Hodge, S.J., Forrest, J.S., Padfield, G.D., Owen, I.** (2012). Simulating the environment at the helicopter-ship dynamic interface: research, development and application. *The Aeronautical Journal*, vol. 116, issue 1185, pp. 1155–1184. DOI: 10.1017/S0001924000007545

6. **Kiefer, J., Ward, M., Costello, M.** (2016). Rotorcraft hard landing mitigation using robotic landing gear. *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, vol. 138. DOI: 10/1115/1/4032286 (accessed: 23.12.2024).

7. **León, B.L., Rimoli, J.J., Di Leo, C.V.** (2021). Rotorcraft dynamic platform landings using robotic landing gear. *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, vol. 143, issue 11, ID: 111006, 19 p. DOI: 10/1115/1/4051751 (accessed: 23.12.2024).

8. **Boix, D.M., Goh, K., McWhinnie, J.** (2017). Modelling and control of helicopter robotic landing gear for uneven ground conditions. *In: 2017 Workshop on research, education and development of unmanned aerial systems (RED-UAS)*. Sweden, Linköping, pp. 60–65. DOI: 10.1109/RED-UAS.2017.8101644

9. **Stolz, B., Bröderman, T., Castiello, E. et al.** (2018). An adaptive landing gear for extending the operational range of helicopters. *In: 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Spain, Madrid, pp. 1757–1763. DOI: 10.1109/IROS.2018.8594062

10. **Urbanovich, V.A., Chervonaya, E.A., Shepel, I.N.** (2017). Method for calculating the characteristics of the general stress-strain state of the helicopter's skid chassis during its landing on autorotation. *Otkrytye informatsionnye i com-*

*pyuternye integrirovannye tekhnologii: sbornik nauchnykh trudov*, issue 75, pp. 163–172. (in Russian)

11. **Mikhailova, S.A., Korotkov, L.V., Nedel'ko, D.V.** (2010). Analysis of static loading of a helicopter tubular skid landing gear. *Russian Aeronautics*, vol. 53, no. 4, pp. 369–374.

12. **Zagidulin, A.R., Podruchin, E.G., Rastorguev, G.I., Maksimenko, V.N.** (2017). Calculation of liquid-gas dampers of the aircraft landing gear. *Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, no. 4 (69), pp. 117–128. DOI: 10.17212/1814-1196-2017-4-117-128 (in Russian)

13. **Kruchinin, M.M.** (2019). Methodology for selecting parameters of wheeled landing gear on the base of formal-simulation mathematical models: Cand. of Tec. Sc. Thesis. Moscow: MAI, 170 p. (in Russian)

### Сведения об авторах

**Титов Дмитрий Васильевич**, руководитель группы общего проектирования АО «Национальный центр вертолетостроения им. М.Л. Миля и Н.И. Камова», d.titov@nhcmk.ru.

**Парненко Алексей Евгеньевич**, кандидат технических наук, главный конструктор научно-конструкторского центра перспективного проектирования винтокрылых летательных аппаратов АО «Национальный центр вертолетостроения им. М.Л. Миля и Н.И. Камова», доцент кафедры проектирования вертолетов Московского авиационного института (национального исследовательского университета), a.parnenkov@nhcmk.ru.

**Киселев Алексей Владимирович**, инженер-конструктор, АО «Национальный центр вертолетостроения им. М.Л. Миля и Н.И. Камова», аспирант Московского энергетического института (национального исследовательского университета), kiselevAVI@mpei.ru.

### Information about the authors

**Dmitry V. Titov**, the Head of the General Design Group of JSC National Helicopter Center Mil & Kamov, d.titov@nhcmk.ru.

**Alexey E. Parnenkov**, Candidate of Technical Sciences, Chief Designer of the Scientific and Design Center for Advanced Design of Rotary-wing Aircraft of JSC National Helicopter Center Mil & Kamov, Associate Professor of Chair of Helicopter Design, Moscow Aviation Institute (National Research University), a.parnenkov@nhcmk.ru.

**Alexey V. Kiselyov**, Design Engineer, JSC National Helicopter Center Mil & Kamov, Postgraduate Student, Moscow Power Engineering Institute (National Research University), kiselevAVI@mpei.ru.

Поступила в редакцию	04.03.2025	Received	04.03.2025
Одобрена после рецензирования	14.04.2025	Approved after reviewing	14.04.2025
Принята в печать	24.07.2025	Accepted for publication	24.07.2025

НАУЧНЫЕ ОБЗОРЫ

УДК 629.7

DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-4-84-104

## Развитие автономных систем управления полетом опционально пилотируемых винтокрылых летательных аппаратов

М.И. Мясников<sup>1</sup>, И.Р. Ильин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Национальный центр вертолетостроения им. М.Л. Миля и Н.И. Камова, Томилино, Россия

**Аннотация:** В настоящей статье рассмотрена эволюция электрических дистанционных систем управления полетом (ЭДСУ) винтокрылых летательных аппаратов, начиная от первых аналоговых до современных автономных систем управления полетом. Такие системы управления полетом могут заменить пилота в трудных погодных условиях и экстремальных ситуациях, тем самым повышая безопасность полета. При правильной интеграции автономного полета с ручным управлением появится возможность свести к минимуму критические, связанные с человеческим фактором, причины летных происшествий, таких как столкновение с наземными препятствиями или потеря пространственной ориентации в сложных метеоусловиях. Автономный режим пилотирования подразумевает контроль и проверку поступающих от пилота входных сигналов, их сравнение с целями полетного задания и существующими на данный момент времени погодными условиями (и накладываемыми в связи с этим ограничениями). Система может включать пилота в контур управления и уведомлять его об этом, а в экстремальной ситуации вообще исключать его участие. Современные системы автономного управления рассмотрены на примере летающей лаборатории RASCAL JUH-60A, которая использовалась для отработки элементов системы дистанционного управления вертолета UH-60M Black Hawk при его модернизации.

**Ключевые слова:** электрическая дистанционная система управления (ЭДСУ), автономная система управления полетом (АСУП), опционально пилотируемый летательный аппарат.

**Для цитирования:** Мясников М.И., Ильин И.Р. Развитие автономных систем управления полетом опционально пилотируемых винтокрылых летательных аппаратов // Научный вестник МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 4. С. 84–104. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-4-84-104

## The development of autonomous flight control systems for optionally manned rotary-wing aircraft

M.I. Myasnikov<sup>1</sup>, I.R. Ilyin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Helicopter Center Mil & Kamov, Tomilino, Russia

**Abstract:** This article examines the evolution of fly-by-wire (FBW) flight control systems for rotary-wing aircraft, from early analogue to modern autonomous flight control systems. Such flight control systems can replace a pilot in case of adverse weather conditions and extreme situations, thereby enhancing flight safety. Proper integration of autonomous flight with manual control will minimize the critical human factor-related causes of flight accidents, such as collision with ground obstacles or loss of spatial

orientation in severe meteorological conditions. Autonomous piloting mode implies monitoring and verification of input signals from the pilot and their comparison with targets of flight mission and current weather conditions (and restrictions imposed in connection with it). The system can include the pilot in the control loop and notify him of this, eliminating his activity in case of emergency. Modern autonomous control systems are considered based on the example of the flying testbed RASCAL JUH-60A, which was used to test elements of the FBW for the UH-60M Black Hawk helicopter during its modernization.

**Key words:** fly-by-wire (FBW) flight control system, autonomous flight control system (AFCS), optionally manned flight vehicle.

**For citation:** Myasnikov, M.I., Ilyin, I.R. (2025). The development of autonomous flight control systems for optionally manned rotary-wing aircraft. Civil Aviation High Technologies, vol. 28, no. 4, pp. 84–104. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-4-84-104

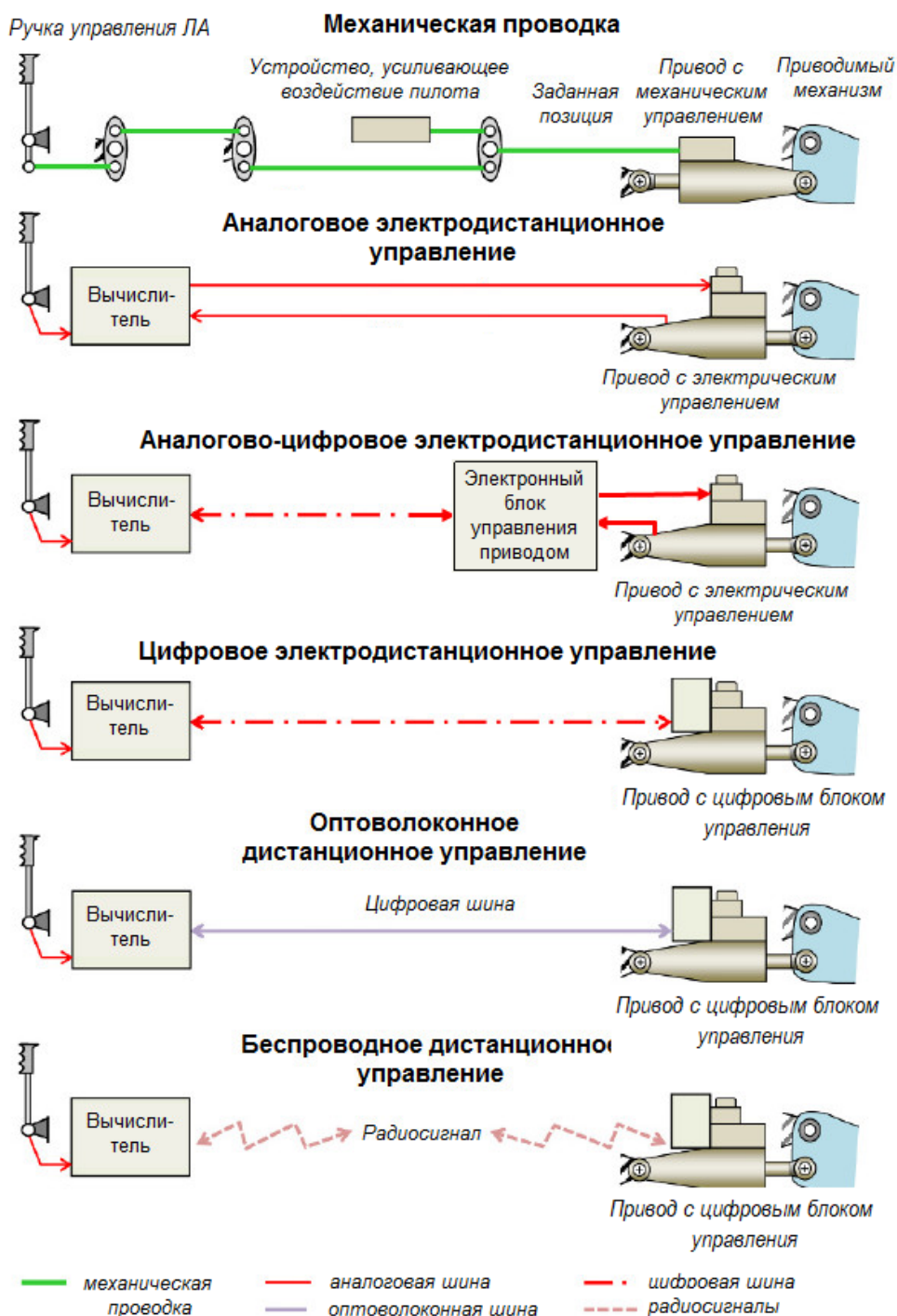
## Введение

Внедрение электродистанционных систем управления (ЭДСУ, fly-by-wire) привело к существенному расширению возможностей систем управления винтокрылыми летательными аппаратами (ВКЛА). Замена традиционных механических тяг управления на электрические, оптические или беспроводные линии передачи управляющих сигналов обеспечивает высокую точность управления, улучшает устойчивость и маневренность ВКЛА (рис. 1) [1, 2]. По мере развития аналоговых, а затем и цифровых ЭДСУ в них появились дополнительные функции, повышающие безопасность полета, например система улучшения устойчивости и управляемости, функции, снижающие рабочую нагрузку на экипаж, и функции снижения уровня вибраций летательного аппарата (ЛА). Эти системы значительно улучшили пилотажные характеристики воздушного судна, особенно в сложных условиях полета. Цифровые системы ЭДСУ также позволили использовать расширенные режимы управления полетом, такие как стабилизация пространственного положения, стабилизация высоты и автоматическая стабилизация курса ЛА. Эти возможности систем управления позволили повысить устойчивость летательного аппарата и сделать его более доступным для пилотирования, даже для менее опытных летчиков. За последние 50 лет системы ЭДСУ стали больше интегрироваться с системами навигации и авионики. Эта интеграция позволила реализовать следующие функции: автоматическую навигацию по путевым точкам, огибание рельефа местности и предотвращение столкновения с препят-

ствиями. Усовершенствованные адаптивные ЭДСУ включают в себя механизмы резервирования и отказоустойчивости, которые обеспечивают управление воздушным судном даже в случае частичного отказа элементов системы управления. Кроме того, современные ЭДСУ могут включать адаптивные и прогнозирующие алгоритмы управления, которые регулируют законы управления в режиме реального времени на основе различных факторов, включая изменение условий полета и конфигурации ЛА. Наконец, в последние годы ЭДСУ были объединены с автономными системами, что позволило ВКЛА работать в беспилотном режиме или в режиме опционального пилотирования. Это особенно важно при выполнении полета на малой высоте с огибанием рельефа местности, доставки грузов, воздушной разведки, а также поисково-спасательных операций [3–6].

## Развитие систем дистанционного управления

В табл. 1 приведена краткая история развития автоматических систем управления полетом и стабилизации ВКЛА [1]. Ранние реализации ЭДСУ проходили экспериментальную отработку на летающих лабораториях. Для улучшения устойчивости и управляемости ЛА в этих системах использовались аналоговые системы управления и штатные электронные датчики для формирования управляющих сигналов. В первых попытках обеспечить некоторый уровень «искусственной» устойчивости использовались специальные механические устройства. Элементы системы, которую сегодня называют ЭДСУ, впервые были примене-



**Рис. 1.** Эволюция концепций передачи команд авиационным приводам  
**Fig. 1.** Evolution of command transmission concepts to aircraft actuators

ны в автопилоте вертолета Sikorsky S-58, а также реализованы в контроллере боковой ручки управления для рабочего места оператора груза на вертолете Sikorsky CH-54 Skycrane. Автоматические системы управления полетом и стабилизации винтокрылых летательных ап-

паратов стали широко использовать в конце 1980-х и начале 1990-х годов, что привело к созданию современных систем улучшения устойчивости и управляемости с ограниченной ответственностью (SAS), реализованных на вертолетах UH-60A и S-76.

Таблица 1  
Table 1

История развития автоматических систем управления и стабилизации ВКЛА  
The evolution of automatic flight control systems and stabilization systems for rotary-wing aircraft

Год	Модель ВКЛА	Преимущества (по сравнению с предыдущей моделью)
<i>Механические системы улучшения устойчивости и управляемости</i>		
1941	Патент Янга	Стабилизация на режиме висения при помощи стержня Янга – Белла
1953	Sikorsky/H03-S1	Улучшение продольной устойчивости с помощью изменения угла установки лопастей несущего винта в зависимости от действующих на них аэродинамических нагрузок
1954	Bell/47	Использование двухлопастного несущего винта на кардане со стабилизирующим стержнем Янга
1964	Bell/H13	Механический фильтр первого порядка для улучшения реакции по угловой скорости крена
<i>Первый электрический автопилот</i>		
1950	Piasecki/HUP-1	Применение электрического автопилота
1952	Sikorsky/S-56	Снижение реакции на порывы ветра и улучшение реакции на управляющие сигналы
1960	Sikorsky/S-58	Автоматический режим висения
<i>Исследования в США по улучшению функционала и надежности ЭДСУ</i>		
1973	Boeing/CH47B	Демонстрация цифровой электрической системы с дистанционным управлением (проект TAGS)
1975	Boeing/CH-62	Изменение параметров системы устойчивости и управляемости в зависимости от режима полета (проект HLH)
1986	Sikorsky/UH-60A	Оптоволоконная / электродистанционная система управления с боковой ручкой управления (программа ADOCS)
1992	Sikorsky/S-76 Shadow	Переключение режимов автопилота на этапах взлета и посадки
<i>Исследования ЭДСУ в Европе и Канаде</i>		
1979	Bell/205	Демонстрационный полет с ЭДСУ, Национальный научно-исследовательский совет (NRC), Канада
1985	BO/105 ATTHes	Летающая лаборатория ЭДСУ, Немецкий аэрокосмический центр, Германия
1991	Aérospatiale/ AS 365 Dauphin	Демонстрационный полет с ЭДСУ, «Аэроспасьяль», Франция
2001	Bell/412 ASRA	Демонстрационный полет с ЭДСУ, Национальный научно-исследовательский совет (NRC), Канада
2002	Eurocopter/EC135	Демонстрационный полет с оптоволоконной ДСУ, Немецкий аэрокосмический центр, Германия

Полнофункциональные ЭДСУ в составе цифровых автоматических систем управления полетом (AFCS) появились в середине 1970-х годов (табл. 2) [1]. В 1971 году армия США заключила контракт с Boeing/Vertol на разработку усовершенствованных техниче-

ских компонентов (АТС) для вертолета большой грузоподъемности (HLH) ХСН-62 [3].

Данная программа включала в себя разработку системы управления полетом. В рамках этого контракта модифицированный Boeing/Vertol CH-47, получивший обозначе-

Таблица 2  
Table 2

Примеры разработанных на сегодняшний день ВКЛА с ЭДСУ  
Examples of Up-to-Date Rotary-Wing Aircraft Equipped with Fly-By-Wire Flight Control Systems

Год	Модель ВКЛА	Характеристики
1975* 1984*	Boeing/ AH-64A Apache	Ударный вертолет Механическая проводка с аварийной (нерезервированной) ЭДСУ в каждом канале управления
1989* 2005**	Boeing/ V22 Osprey	Многоцелевой военный конвертоплан с ЭДСУ во всех каналах
1992* 1994**	McDonnell/ MD 900 Explorer	Легкий вертолет Аналоговая ЭДСУ для системы путевого управления
1995* <sup>1</sup> 2003* <sup>2</sup> 2007**	NH Industries/ NH-90	Военный вертолет среднего класса Первый военный вертолет в массовом производстве, оснащенный ЭДСУ (с 4-кратным резервированием)
1996* Прекращена в 2004	Boeing/Sikorsky RAH-66 Comanche	Боевой вертолет с ЭДСУ (3-кратное резервирование) без механической резервной системы управления
2003*	Agusta Westland/ AW609	Гражданский транспортный конвертоплан, оснащенный ЭДСУ (3-кратное резервирование)
2015*	Bell/ 525 Relentless	Многоцелевой гражданский транспортный вертолет. Первый пассажирский вертолет, оснащенный ЭДСУ (3-кратное резервирование) без механической резервной системы управления

\* Первый полет. \*\* Ввод в эксплуатацию. <sup>1</sup>Только с механической СУ. <sup>2</sup>С ЭДСУ.

ние Model 347, стал первым вертолетом, совершившим в 1974 году полет с ЭДСУ без механического резервирования. Другим вертолетом, использовавшим в то время технологию ЭДСУ, был Sikorsky S-72. S-72 – экспериментальный вертолет с изменяемым углом установки крыла. Технологии ЭДСУ, использованные на S-72, были только первым шагом по сравнению с современными системами, но ознаменовали важный этап в развитии технологии дистанционных систем управления винтокрылых машин. Программа Sikorsky S-72 была направлена на изучение преимуществ сочетания характеристик несущего винта на вертикальных режимах полета (вертикальные взлет-посадка, висение, полет с малыми скоростями) с высокими аэродинамическими характеристиками крыла на больших скоростях. Система ЭДСУ S-72 стабилизировала вертолет и осуществляла управление при переходе между вертолетным и самолетным режимами полета.

В 1980-х годах технология ЭДСУ начала приобретать все большее значение в разработке винтокрылых летательных аппаратов, хотя она все еще находилась на ранней стадии по сравнению с современными системами дистанционного управления. В течение этого десятилетия несколько программ по созданию винтокрылых летательных аппаратов в разной степени включали в себя технологию ЭДСУ. Важно отметить, что системы ЭДСУ винтокрылых машин 1980-х годов были не такими совершенными, как на современных ЛА. Они в первую очередь были направлены на повышение устойчивости и управляемости, а не на выполнение полного профиля или более сложных режимов полета, входящих в функционал современных систем ЭДСУ.

Тем не менее внедрение технологии ЭДСУ на этих винтокрылых машинах 1980-х годов стало важным шагом на пути к повышению безопасности полетов вертолетов. Для разра-

ботки и демонстрации усовершенствованных законов управления полетом компания Sikorsky модифицировала вертолет S-76, установив дополнительную кабину пилота в его носовой части. Этот проект получил название SHADOW (рис. 2) (The Sikorsky Helicopter Advanced Demonstrator of Operator Workload).



Рис. 2. Летящая лаборатория Sikorsky SHADOW  
Fig. 2. Sikorsky SHADOW flying testbed

Модифицированный вертолет имел 4-канальный контроллер боковых ручек – тангажа, крена, рыскания и общего шага – вместо обычных рычагов управления циклическим и общим шагом и педалей путевого управления. Система была полностью электродистанционной со страхующими пилотами на задних креслах, контролировавшими ход испытаний с возможностью перехватить управление вертолетом при необходимости.

В 1990–2000-х годах цифровые системы ЭДСУ начали заменять аналоговые. Этот переход обеспечил ряд преимуществ, включая повышенную точность, децентрализацию и гибкость. Цифровые системы ЭДСУ позволяли применять более сложные алгоритмы управления и интеграцию современных датчиков с бортовыми вычислителями. В течение 1990-х годов технология ЭДСУ продолжала развиваться, и ее внедрение на винтокрылых машинах стало более массовым. В частности, конвертоплан V-22 стал первой серийной винтокрылой машиной, на которой была реализована ЭДСУ с полной ответственностью [2]. К этому времени требования к пилотажным характеристикам были подтверждены многочисленными исследованиями, проведенными Управлением аэродинамики и динамики полета армии США и НАСА. Итогом этого исследования стала

разработка спецификации ADS-33, актуализированной в 2000 году.

В начале 2000-х годов Исследовательский центр Эймса НАСА и Управление аэродинамики и динамики полета Армии США провели летные квалификационные испытания исследовательской системы управления полетом (RFCS), интегрированной в летающую лабораторию RASCAL, созданную на базе вертолета UH-60A BLACK HAWK, кардинально модифицированного для обеспечения программ летных исследований. В 2007 году лаборатория RASCAL была значительно модифицирована для размещения ключевых аппаратных и программных элементов системы управления полетом вертолета UH-60M Upgrade (UH-60M/U). Первый полет лаборатории состоялся в 2006 году. Исследовательские летные испытания UH-60M/U проводились до 2011 года объединенной группой из специалистов фирмы «Сикорский» и Армии США в Центре исследования полетов компании «Сикорский» в Уэст-Палм-Бич, Флорида. Вертолет показал полное соответствие первому уровню ADS-33 GVE/DVE (рис. 3).



Рис. 3. Вертолет Sikorsky UH-60M/U с ЭДСУ  
Fig. 3. Sikorsky UH-60M/U FBW Helicopter

В 2010-х годах технологии ЭДСУ продолжали развиваться, обеспечивая улучшенное управление, безопасность и расширенные эксплуатационные возможности. ЭДСУ оборудованы: вертолет AW189 AgustaWestland, конвертоплан AW-609, Eurocopter EC175, Sikorsky S-97 RAIDER, конвертоплан BellV-280 Valor и CH-148 Cyclone, военная модификация коммерческого вертолета Sikorsky S-92. Ожидается, что вертолет Bell 525 Relentless (рис. 4), разработка которого началась в 2012 году, а первый полет совершен в 2015 году,

станет первым гражданским вертолетом с ЭДСУ, сертификация которого ожидается в 2025 году [3].



Рис. 4. Вертолет Bell 525 Relentless с ЭДСУ  
Fig. 4. Bell 525 Relentless FBW Helicopter

### Эволюция автономных систем

Разработка автономных и полуавтономных систем позволила повысить безопасность и универсальность винтокрылых машин. Эти системы могут помочь в навигации, предотвращении столкновений и даже в выполнении дистанционно пилотируемых или автономных миссий. Истоки автономных систем на винтокрылых машинах уходят далеко в 1980-е годы. С 1980-х по середину 2000-х годов «Сикорский» разработал ряд алгоритмов для автономных систем, сформированных с помощью усовершенствованных законов управления полетом (FCLAWS), основанных на достижениях ЭДСУ.

В 2002 году компания «Сикорский» начала участвовать в проекте «Беспилотный ударный военный вертолет» (UCAR) под эгидой агентства DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency). Этот ВКЛА должен был раздвинуть границы возможностей автономного полета. Программа UCAR нахо-

дилась на стадии предварительного проектирования, когда в 2004 году была отменена (подобно программе RAH-66 и другим программам развития армейской авиации США) вследствие сокращения бюджетного финансирования. В программе UCAR участвовали две крупные команды разработчиков из компаний Northrop Grumman и Lockheed Martin. В Northrop Grumman использовали планер перспективного концептуального вертолета Sikorsky и несущую систему Kaman, а в Lockheed Martin использовали проект концептуального вертолета Bell (рис. 5).

Большинство катастроф в авиации связаны с ограниченными возможностями человека при обнаружении препятствий в условиях плохой видимости, определении отклонений от курса и реакцией на непредвиденные обстоятельства в сочетании с другими осложняющими восприятие факторами. Представленный в 2013 году проект Sikorsky MATRIX Technology был разработан для решения проблемы аварийности ВКЛА в условиях плохой видимости [7–9]. Технология MATRIX – это комбинация программного и аппаратного обеспечения для автономного полета, которая позволяет пилотируемому воздушному судну выполнять ряд задач без участия человека.

В 2014 году модернизированный вертолет S-76B Sikorsky Autonomous Research Aircraft (SARA) был оборудован ЭДСУ с системой автономности MATRIX. В 2016 DARPA инициировала проект Aircrew Labor In-Cockpit Automation System (ALIAS), а система MATRIX была продемонстрирована как на вертолетах, так и на транспортных самолетах [6].



Рис. 5. UCAR (2002–2004): слева – Northrop Grumman (Sikorsky/Kaman), полномасштабная модель; справа – Lockheed Martin (Bell), концепт

Fig. 5. UCAR (2002–2004): Left – Northrop Grumman (Sikorsky/Kaman) full-scale survivability model; Right – Lockheed Martin (Bell) concept



**Рис. 6.** Полностью автономный UH-60 DARPA MATRIX  
**Fig. 6.** Fully autonomous UH-60 DARPA MATRIX

В 2018 году пилоты армии США осуществили контролируемый автономный полет с целью отработки управления опционально пилотируемым воздушным судном (ОПВ) через серию миссий SARA. В 2019 году выполнен полет модифицированного UH-60A с обновленной ЭДСУ и программным обеспечением MATRIX. Весной 2021 года на ОПВ UH-60 (рис. 6) система MATRIX была успешно испытана. В октябре 2024 года компания Sikorsky (Lockheed Martin) заключила контракт с агентством DARPA на установку автономной системы управления полетом ALIAS/MATRIX на экспериментальный вертолет UH-60M с ЭДСУ. В настоящее время Sikorsky работает с Федеральным авиационным управлением США (FAA) над сертификацией системы MATRIX, которая использует множество бортовых датчиков, лидаров и камер в сочетании с запатентованным аппаратным и программным обеспечением [3].

### **От дистанционных к автономным системам управления полетом**

С развитием систем дистанционного управления появилась возможность создания автономных систем управления полетом (Autonomous Flight Control System). Автономная система управления полетом позволяет управлять воздушным судном с минимальным вмешательством человека. В зависимости от степени автономности полета его можно выполнять с несколькими членами экипажа, с одним пилотом, а также в беспил-

лотном режиме. Летательные аппараты, оснащенные такими системами управления, получили название опционально пилотируемых (Optionally Piloted Vehicles (OPV)). Они способны выполнять пилотирование в сложных погодных условиях (туман, пыльная буря, шторм), то есть в условиях плохой видимости (Degraded Visual Environment (DVE)). Автономным системам под силу управлять ЛА при полете на малой высоте с огибанием рельефа местности, избегать столкновения с препятствиями и даже самостоятельно выбирать место для безопасной посадки.

Работа винтокрылых машин в дальнейшем неизбежно будет стремиться к более высоким уровням автономности. Полетные задания смогут выполняться либо полностью автономно, либо в совмещенном режиме, где пилот и автономная система управления работают совместно. Достижение высоких уровней автономности, однако, является сложной задачей, потому что полетные задания винтокрылых машин разнообразны и сложны и требуют выполнения ряда сложных алгоритмов. Путь к эффективному использованию автономного пилотирования при выполнении сложных операций, вероятно, потребует совершенствования процесса ручного пилотирования, где автономному полету постепенно отводится главная роль, позволяя таким образом снизить рабочую нагрузку на экипаж [10–12].

Рассмотрим архитектуру автономной системы управления полетом на примере летающей лаборатории RASCAL JUH-60A (рис. 7), которая использовалась для отработки эле-



Рис. 7. Вертолет RASCAL JUH-60A Black Hawk  
Fig. 7. RASCAL JUH-60A Black Hawk Helicopter

ментов системы дистанционного управления вертолета UH-60M Black Hawk в рамках его глубокой модернизации [13].

### **Программное обеспечение для формирования полетного задания**

Программное обеспечение для формирования полетного задания состоит из интерфейса управления полетным заданием, программного обеспечения для построения траектории полета (PG), управления вектором скорости (VC), навигации в зоне препятствий (OFN) и определения места безопасной посадки (Safe Landing Area Determination, SLAD) [11].

### **Пульт/интерфейс управления полетным заданием**

Пульт/интерфейс управления полетным заданием (Mission Manager/Operator-Interface) позволяет пилоту взаимодействовать с системой управления и следить за ее работой на уровне принятия решения. Например, пилот может выбрать желаемый пункт назначения на экране с интерактивной картой, затем система управления полетным заданием найдет информацию об этом месте и передаст команду программе навигации в зоне препятствий (Obstacle Field Navigation, OFN) направить вертолет в пункт назначения, избегая препятствий на пути следования.

### **Построение траектории полетного задания**

Для точного позиционирования вертолета интерфейс управления полетным заданием и программа навигации в зоне препятствий OFN

используют программу построения траектории полета (Path Generation (PG)). Программа PG позволяет пилоту уточнять намеченную траекторию путем введения нескольких удаленных друг от друга точек маршрута вместе с параметрами полета (максимальная скорость, скороподъемность и предельные перегрузки). Когда генератор траектории получает набор неуточненных точек маршрута, он разрабатывает их расширенный и уточненный перечень с соответствующим скоростным профилем полета. Этот перечень ограничивается таким образом, чтобы траектория полета оставалась в рамках определенных кинематических ограничений и в ограниченном пространственном коридоре в полете до каждой неуточненной точки маршрута.

Каждая неуточненная точка маршрута имеет определенный радиус, который определяет коридор между двумя последовательными точками; коридор – пространство между диаметрами двух последовательных точек маршрута. Расширенный перечень путевых точек с соответствующими скоростями направляется в блок управления точками маршрута, инициирующий полет по данной траектории. В процессе полета вертолета по определенной траектории генератор траектории может получать новый набор точек маршрута, после чего он автоматически удаляет любую незавершенную часть траектории и прокладывает новую траекторию из текущего положения.

### **Управление вектором скорости**

Управление вектором скорости (Vector Command (VC)) – альтернативный вид программы задания траектории движения воздушного судна. Программа управления вектором скорости получает дискретные изме-

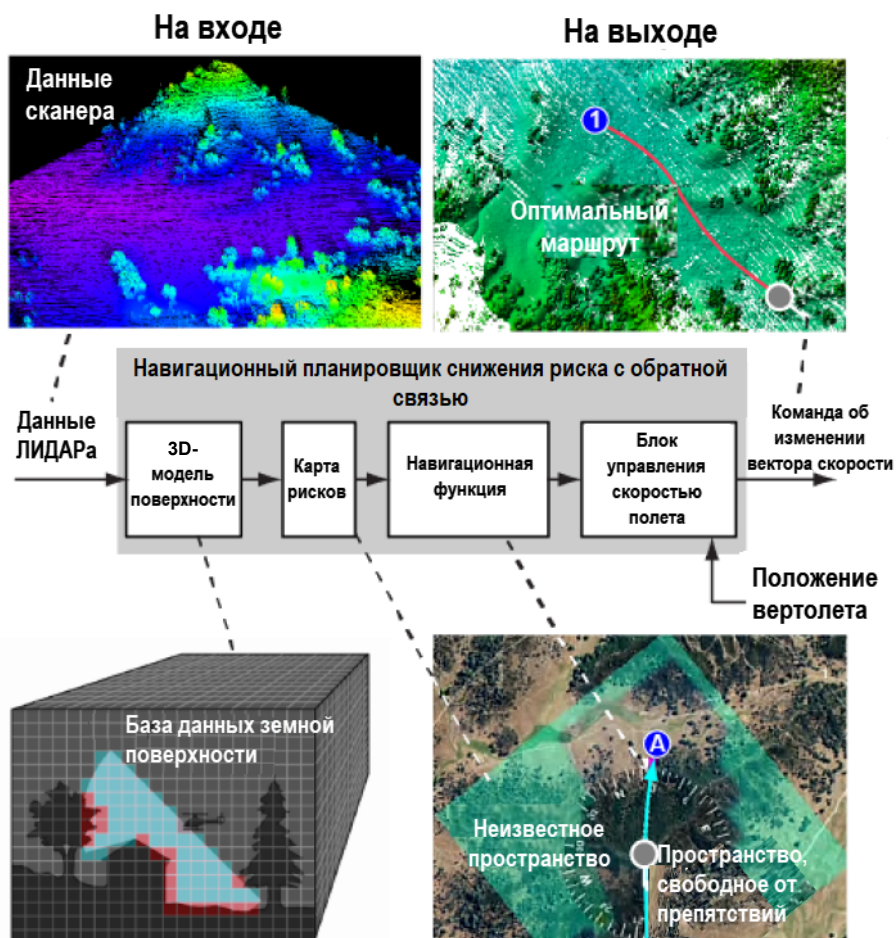


Рис. 8. Компоненты автономного алгоритма минимизации риска OFN  
Fig. 8. Components of the risk-minimizing OFN autonomy algorithm

нения желаемой скорости полета. Например, пилот может ввести значения скорости, угла наклона траектории и изменения угловой скорости рыскания, а программа ВС создаст непрерывный поток команд на изменение вектора скорости, который поступит в программу управления точками маршрута. ВС использует тот же интерфейс для управления точками маршрута, что и программное обеспечение для навигации в зоне препятствий.

### Навигация в зоне препятствий

Программа навигации в зоне препятствий OFN участвует в обработке данных, поступающих от датчиков, и передает данные о безопасной траектории полета в систему управления. Задача OFN – направлять вертолет в то место, которое выбрал пилот, избегая при этом столкновения с землей и прочими

препятствиями. Алгоритм OFN задает команду системе траекторного управления в виде набора команд об изменении скорости. В программе используется алгоритм минимизации риска столкновения с препятствиями, который создает 3D-карту пространственно изменяющихся факторов риска и прокладывает путь с минимальным риском. Основные компоненты этого планировщика представлены на рис. 8 [14].

### Определение безопасного места посадки (SLAD)

Для определения безопасных мест приземления программа определения безопасного места посадки (SLAD) учитывает ряд ограничений для места посадки, исходя из анализа 3D-облака точек, полученного при помощи лазерного дальномера. Типичные

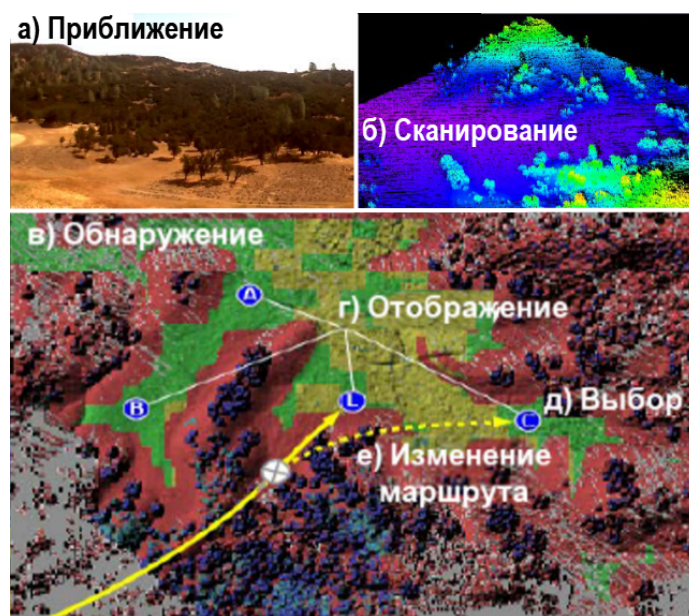


Рис. 9. Решения SLAD при выборе места посадки  
Fig. 9. SLAD solutions for landing site

требования представляют собой набор ограничений, которые позволяют подобрать место посадки в пределах допуска по углу наклона поверхности, высоте опасных препятствий и расстоянию до них.

Взаимодействие пилота с программой SLAD происходит в момент приближения к потенциальному месту посадки (рис. 9, а) [15].

Местность сканируется лидаром, и данные поступают в программу SLAD (рис. 9, б). Когда безопасные места и рекомендуемые точки найдены (рис. 9, в), они отображаются для пилота (рис. 9, г) в виде безопасной поверхности зеленого цвета, а рекомендуемые точки посадки – буквами А, В, С и L.

Решение (L) представляет собой последнюю точку маршрута, отправленную в программу OFN из предыдущего решения, поэтому оно сохраняется в каждом цикле решений до тех пор, пока не будет признано недействительным. Пилот может сохранять текущее место посадки (L) либо по желанию может изменить решение и выбрать другое место (рис. 9, д), что повлечет за собой изменение маршрута (рис. 9, е) в виде отправки альтернативной точки маршрута (С) программе OFN. В следующем цикле решений точка (С) будет отмечена как последняя отправленная точка (L).

OFN использует пространственную ячейку размером 20 м и гарантирует посадку вертолета в пределах ближайшей ячейки. Если выбор программы подтвержден в пределах одной ячейки, программа SLAD направляет финальную точку посадки в программу, генерирующую траекторию, которая может более точно посадить вертолет. Если же пилот меняет пункт назначения, то АСУП должна учесть это изменение без значительных переходных процессов. Это особенно важно вблизи конечной точки маршрута, где увеличивается вероятность столкновения с землей или препятствием.

Темп приближения в режиме SLAD определяется скоростью, которая установлена в программе минимизации риска OFN и составляет примерно 20 м/с (40 узлов). Несмотря на то что лазерный дальномер имеет дальность действия около 2 000 м, реальные решения не выдаются программой до тех пор, пока ЛА не будет находиться в 500–700 м от места приземления. Это объясняется тем, что на больших расстояниях и при малых углах наклона траектории область приземления выглядит очень маленькой по сравнению с шириной сканирования и потенциальной областью посадки и, соответственно, очень малое

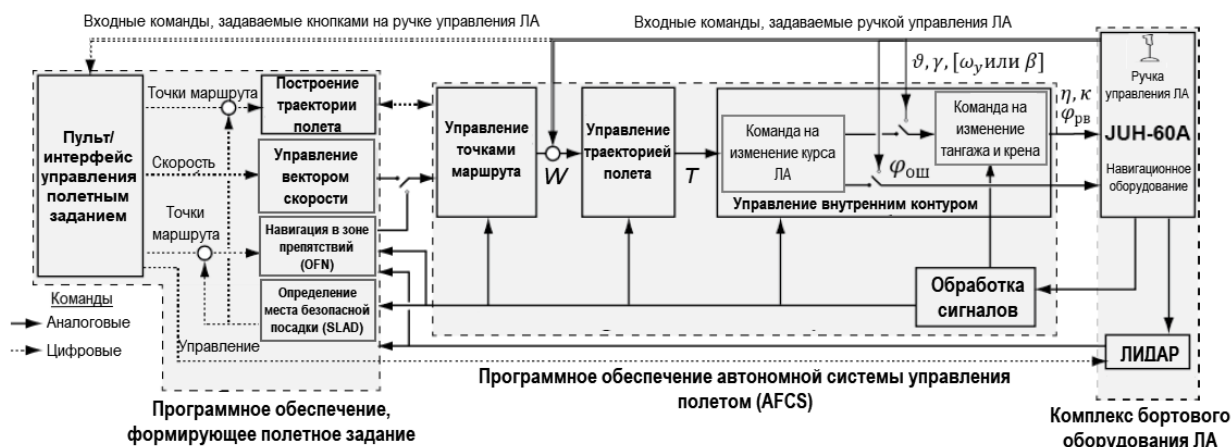


Рис. 10. Архитектура автономной системы управления полетом на примере летающей лаборатории RASCAL JUH-60A  
Fig. 10. Architecture of the autonomous RASCAL JUH-60A flying testbed

количество сканируемых точек в действительности попадает в зону посадки до момента приближения. При сближении с поверхностью на скорости 20 м/с время, остающееся пилоту до приземления в конечной точке посадки, составляет примерно 20–40 с, что не так много, учитывая летную нагрузку и обработку постоянно поступающей информации. Получение информации о более благоприятном варианте посадки вынуждает пилота быстро менять место приземления, следовательно, система должна быть способна справляться с этим без длительных или непривычных переходных процессов.

## Автономная система управления полетом

Автономная система управления полетом [15] включает в себя две программные и аппаратную части (рис. 10): программное обеспечение, формирующее полетное задание, программное обеспечение автономной системы управления полетом (AFCS) и комплекс бортового оборудования летательного аппарата.

Основные блоки программного обеспечения автономной системы управления полетом (Autonomous Flight Control Software, AFCS) показаны в центральной части рис. 10. AFCS

обеспечивает формирование команд управления вертолетом на основе команд программного обеспечения, формирующего полетное задание. Рассмотрим каждый программный блок системы AFCS более детально [15].

### Управление точками маршрута

Программа управления точками маршрута (рис. 10) получает управляющие команды о точках маршрута или векторах скорости, а затем на выходе выдает непрерывное изменение параметров траектории полета  $W$ , поступающее в программу управления траекторией полета. Управление точкам маршрута подробно показано на рис. 11, а, где представлены два интерфейса в блоке: интерфейс «построение траектории по точкам маршрута» и интерфейс «построение траектории по вектору скорости».

Интерфейс «построение траектории по точкам маршрута» получает набор заданных точек маршрута из программы построения траектории полета, который включает положение, скорость, значение перегрузки и временную информацию для навигации по определенной траектории. Эти точки сохраняются в памяти и объединяются по мере поступления, а когда получена общая картина всей траектории, они фильтруются и упорядочи-

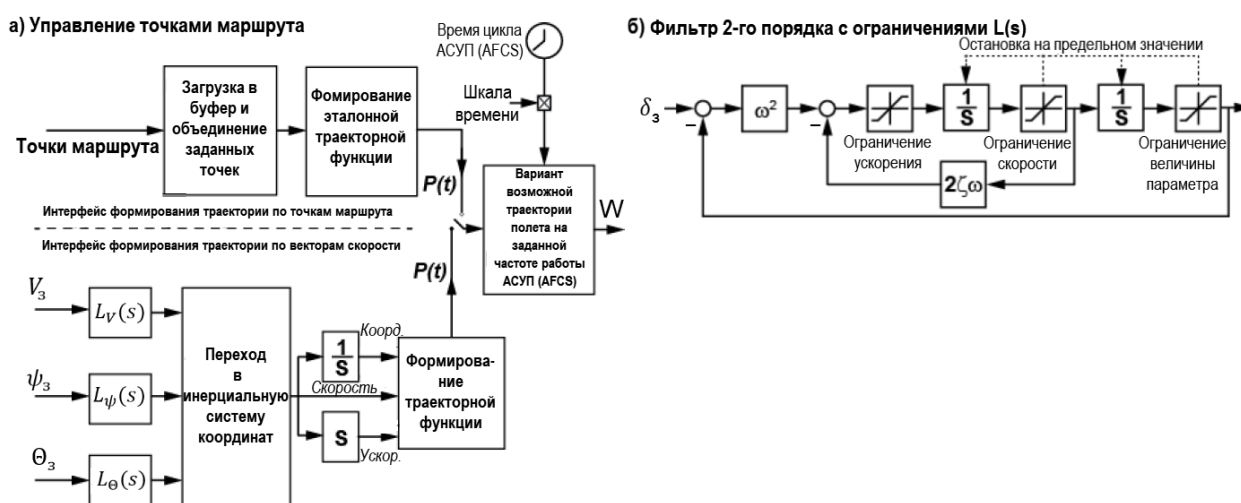


Рис. 11. Управление точками маршрута  
Fig. 11. Waypoint Control

ваются для задания траекторной функции  $P(t)$ , которая может быть вычислена в каждом временном цикле АСУП для создания непрерывного траекторного положения  $W$ , направляемого в блок управления траекторией полета.

Интерфейс «построение траектории по вектору скорости» считывает временную последовательность команд задания вектора скорости полета. Поток команд скорости может поступать либо из программы управления вектором скорости, либо из программы OFN.

Величины скорости  $V_3$ , угла рыскания  $\psi_3$  и угла наклона траектории  $\theta_3$  фильтруются с помощью фильтров 2-го порядка  $L(s)$ , показанных на рис. 11, б. Отфильтрованное значение скорости преобразуется в земную (инерциальную) систему координат и используется для вычисления положения и значений перегрузок. Эти данные затем используются для задания траекторной функции  $P(t)$ , которая задает параметры траектории  $a$ , направляемые в блок управления траекторией полета.

### Управление траекторией полета

Блок управления траекторией полета выполняет функции автопилота при задании курса полета и действует как в режиме висения, так и в режиме горизонтального полета. Блок управления траекторией отслеживает отклонение параметров траектории в инерци-

альной системе координат  $W$  от значений параметров, задаваемых блоком управления точками маршрута, преобразует их в связанную систему координат  $T$  и передает управляющие команды на изменение курса полета во внутренний контур ЛА. Он также обеспечивает необходимое сглаживание возмущений пространственного положения ЛА независимо от того, используется ли алгоритм «построение траектории по точкам маршрута» или алгоритм «построение траектории по вектору скорости» блока управления точками маршрута (рис. 11). При использовании алгоритма «построение траектории по вектору скорости» блок управления траекторией полета будет следовать траектории, полученной в результате интегрирования значений задаваемой скорости. Любое отклонение от траектории в результате накопления погрешностей интегрирования величины задаваемой скорости должно устраняться специальным алгоритмом. Программа управления траекторией полета работает в земной системе координат  $X_g Y_g Z_g$  в режиме висения (рис. 12) и в траекторной системе координат  $X_K Y_K Z_K$  в режиме горизонтального полета.

В режиме висения команды управления слежением за маршрутом задаются в инерциальной системе координат  $W = [X_g, Z_g, Y_g, \psi]$ , а команды траектории полета  $T = [V_x, V_y, \omega_y, \dot{h}]$  задаются, как показано на рис. 13, а.

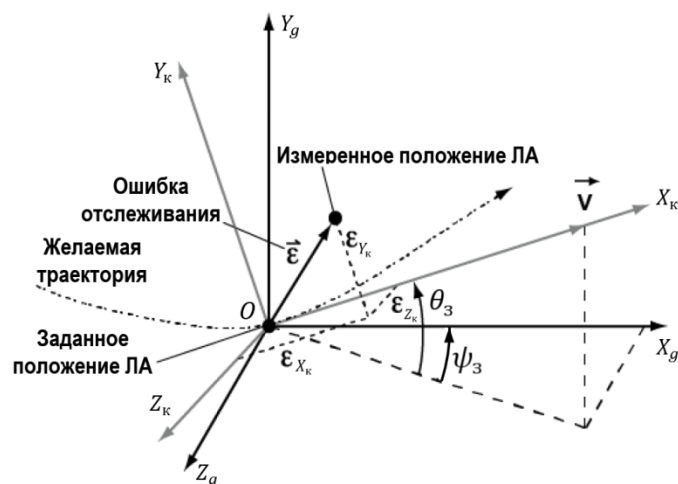


Рис. 12. Траектория полета в нормальной и траекторной системах координат  
Fig. 12. Flight Trajectory in Normal and Path Coordinate Systems

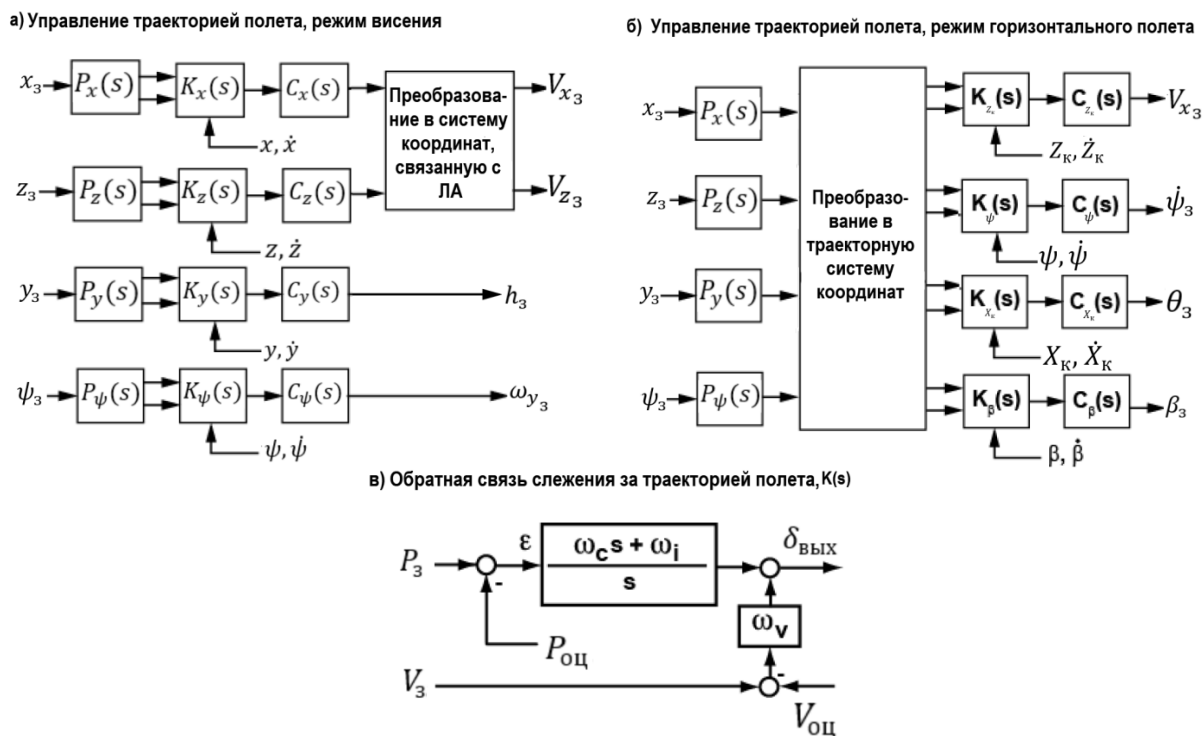


Рис. 13. Управление траекторией полета в режиме висения и в горизонтальном полете  
Fig. 13. Tracking Control in Hover and Forward Flight Mode

Предварительный фильтр  $P$  используется для формирования сквозного ответа, а компенсационное звено  $C(s)$  применяется для настройки переходного процесса пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора обратной связи  $K(s)$ . Преобразование позволяет переходить от  $X$ - $Y$ -координат в земных осях к изменению компонент

скорости в связанной с ЛА системе координат.

Блок обратной связи слежения за траекторией полета  $K(s)$  имеет структуру, показанную на рис. 13, в, где команда по координате  $P_3$ , сигнал обратной связи по координате  $P_{оц}$ , команда по скорости  $V_3$  и сигнал обратной связи по скорости  $V_{оц}$  объединяются

с ПИД-регулятором. Сигнал невязки  $\varepsilon$  по координате проходит через пропорциональный и интегральный блоки, в то время как сигнал невязки по скорости масштабируется с помощью величины  $\omega_v$  и суммируется с выходом ПИД-регулятора для создания выходного сигнала обратной связи  $\delta_{\text{вых}}$ .

В горизонтальном полете программа управления траекторией полета задает команды в траекторной системе координат  $X_k, Y_k, Z_k$ , сонаправленной с желаемой траекторией, показанной на рис. 12. Ось  $X_k$  данной системы координат сонаправлена траектории, ось  $Y_k$  нормальна к траектории в вертикальной плоскости, а ось  $Z_k$  находится в горизонтальной плоскости, перпендикулярной плоскости  $X_k-Y_k$ . Ориентация траекторной системы координат относительно инерциальной определяется заданным углом наклона траектории  $\theta$  и углом рыскания  $\psi$ .

В поступательном полете положение ЛА задается в инерциальных координатах  $W = [X_g, Z_g, Y_g, \psi]$ , а команды на изменение траектории полета  $T = [V_x, \dot{\psi}, \beta, \theta]$  формируются, как показано на рис. 13, б. Параметры траектории  $W = [X_g, Z_g, Y_g, \psi]$  предварительно отфильтровываются, а затем преобразуются в команды в траекторной системе координат. Как и в режиме висения, ПИД-регулятор используется для управления каждым соответствующим каналом управления с последующей дополнительной компенсацией  $C(s)$ . В продольном канале пройденное расстояние вдоль траектории  $X_k$  регулируется управлением скоростью  $V_{x3}$ , в то время как в канале высоты угол наклона траектории  $\theta$  регулируется при помощи управления углом наклона траектории полета  $\theta_3$ . В поперечном канале управления координата  $Z_k$  регулируется управлением скоростью рыскания  $\dot{\psi}_3$ . Наконец, в путевом канале управления боковое скольжение  $\beta$  регулируется управлением углом скольжения  $\beta_3$ .

### Управление внутренним контуром

Блок управления внутренним контуром на рис. 10 состоит из двух основных модулей: модуля управления курсом ЛА и модуля

управления угловым положением ЛА (тангажом, креном и рысканием), которые показаны на рис. 14. Эти два блока устроены так, чтобы они могли взаимно отключаться для обеспечения возможности полета в ручном режиме с помощью блока управления угловым положением ЛА.

### Модуль управления курсом ЛА

Модуль управления курсом ЛА в качестве своих входных данных использует выходные данные из блока управления траекторией полета ЛА в связанной системе координат  $T$  и генерирует для модуля управления угловым положением ЛА следующие данные: значение общего шага несущего винта  $\varphi_{\text{ош}}$ , заданный угол крена  $\gamma$ , заданный угол тангажа  $\vartheta$  и либо заданную угловую скорость рыскания  $\omega_y$  в режиме висения, либо угол скольжения  $\beta$  при поступательном полете.

В режиме висения модуль управления курсом ЛА формирует отклик на команды по скоростям  $V_x, V_z, \dot{h}$  при помощи дополнительных блоков, ограниченных пунктирной линией на рис. 14, а. Управление угловым положением в путевом канале осуществляется изменением угловой скорости рыскания, поэтому не требуется дополнительных замыкающих контуров. Для формирования заданной ответной реакции по поперечной скорости  $V_z$  канал крена имеет форсирующее звено, которое включается последовательно за блоком стабилизации поперечной скорости. Форсирующее звено компенсирует в режиме висения и малых скоростей исчезновение производной  $Y^{V_z}$  по боковой скорости, таким образом улучшая работу контура стабилизации поперечной скорости.

Подобным же образом канал тангажа имеет блок управления траекторией в продольной плоскости с форсирующим звеном, расположенным после блока стабилизации продольной скорости, который формирует необходимую ответную реакцию на изменение продольной скорости  $V_x$  в этом канале. Форсирующее звено в блоке управления траекторией в продольной плоскости компенси-

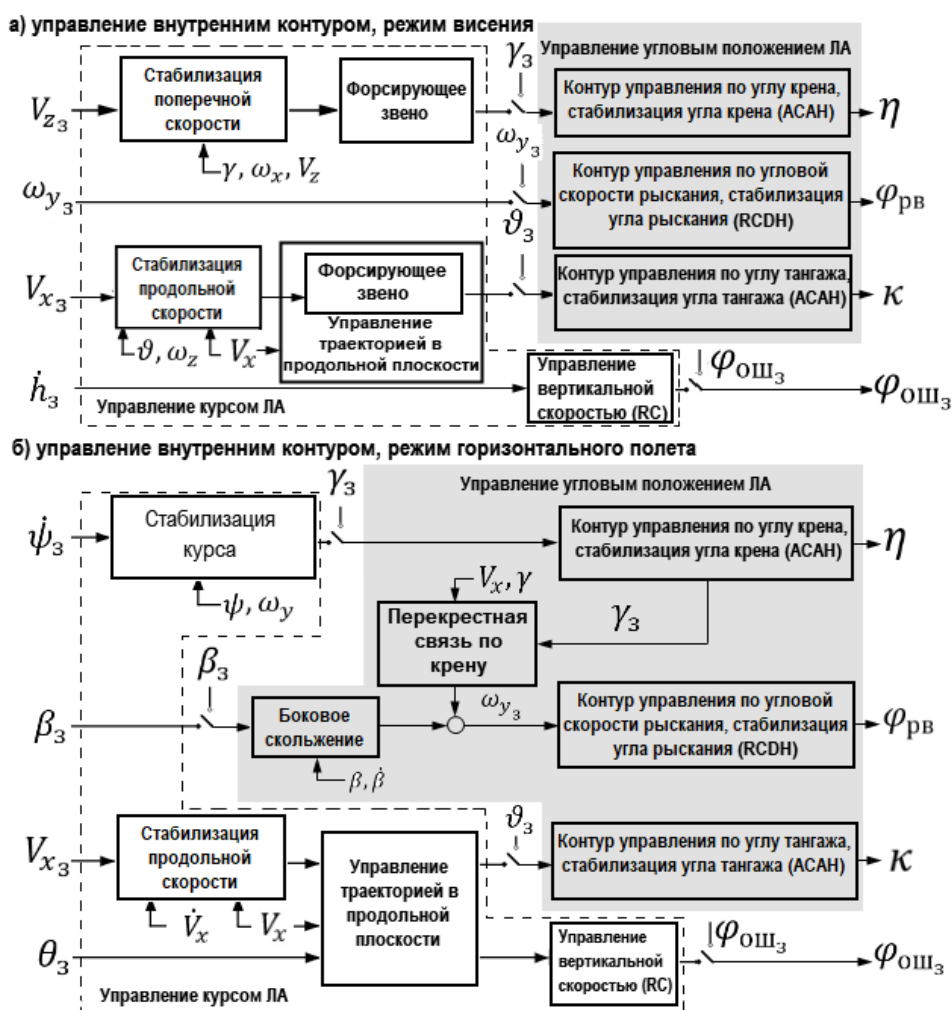


Рис. 14. Блоки управления внутренним контуром:

$\varphi_{\text{ош}}$  – общий шаг несущего винта,  $\eta$  – поперечное отклонение тарелки автомата перекоса (ТАП),  $\kappa$  – продольное отклонение ТАП,  $\varphi_{\text{рв}}$  – общий шаг рулевого винта,  $\dot{h}$  – вертикальная скорость

Fig. 14. Inner loop control units:

$\varphi_{\text{ош}}$  – collective pitch angle,  $\eta$  – lateral deviation of swashplate,  $\kappa$  – longitudinal deviation of swashplate,  $\varphi_{\text{рв}}$  – tail rotor collective pitch,  $\dot{h}$  – vertical velocity

рует исчезновение на малых скоростях производной  $X^{V_x}$  по скорости горизонтального полета. В режиме висения ответные реакции по скорости задаются в связанной системе координат. Контур вертикальной скорости имеет ПИД-управление вертикальной скоростью и высотой, а передаточные числа изменяются от режима висения до режима горизонтального полета по заданному закону. Заметим, что передаточные числа в режимах висения и горизонтального полета остаются постоянными.

В режиме горизонтального полета (область, ограниченная пунктирной линией на

рис. 14, б), блок стабилизации продольной скорости входит в контур управления и стабилизации угла тангажа, а также в контур управления вертикальной скоростью. Таким образом, задаваемые изменения скорости полета или угла наклона траектории осуществляются посредством комбинации команд на изменение угла тангажа и вертикальной скорости. Контур стабилизации продольной скорости замыкается вокруг блока управления траекторией в продольной плоскости, поэтому ответная реакция на заданное изменение скорости  $V_x$  аналогична режиму висения. Блок управления траекторией в продольной

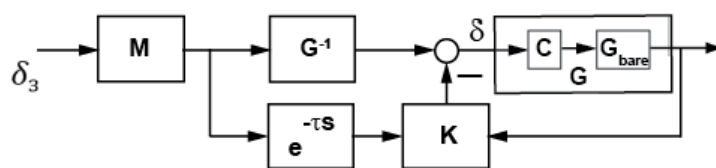


Рис. 15. Использование явной эталонной модели для стабилизации углового положения в каналах крена/тангажа и стабилизации курса в канале рыскания  
Fig. 15. Application of the explicit model-following for Roll/Pitch ACAH and Yaw RCDH

плоскости получает вертикальную скорость из горизонтальной посредством учета изменения угла наклона траектории  $\theta$ . Стабилизация поперечной скорости и форсирующее звено на рис. 14, а отключаются, когда происходит переход от режима висения к горизонтальному полету и включается контур стабилизации курса (рис. 14, б), который является ПИ-регулятором, предотвращающим изменение угла рыскания при возникновении скольжения. Контур стабилизации курса замыкается вокруг контура стабилизации угла крена, а угловая скорость рыскания и курс в качестве сигналов обратной связи передаются в блок управления по крену  $\gamma$  для получения команды по угловой скорости рыскания  $\omega_{y3}$  и стабилизации курса.

#### Управление угловым положением

Блоки управления угловым положением вертолета показаны затененными участками на рис. 14, а и 14, б. Они обеспечивают основную трехканальную стабилизацию и формируют входные команды управления вертолетом по крену  $\eta$ , тангажу  $\kappa$  и путевому управлению  $\varphi_{pв}$ .

Эти блоки служат для получения желаемых характеристик управляемости в каждом канале с использованием эталонной модели  $M$ . Структура построения блоков универсальна для каждого канала управления и показана на рис. 15. Чтобы сделать переходные процессы ближе к переходным процессам интегрального звена ( $1/s$ ) в каналах тангажа и крена, на входе в каждый соответствующий канал было предварительно помещено компенсирующее звено запаздывания второго порядка  $C$ , предваряющее модель «чистого» вертолета  $G_{bare}$ .

Параметры компенсирующих звеньев были выбраны таким образом, чтобы сделать реакцию разомкнутого контура  $G$  более похожей на систему первого порядка, потому что обратная модель  $G^{-1}$  традиционно имеет 1-й порядок. Такая компенсация эффективно подавляет взаимовлияние несущего винта и фюзеляжа, которое заставляет разомкнутый контур (особенно в канале крена) вести себя подобно звену второго порядка на частоте пересечения. Для канала рыскания компенсация отсутствует, поэтому  $C = I$ , где  $I$  – единичная матрица. Параметры контуров управления в этих блоках зависят от скорости полета и формируют управляющие воздействия по углам тангажа и крена и отклик по угловой скорости рыскания в путевом канале.

В горизонтальном полете возможен режим координации разворота, когда путевой канал используется для формирования сигнала по углу скольжения с применением блоков скольжения и перекрестной связи по крену, показанных на рис. 14, б. Блок скольжения замкнут вокруг контура стабилизации курса, где угол скольжения и угловая скорость скольжения используются как сигналы обратной связи для изменения угла рыскания.

Команда по углу крена  $\gamma$  из контура управления по углу крена (АКАН) передается через блок перекрестной связи по крену в контур стабилизации угла рыскания (RCDH), чтобы обеспечить координированный разворот при введении поперечного управления. Поскольку контур рыскания имеет обратную связь по углу скольжения, введенная перекрестная связь по крену в конечном итоге будет стремиться к нулю по мере входа ЛА в координированный разворот.

### Обработка сигнала

Блок обработки сигналов на рис. 10 принимает входные сигналы датчиков и производит необходимую фильтрацию для формирования вектора параметров состояния ЛА. Сигналы углов и угловых скоростей от инерциального навигационного блока (Inertial Navigation Unit (INU)) подвергаются цифровой фильтрации на частоте 256 Гц перед их субдискретизацией до частоты 51,2 Гц, которая является рабочей частотой АСУП.

Инерциальные координаты от встроенного блока GPS/INU фильтруются для уменьшения шума сигналов координат на высоких скоростях полета. Фильтр Калмана 3-го порядка для каждой координаты используется в качестве комплементарного фильтра, получающего сигналы ускорений от блока INU и координат от блока GPS/INU.

Оценки угла атаки  $\alpha$ , угла скольжения  $\beta$ , угла наклона траектории  $\Theta$  и соответствующих угловых скоростей производятся на основе оценок скоростей, ускорений, углов тангажа, крена и угловых скоростей ЛА. При более высоких скоростях (больше 60 узлов) комплементарный фильтр используется для оценки угла скольжения и его производной по боковому ускорению и другим измерениям вектора параметров состояния ЛА.

В горизонтальном полете оценка угла скольжения производится по инерциальной скорости в диапазонах ниже 40 узлов и выше 60 узлов с помощью комплементарного фильтра, описанного выше. В диапазоне от 40 до 60 узлов две оценки суммируются в виде линейной комбинации для создания переходной области между ними.

### Заключение

В настоящей работе кратко рассмотрена эволюция зарубежных дистанционных систем управления полетом винтокрылых летательных аппаратов, от первых аналоговых ЭДСУ до современных автономных систем управления. Правильная интеграция автономного полета с ручным управлением позволяет свести к минимуму критические, свя-

занные с человеческим фактором, причины летных происшествий, таких как столкновение с наземными препятствиями или потеря пространственной ориентации в сложных метеоусловиях.

На примере летающей лаборатории RASCAL JUH-60A рассмотрены основные принципы построения структуры и алгоритмов автономных систем управления полетом вертолетов, которые были подтверждены летными испытаниями. Эти законы управления могут быть использованы в пилотажных комплексах для навигации в зоне препятствий и определения безопасного места посадки и для таких режимов полета, как полет по заданной траектории, автономные взлет и посадка, опционально пилотируемый полет, транспортировка груза на внешней подвеске.

### Список литературы

1. **Maré J.-Ch.** Aerospace Actuators 2. Signal-by-wire and power-by-wire. Wiley, 2017. 245 p. DOI: 10.1002/9781119332442
2. **Мясников М.И., Ильин И.Р.** Основные принципы построения структуры и алгоритмов систем управления конвертопланов // Научный вестник МГТУ ГА. 2024. Т. 27, № 5. С. 70–89. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-5-70-89
3. **Strauss M.P., Scott M.W.** 50 years of progress in rotorcraft design: a retrospective from the vertical flight society's aircraft design technical committee // Proceedings of the Vertical Flight Society's 6th Decennial Aeromechanics Specialists' Conference. USA, California: Santa Clara, 6–8 February 2024. P. 34.
4. **Jayakrishnan S., Harikumar R.** Trajectory generation on approach & landing for a RLV using NOC approach // International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication. 2013. Vol. 1, iss. 6. Pp. 16–21.
5. **Malaek S.M., Kosari A.R.** Novel minimum time trajectory planning in terrain following flights // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 2007. Vol. 43, no. 1. Pp. 2–12. DOI: 10.1109/TAES.2007.357150

6. **Vajda P., Maris J.** A systematic approach to developing paths towards airborne vehicle autonomy [Электронный ресурс] // NASA Report. 2021. 101 p. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210019878/downloads/NASA-CR-20210019878final.pdf> (дата обращения: 08.10.2024).

7. **Fujizawa B.** UH-60 modernized control laws for improved handling qualities in the degraded visual environment / B. Fujizawa, M. Tischler, C. Ott, C. Blanken [Электронный ресурс] // Proceedings of the American Helicopter Society 70th Annual Forum, May 2014. DOI: 10.4050/F-0070-2014-9516 (дата обращения: 08.10.2024).

8. **Lusardi J., Fujizawa B., Morford Z.** Flight testing of coupled collective toward reducing pilot workload during landing in DVE [Электронный ресурс] // Proceedings of the American Helicopter Society International 73<sup>rd</sup> Annual Forum & Technology Display, May 2017. DOI: 10.4050/F-0073-2017-12068 (дата обращения: 08.10.2024).

9. **Young S.** Aircrew labor in-cockpit automation system in ALIAS program results [Электронный ресурс] // darpa.mil, 2016. URL: <https://www.darpa.mil/research/programs/aircrew-labor-in-cockpit-automation-system> (дата обращения: 08.10.2024).

10. **Tischler M.B.** Flight control technology advancements and challenges for future rotorcraft 40th A.A. Nikolsky honorary lecture [Электронный ресурс] // Journal of the American Helicopter Society. 2022. Vol. 67. ID: 041001. 39 p. URL: [https://www.sjsu.edu/researchfoundation/docs/AHS\\_2022\\_Tischler.pdf](https://www.sjsu.edu/researchfoundation/docs/AHS_2022_Tischler.pdf) (дата обращения: 08.10.2024).

11. **Zammali A.** Communication integrity for future helicopters flight control systems / A. Zammali, A. de Bonneval, Y. Crouzet, P. Izzo, J.-M. Massimi // 2015 IEEE/AIAA 34th Digital Avionics Systems Conference (DASC). Czech Republic, Prague, 2015. Pp. 1–20. DOI: 10.1109/DASC.2015.7311616

12. **Wen P.** Autonomous flight control based on neural networks and fuzzy decision / P. Wen, Ch. Zou, Z. Gao, J. Sun [Электронный ресурс] // Presented at the 32nd Congress of the International Council of the Aeronautical

Sciences. China, Shanghai, Pudong Shangri-La, 6–10 September 2021. 6 p. URL: [https://www.icas.org/icas\\_archive/ICAS2020/data/papers/ICAS2020\\_0591\\_paper.pdf](https://www.icas.org/icas_archive/ICAS2020/data/papers/ICAS2020_0591_paper.pdf) (дата обращения: 08.10.2024).

13. **Takahashi M.D., Whalley M.S., Fletcher J. et al.** Development and flight testing of a flight control law for autonomous operations research on the RASCAL JUH-60A // Journal of the American Helicopter Society. 2014. Vol. 59, no. 3. Pp. 1–13. DOI: 10.4050/JAHS.59.032007

14. **Whalley M.S., Takahashi M.D., Goerzen C.L. et al.** Autonomous Black Hawk in flight: obstacle field navigation and landing-site selection on the RASCAL JUH-60A // Journal of Field Robotics. 2014. Vol. 31, iss. 4. Pp. 591–616. DOI: 10.1002/rob.21511

15. **Takahashi M.D., Goerzen C.L., Schuelein G.J.** Autonomous rotorcraft flight control with multi-level pilot interaction in hover and forward flight // Journal of the American Helicopter Society. 2017. Vol. 62, no. 3. Pp. 1–13. DOI: 10.4050/JAHS.62.032009

## References

1. **Maré, J.-Ch.** (2017). Aerospace Actuators 2. Signal-by-wire and power-by-wire. Wiley, 245 p. DOI: 10.1002/9781119332442

2. **Myasnikov, M.I., Ilyin, I.R.** (2024). Basic principals of the tiltrotors flight control system architecture and algorithms. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 27, no. 5, pp. 70–89. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-5-70-89 (in Russian)

3. **Strauss, M.P., Scott, M.W.** (2024). 50 years of progress in rotorcraft design: a retrospective from the vertical flight society's aircraft design technical committee. In: *Proceedings of the Vertical Flight Society's 6th Decennial Aeromechanics Specialists' Conference*, USA, California, Santa Clara, February 6-8, p. 34.

4. **Jayakrishnan, S., Harikumar, R.** (2013). Trajectory generation on approach & landing for a RLV using NOC approach. *International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication*, vol. 1, issue 6, pp. 16–21.

5. **Malaek, S.M., Kosari, A.R.** (2007). Novel minimum time trajectory planning in terrain

following flights. In: *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 43, no. 1, pp. 2–12. DOI: 10.1109/TAES.2007.357150

6. **Vajda, P., Maris, J.** (2021). A systematic approach to developing paths towards airborne vehicle autonomy. *NASA Report*, 101 p. Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20210019878/downloads/NASA-CR-20210019878final.pdf> (accessed: 08.10.2024).

7. **Fujizawa, B., Tischler, M., Ott, C., Blanken, C.** (2014). UH-60 modernized control laws for improved handling qualities in the degraded visual environment. In: *Proceedings of the American Helicopter Society 70th Annual Forum*. DOI: 10.4050/F-0070-2014-9516 (accessed: 08.10.2024).

8. **Lusardi, J., Fujizawa, B., Morford, Z.** (2017). Flight testing of coupled collective toward reducing pilot workload during landing in DVE. In: *Proceedings of the American Helicopter Society International 73rd Annual Forum & Technology Display*. DOI: 10.4050/F-0073-2017-12068 (accessed: 08.10.2024).

9. **Young, S.** (2016). Aircrew labor in-cockpit automation system in ALIAS program results. *darpa.mil*. Available at: <https://www.darpa.mil/research/programs/aircrew-labor-in-cockpit-automation-system> (accessed: 08.10.2024).

10. **Tischler, M.B.** (2022). Flight control technology advancements and challenges for future rotorcraft 40th A.A. Nikolsky honorary lecture. *Journal of the American Helicopter Society*, vol. 67, ID: 041001, 39 p. Available at: [https://www.sjsu.edu/researchfoundation/docs/AHS\\_2022\\_Tischler.pdf](https://www.sjsu.edu/researchfoundation/docs/AHS_2022_Tischler.pdf) (accessed: 08.10.2024).

11. **Zammali, A., De Bonneval, A., Crouzet, Y., Izzo, P., Massimi, J.-M.** (2015). Communication integrity for future helicopters flight control systems. In: *2015 IEEE/AIAA 34th Digital Avionics Systems Conference (DASC)*. Czech Republic, Prague, pp. 1–20. DOI: 10.1109/DASC.2015.7311616

12. **Wen, P., Zou, Ch., Gao, Z., Sun, J.** (2021). Autonomous flight control based on neural networks and fuzzy decision. In: *Presented at the 32nd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences*. China, Shanghai, Pudong Shangri-La, September 6-10, 6 p. Available at: [https://www.icas.org/icas\\_archive/ICAS2020/data/papers/ICAS2020\\_0591\\_paper.pdf](https://www.icas.org/icas_archive/ICAS2020/data/papers/ICAS2020_0591_paper.pdf) (accessed: 08.10.2024).

13. **Takahashi, M.D., Whalley, M.S., Fletcher, J. et al.** (2014). Development and flight testing of a flight control law for autonomous operations research on the RASCAL JUH-60A. *Journal of the American Helicopter Society*, vol. 59, no. 3, pp. 1–13. DOI: 10.4050/JAHS.59.032007

14. **Whalley, M.S., Takahashi, M.D., Goerzen, C.L. et al.** (2014). Autonomous Black Hawk in flight: obstacle field navigation and landing-site selection on the RASCAL JUH-60A. *Journal of Field Robotics*, vol. 31, issue 4, pp. 591–616. DOI: 10.1002/rob.21511

15. **Takahashi, M.D., Goerzen, C.L., Schulein, G.J.** (2017). Autonomous rotorcraft flight control with multi-level pilot interaction in hover and forward flight. *Journal of the American Helicopter Society*, vol. 62, no. 3, pp. 1–13. DOI: 10.4050/JAHS.62.032009

## Сведения об авторах

**Мясников Максим Игоревич**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры проектирования вертолетов Московского авиационного института (национального исследовательского университета), [miasnikovmi@mail.ru](mailto:miasnikovmi@mail.ru).

**Ильин Игорь Римович**, главный специалист отдела координации и комплексного анализа НИР и НТЗ АО «Национальный центр вертолетостроения им. М.Л. Миля и Н.И. Камова», [i.ilin@nhcmk.ru](mailto:i.ilin@nhcmk.ru).

### Information about the authors

**Maxim I. Myasnikov**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Chair of Helicopter Design, Moscow Aviation Institute (National Research University), miasnikovmi@mail.ru.

**Igor R. Ilyin**, Chief Specialist of the Department for Coordination and Comprehensive Analysis of Scientific Research and Technological Development Projects, JSC National Helicopter Center Mil & Kamov, i.ilin@nhcmk.ru.

Поступила в редакцию	21.03.2025	Received	21.03.2025
Одобрена после рецензирования	07.04.2025	Approved after reviewing	07.04.2025
Принята в печать	24.07.2025	Accepted for publication	24.07.2025

ББК 05  
Н 34  
Св. план 2025

Научный Вестник МГТУ ГА  
Том 28, № 04, 2025  
Civil Aviation High TECHNOLOGIES  
Vol. 28, No. 04, 2025

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.

Оформить подписку на печатную версию журнала можно на сайте Объединенного каталога «Пресса России» [www.pressa-rf.ru](http://www.pressa-rf.ru). Подписной индекс 84254.

---

Подписано в печать 27.08.2025.

Печать цифровая

Формат 60×90/8

13,25 усл. печ. л.

Заказ № 2020 / 140

Тираж 50 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](mailto:artpress@mail.ru)

