

Том 29, № 04, 2026

ISSN 2079-0619

e-ISSN 2542-0119

Научный Вестник МГТУ ГА



Civil Aviation High TECHNOLOGIES

Vol. 29, No. 04, 2026

Издается с 1998 г.

Москва
2026

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 Российской Федерации, проф., д. ю. н., ректор МГТУ ГА, Москва, Россия.
- Зам. главного редактора:** *Воробьев В.В.*, заслуженный работник транспорта Российской Федерации, 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., проф. МГТУ ГА, Москва, Россия;

Желтов С.Ю., заслуженный деятель науки РФ, академик РАН, проф., 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., проф. 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, проф., 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, Хуан, Китай;

Франческа де Кресченцио, проф., 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 Sciences, 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 "Vypmel", 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, FSBIS, 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;

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

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. Krasovsky, 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.

E-mail: vestnik@mstuca.ru

Редакционный совет

Абрамов О.В., заслуженный деятель науки РФ, проф., д. т. н., Институт автоматизации 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;

Косьянчук В.В., проф., д. т. н., проф. РАН, заместитель генерального директора ГосНИИАС, Москва, Россия.

Красильщик И.С., проф., д. ф-м. н., проф. МНУ, 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., проф. 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., ведущий научный сотрудник 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., проф. 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;

Vladislav V. Kosyanchuk, Professor, Doctor of Sciences, Professor RAS, Deputy General Director of State Research Institute of Aviation Systems (GosNIIAS), Moscow, Russia;

Iosif S. Krasilschik, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Independent University, 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. Hodakovsky, Honored Worker of Science of Latvian Soviet Socialist Republic, Professor, Doctor of Sciences, Riga, Latvia;

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Коваленко Г.В., Ядров И.А.

Метод определения маршрута обхода воздушным судном динамически изменяющейся зоны грозовой деятельности 8

Kondratyeva M.A., Kuznetsov S.N., Fryazinov A.V.

A calculation methodology for the quantitative parameters of the aircraft operational cycle based on current regulatory standards 29

Подосенов С.С., Феоктистова О.Г.

Концепция автоматизированной системы управления поддержания летной годности с элементами искусственного интеллекта 46

Samoilenko V.M., Ravirov R.G., Opokin V.G., Petrov M.D.

Experimental study of the possibility of managing the concentration of the vapor flow during the applying of a thermal protective coating by the electron-beam method 63

Синьют В., Киселев М.А., Воробьев В.В., Бородин С.Ф.

Перспективы и проблемы применения беспилотных воздушных судов для обнаружения мест авиационных катастроф 73

Степаненко А.С., Сафонова А.В.

Регулирование региональных авиатранспортных систем как основа кластерного подхода 85

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Батраков А.С., Гарипова Л.И., Каучакова М.А.

Сравнительный анализ кинематических схем конвертоплана на базе URANS моделирования 102

Парников А.Е., Сизов А.В.

Научно-методический подход к формированию рационального парка беспилотных летательных аппаратов, предназначенных для решения заданного перечня задач 118

CONTENTS

TRANSPORTATION SYSTEMS

Kovalenko G.V., Yadrov I.A.

Method for determining an aircraft avoidance route around a dynamically changing thunderstorm activity area 8

Kondratyeva M.A., Kuznetsov S.N., Fryazinov A.V.

A calculation methodology for the quantitative parameters of the aircraft operational cycle based on current regulatory standards 29

Podosenov S.S., Feoktistova O.G.

The concept of an automated airworthiness management system with elements of artificial intelligence 46

Samoilenko V.M., Ravilov R.G., Opokin V.G., Petrov M.D.

Experimental study of the possibility of managing the concentration of the vapor flow during the applying of a thermal protective coating by the electron-beam method 63

Xinyu W., Kiselev M.A., Vorobyev V.V., Borodkin S.F.

Prospects and problems of using unmanned aircraft to locate aircraft accident sites 73

Stepanenko A.S., Saphonova A.V.

Regulation of regional air transport systems as the basis of the cluster approach 85

MECHANICAL ENGINEERING

Batrakov A.S., Garipova L.I., Kauchakova M.A.

Comparative analysis of the kinematic schemes of a tiltrotor based on URANS modeling 102

Parnenkov A.E., Sizov A.V.

Scientific-methodological approach to forming a rational fleet of unmanned aerial vehicles intended to solve a specified list of tasks 118

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 621.396.96

DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-8-28

Метод определения маршрута обхода воздушным судном динамически изменяющейся зоны грозовой деятельности

Г.В. Коваленко¹, И.А. Ядров¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А.А. Новикова, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: В статье представлен метод построения маршрута обхода динамически изменяющейся зоны грозовой деятельности, основанный на использовании взвешенного динамического графа с фиксированным множеством вершин и изменяющимся множеством ребер. Предложенный подход позволяет учитывать пространственно-временную изменчивость грозовых ячеек, а также способствует снижению вычислительной сложности задачи планирования и повышению безопасности маршрута обхода при наличии прогностической информации о развитии грозовых очагов в сверхкраткосрочном периоде. Также представлены результаты разработки алгоритма оптимизации маршрута на основе графа видимости, обеспечивающего сокращение длины маршрута без потери корректности обхода. Проведен статистический анализ, подтверждающий эффективность метода и сопоставимость его результатов с базовым подходом при меньших вычислительных затратах. Практическая значимость работы заключается в возможности интеграции разработанного метода в состав интеллектуальных систем поддержки принятия решений и автоматизированных систем планирования траектории полета при обходе опасных метеоявлений, что может способствовать повышению безопасности и экономичности полетов.

Ключевые слова: авиация, безопасность полетов, оптимизация, обход грозы, динамический граф, планирование маршрута, траекторное управление полетом.

Для цитирования: Коваленко Г.В., Ядров И.А. Метод определения маршрута обхода воздушным судном динамически изменяющейся зоны грозовой деятельности // Научный вестник МГТУ ГА. 2026. Т. 29, № 4. С. 8–28. DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-8-28

Method for determining an aircraft avoidance route around a dynamically changing thunderstorm activity area

G.V. Kovalenko¹, I.A. Yadrov¹

*¹ St. Petersburg State University of Civil Aviation
named after Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov, St. Petersburg, Russia*

Abstract: The paper presents a method for plotting an avoidance route around a dynamically changing thunderstorm area, based on the use of a weighted dynamic graph with a fixed set of nodes and a changing set of edges. The proposed approach allows for accounting for the spatiotemporal variability of thunderstorm cells and also contributes to reducing the computational complexity of the planning task and enhancing the safety of the avoidance route when predictive information on the development of thunderstorm

cells in the very short term is available. The results of developing a route optimization algorithm based on a visibility graph, which ensures a reduction in route length without loss of avoidance correctness, are also presented. A statistical analysis was conducted, confirming the method effectiveness and the comparability of its results with the baseline approach at lower computational costs. The practical significance of the work lies in the possibility of integrating the developed method into intelligent decision support systems and automated flight trajectory planning systems for circumventing hazardous weather phenomena, which can contribute to enhanced flight safety and efficiency.

Keywords: aviation, flight safety, optimization, thunderstorm avoidance, dynamic graph, route planning, flight trajectory management.

For citation: Kovalenko, G.V., Yadrov, I.A. (2026). Method for determining an aircraft avoidance route around a dynamically changing thunderstorm activity area. Civil Aviation High Technologies, vol. 29, no. 4, pp. 8–28. DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-8-28

Введение

Задача обеспечения безопасности полетов и повышения операционной эффективности гражданской авиации (ГА) в условиях неблагоприятных атмосферных явлений, особенно грозовой активности, является одной из ключевых в современной аэронавигации. Грозы представляют серьезную опасность для воздушных судов (ВС), а также являются одной из основных причин задержек отправок и прибытий ВС ГА [1].

Традиционно пилотам рекомендуется выполнять обход гроз на фиксированном безопасном расстоянии от границ интенсивных радиолокационных эхосигналов [2], однако результаты исследования [3] показывают, что эти правила являются слишком упрощенными и не учитывают возможность возникновения конвективно-индуцированной турбулентности за пределами зон визуально наблюдаемой конвекции. В связи с этим были разработаны статистические модели, такие как SWAM1 (модель обхода конвективной погоды, Convective weather avoidance model) и SWAM2 [2], позволяющие формировать трехмерные детерминированные и вероятностные карты обхода неблагоприятной погоды (Weather avoidance fields, WAF), которые отражают зоны, наиболее вероятно выбираемые пилотами для обхода. Тем не менее данные модели в большей степени ориентированы на статический анализ, чем на обеспечение возможности обхода грозового очага с учетом динамики его развития.

Сложность выбора маршрута обхода грозы заключается в ее динамической и стоха-

стической природе: грозовые ячейки могут интенсивно развиваться, разрушаться, объединяться или разделяться, при этом их перемещения сопровождаются случайной компонентой [4], наличие которой вызвано локальной турбулентностью, конвективными выбросами и мезомасштабными флуктуациями ветра, которые вносят труднопрогнозируемые отклонения траектории движения грозовых ячеек от детерминированного направления переноса. Для решения задачи нахождения оптимального маршрута обхода динамически изменяющихся препятствий в общем виде предлагались такие подходы, как улучшенный динамический алгоритм A* с временным окном (Improved dynamic A* algorithm combined with time window) [5], метод искусственного потенциального поля со скользящим окном (Artificial potential field method combined with rolling window) [6] и др.

Современные исследования в области оптимизации процесса выбора маршрута обхода грозы сосредоточены на разработке методов, учитывающих временную изменчивость и неопределенности грозовой активности; среди них можно выделить следующие.

1. Прогностические и вероятностные методы, заключающиеся в использовании сверхкраткосрочных прогнозов (наукастинга), которые позволяют строить маршруты обхода с заданным уровнем риска [4].

2. Метод динамической реоптимизации траекторий, заключающийся в почасовой корректировке маршрута в ходе полета ВС на основе обновляемых метеорологических данных [7].

3. Алгоритм планирования траектории полета в условиях движущихся препятствий

при заходе на посадку (Spatio-temporal dynamic window approach, SDWA), реализующий прогнозирование движения препятствий путем полиномиальной аппроксимации их положения во времени [8].

Несмотря на наличие указанных решений, до настоящего времени не предложено единого стратегического подхода, который бы одновременно учитывал динамику и неопределенность грозовой активности, а также обеспечивал высокий уровень безопасности и позволял минимизировать операционные затраты при планировании маршрутов. В связи с этим актуальной задачей является разработка методологии и алгоритмического обеспечения для построения оптимальных траекторий обхода гроз в соответствии с концепцией операций, основанных на траекториях (Trajectory-based operations, TBO) [9].

Предположим, что ВС выполняет полет в зоне грозовой деятельности и в непосредственной близости от расчетной траектории полета ВС находится множество изолированных грозовых очагов, причем для каждого момента времени t_i , $i = 1, \dots, N$ имеется прогноз множества грозовых очагов $\mathcal{T}^{(i)}$, каждый из которых имеет границу $T_k^{(i)} \in \mathcal{T}^{(i)}$ и соответствующую замкнутую область внутри этой границы $R_k^{(i)}$, которая может быть как выпуклой, так и невыпуклой.

В ходе выполнения полета из A в B должны соблюдаться ограничения:

1. ВС при обходе зоны грозовых очагов не должно заходить в область грозы:

$$[x_i, y_i]^T \notin R_k^{(i)}, \forall k \in \mathcal{T}^{(i)}, \forall i. \quad (4)$$

$$\text{dist}(T_k^{(i)}, T_m^{(i)}) \geq d_{\text{gap}}, \forall k, m \in \mathcal{T}^{(i)}, k \neq m, \forall i. \quad (6)$$

В соответствии с утратившим силу приказом «Об утверждении Федеральных авиационных правил полетов в воздушном пространстве Российской Федерации» № 136/42/51¹, указанные минимально допустимые значения устанавливались равными $d_{\text{min}} = 15$ км и $d_{\text{gap}} = 50$ км.

Представим траекторию ВС в промежутке времени $t \in [0, T]$ как функцию от времени t :

$$s(t) = [x(t), y(t)]^T, t \in [0, T]. \quad (1)$$

Пусть ВС выполняет полет из точки $s(0) = A$ в точку $s(T) = B$. Тогда задачу минимизации пути, пройденного из A в B , можно представить как

$$L = \int_0^T \left\| \frac{ds}{dt} \right\| dt \rightarrow \min. \quad (2)$$

Произведя дискретизацию по t на N достаточно небольших отрезков, перейдем к множеству точек $\{[x_i, y_i]^T\}_1^N = \{[x_1, y_1]^T, [x_2, y_2]^T, \dots, [x_N, y_N]^T\}$, задающих маршрут полета ВС; при этом длина пути, пройденного из A в B , может быть рассчитана как

$$L = \sum_{i=1}^{N-1} d_{i,i+1} = \|[x_{i+1}, y_{i+1}]^T - [x_i, y_i]^T\|. \quad (3)$$

2. Кратчайшее расстояние от границы любого грозового участка $T_k^{(i)}$ до маршрута обхода $\text{dist}([x_i, y_i]^T, T_k^{(i)})$ в каждой его точке i не должно быть меньше минимально допустимого значения d_{min} :

$$\text{dist}([x_i, y_i]^T, T_k^{(i)}) \geq d_{\text{min}}, \forall k \in \mathcal{T}^{(i)}, \forall i. \quad (5)$$

3. Кратчайшее расстояние между границами двух любых грозовых участков $T_k^{(i)}$ и $T_m^{(i)}$ для пролета между ними не должно быть меньше минимально допустимого значения d_{gap} (как правило, $d_{\text{gap}} > 2d_{\text{min}}$):

¹ Приказ Минобороны РФ, Минтранса РФ и Росавиакосмоса от 31 марта 2002 года № 136/42/51 «Об утверждении Федеральных авиационных правил полетов в воздушном пространстве Российской Федерации». Отменен с 1 января 2021 года на основании постановления Правительства РФ от 26 октября 2020 года № 1742 [Электронный ресурс] // ГАРАНТ. URL: <https://base.garant.ru/184736/> (дата обращения: 10.10.2025).

Таким образом, рассматриваемая задача условной оптимизации может быть сформулирована следующим образом:

$$\sum_{i=1}^{N-1} \| [x_{i+1}, y_{i+1}]^T - [x_i, y_i]^T \| \rightarrow \min; \quad (7)$$

$$[x_1, y_1]^T = A, [x_N, y_N]^T = B; \quad (8)$$

$$[x_i, y_i]^T \notin R_k^{(i)}, \forall k \in \mathcal{T}^{(i)}, \forall i; \quad (9)$$

$$\text{dist}([x_i, y_i]^T, T_k^{(i)}) \geq d_{\min}, \forall k \in \mathcal{T}^{(i)}, \forall i; \quad (10)$$

$$\text{dist}(T_k^{(i)}, T_m^{(i)}) \geq d_{\text{gap}}, \forall k, m \in \mathcal{T}^{(i)}, k \neq m, \forall i. \quad (11)$$

В работе [10] предложен метод определения маршрута обхода воздушным судном грозы с помощью нахождения кратчайшего пути на графе для случая неподвижных грозовых очагов, заключающийся в следующем.

1. На этапе подготовки данных производится фильтрация радиолокационных изображений, позволяющая избавиться от случайных помех, а также от облаков, не являющихся грозовыми и не относящихся к зонам сильных осадков; также осуществляется преобразование отфильтрованных растровых изображений в массив векторных объектов – полигонов $\{P_k\}_{k=1}^K$ [11], каждый из которых соответствует определенному изолированному грозовому очагу $T_k \in \mathcal{T}$ (в случае неподвижных грозовых очагов каждому моменту времени t_i соответствует одно и то же множество $\mathcal{T}$).

2. На этапе агрегации данных реализуется механизм разделения полигонов P_k на группы $\mathcal{G}_l$ таким образом, чтобы в рамках одной группы расстояние между любыми двумя соседними полигонами не превышало значение d_{gap} : таким образом, группа представляет собой множество полигонов, пролет между которыми недопустим (рис. 1, а и 1, б).

3. Далее вокруг каждого из полигонов P_k строится буферная зона $B_k^{\min}$ с радиусом, равным минимально допустимому расстоянию до границы грозового очага $d_{\min}$, после чего для каждой группы $\mathcal{G}_l$ вокруг буферных зон входящих в нее полигонов строится минимальная вогнутая оболочка (Concave Hull)

H_l [12], объединяющая все полигоны внутри группы в единую геометрию (рис. 1, в).

4. Реализованная таким образом агрегация позволяет перейти к задаче оптимизации с двумя условиями: 1) маршрут обхода должен начинаться в заданной точке A и заканчиваться в заданной точке B , лежащих за пределами оболочек; 2) ни один из участков маршрута между любыми двумя последовательными поворотными пунктами не должен пересекать границы оболочек.

5. На финальном этапе оболочки упрощаются – для этого применяется алгоритм Дугласа – Пекера [13], рекурсивно удаляющий точки, задающие границы оболочки, минимально влияя на ее форму и сохраняя ее общую структуру практически неизменной. В результате каждая из оболочек H_l представляется в виде аппроксимирующего ее границы множества точек $\mathcal{H}_l$, которые используются при инициализации графа $G(V^{\text{hull}}, E^{\text{hull}})$ в качестве множества вершин V^{hull} . Далее реализуется валидация ребер графа E^{hull} – для каждой пары вершин $V_p^{\text{hull}}, V_q^{\text{hull}}$ проверяется, пересекает ли соединяющее их ребро E_{pq}^{hull} хотя бы одну из оболочек, и если нет, то соответствующее ребро считается валидным и добавляется в граф.

6. Оптимальный маршрут определяется с помощью алгоритма Дейкстры [14] как кратчайший путь из A в B на полученном взвешенном графе, при этом в качестве весов используются расстояния между соответствующими вершинами (рис. 1, г).

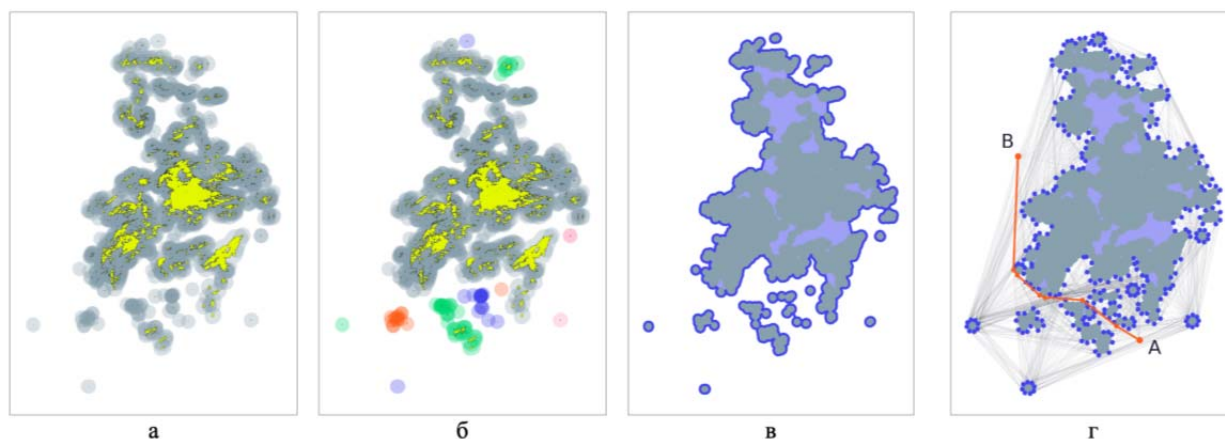


Рис. 1. Определение маршрута обхода неподвижной грозы: а – буферные зоны B_k^{gap} с отступом $d_{\text{gap}}/2$, построенные для каждого полигона; б – объединение попарно пересекающихся буферных зон в группы G_l ; в – вогнутые оболочки, построенные вокруг полученных групп для буферных зон B_k^{min} ; г – вершины графа для вогнутых оболочек и кратчайший путь из А в В на графе

Fig. 1. Determination of the stationary thunderstorm avoidance route: а – buffer zones B_k^{gap} with an offset of $d_{\text{gap}}/2$, constructed for each polygon; б – grouping of pairwise intersecting buffer zones into sets G_l ; в – concave hulls constructed around the resulting groups for the buffer zones B_k^{min} ; г – graph nodes for the concave hulls and the shortest path from A to B on the graph

В настоящей работе предлагается метод определения маршрута обхода ВС не неподвижной во времени, но динамически изменяющейся зоны грозовой деятельности, во многом основанный на описанном способе [10] и представляющий собой его обобщение для случая подвижных грозовых очагов.

Методы

Разработка и апробация предлагаемого метода определения оптимального маршрута обхода, а также предшествующие этапы получения и обработки данных о расположении грозовых очагов и построение самого графа осуществлялись с использованием языка объектно ориентированного программирования Python и библиотек: NumPy с поддержкой операций над многоуровневыми массивами, GeoPandas и Shapely для обработки геопространственных данных, а также NetworkX, предоставляющей инструменты для работы с графами и прочими сетевыми структурами. Созданный авторами в рамках исследования код находится в открытом доступе².

² Код для предобработки и визуализации растровых изображений [Электронный ресурс] // github.com.

Для разработки и тестирования алгоритма использовались данные³ радиолокационных метеорологических наблюдений за грозовыми очагами и сильными ливневыми осадками Финского метеорологического института (Finnish Meteorological Institute, FMI). Подробно порядок получения и предобработки данных описан в [10].

Наиболее прямолинейный подход (алгоритм 1) к обобщению метода обхода статичной грозы из [10] для случая динамически изменяющихся грозовых очагов заключается в том, чтобы в каждый момент времени t_i для заданного размера окна w рассмотреть множество грозовых очагов $\mathcal{T}^{(i:i+w)} = \{\mathcal{T}^{(i)}, \mathcal{T}^{(i+1)}, \dots, \mathcal{T}^{(i+w)}\}$ как единое и неподвижное и применить к нему метод обхода статичной грозы.

Алгоритм 1. Базовый метод определения маршрута обхода воздушным судном динамически изменяющейся зоны грозовой деятельности

URL: <https://github.com/yaaadrov/WxRADNet-PyTorch> (дата обращения: 10.10.2025).

³ Схема данных [Электронный ресурс] // XML-фал. URL: <http://s3-eu-west-1.amazonaws.com/fmi-opendata-radar-geotiff> (дата обращения: 10.10.2025).

Требования: начальное положение ВС $[x_A, y_A]^T$; значения минимальных расстояний $d_{\min}$ и d_{gap} ; размер окна w ; прогноз множества грозовых очагов $\{\mathcal{T}^{(i)}\}_{i=1}^N$ для каждого требуемого момента времени t_i ; шаг дискретизации времени Δt ; скорость полета ВС V ; точка окончания маршрута обхода $[x_B, y_B]^T$.

1. Обозначить текущее положение $[x_{\text{cur}}, y_{\text{cur}}]^T \leftarrow [x_A, y_A]^T, i \leftarrow 1$.

2. Инициализировать множество поворотных пунктов $\mathcal{P} = \{[x_A, y_A]^T\}$, задающих маршрут обхода грозы.

3. Пока $[x_{\text{cur}}, y_{\text{cur}}]^T \neq [x_B, y_B]^T$:

4. Сформировать текущее временное окно $\mathcal{T}_{\text{cur}} = \mathcal{T}^{(i:i+w)}$.

5. Применить алгоритм из [10] для получения из $\mathcal{T}_{\text{cur}}$ графа $G_{\text{cur}}(V_{\text{cur}}^{\text{hull}}, E_{\text{cur}}^{\text{hull}})$.

6. С помощью алгоритма Дейкстры найти множество точек $\mathcal{P}_{\text{cur}} = \{[x_{\text{cur}}, y_{\text{cur}}]^T, \dots, [x_B, y_B]^T\}$, задающих кратчайший маршрут из $[x_{\text{cur}}, y_{\text{cur}}]^T$ в $[x_B, y_B]^T$ на взвешенном графе $G_{\text{cur}}(V_{\text{cur}}^{\text{hull}}, E_{\text{cur}}^{\text{hull}})$.

7. Ограничить полученный маршрут длиной $L = V \cdot \Delta t$ (либо конечной точкой маршрута $[x_B, y_B]^T$) и получить соответствующее подмножество поворотных пунктов $\mathcal{P}_{\text{cur}}^L$.

8. Получить новые координаты $[x_{\text{new}}, y_{\text{new}}]^T$ как конечную точку полученного отрезка маршрута $\mathcal{P}_{\text{cur}}^L$.

9. Обновить переменные: $[x_{\text{cur}}, y_{\text{cur}}]^T \leftarrow [x_{\text{new}}, y_{\text{new}}]^T, \mathcal{P} \leftarrow \mathcal{P} \cup \mathcal{P}_{\text{cur}}^L, i \leftarrow i + 1$.

10. Вернуть множество поворотных пунктов $\mathcal{P}$, задающих маршрут обхода воздушным судном динамически изменяющейся зоны грозовой деятельности.

Главным недостатком такого подхода является необходимость на каждом шаге i заново выполнять операции по созданию графа $G_{\text{cur}}(V_{\text{cur}}^{\text{hull}}, E_{\text{cur}}^{\text{hull}})$, включая валидацию ребер графа, – это вычислительно сложный процесс со сложностью $\mathcal{O}(|V_{\text{cur}}^{\text{hull}}|^2)$, требующий для каждой пары вершин $V_p^{\text{hull}}, V_q^{\text{hull}}$ проверить, пересекает ли соединяющее их ребро E_{pq}^{hull} хотя бы одну из оболочек.

Один из возможных подходов к решению задачи определения маршрута обхода воз-

душным судном динамически изменяющейся зоны грозовой деятельности заключается в нахождении кратчайшего пути на динамическом (временном) графе (dynamic graph) [15] – таком, у которого для каждого момента времени $t_i, i \in \mathbb{Z}$ множество вершин V фиксировано, а множество ребер меняется во времени, то есть каждому t_i соответствует свой набор $E^{(i)}$. В простейшем случае для нахождения кратчайшего пути на таком графе со скользящим окном размера w для каждого момента t_i строится агрегированный граф $G^{(i)}(V, E(i, w))$, после чего запускается классический алгоритм Дейкстры или его оптимизированный аналог [16].

В рассмотренном алгоритме 1 в каждый новый момент t_i окно, пробегающее по всем множествам грозовых очагов $\{\mathcal{T}^{(i)}\}_{i=1}^N$, сдвигается на единицу вперед, в результате текущая радиолокационная картина $\mathcal{T}_{\text{cur}} = \mathcal{T}^{(i:i+w)}$ изменяется – очередному t_i будет соответствовать свой набор вершин $V_{\text{cur}}^{\text{hull}}$, полученных в результате упрощения границ оболочек, из-за чего использование построенного на предыдущем шаге графа становится невозможным.

Для получения динамического графа авторами предлагается использовать подход (алгоритм 2), включающий следующие основные этапы.

1. Шаги 1–5: создание множества вершин $\mathcal{V}$ как точек, полученных после упрощения границ вогнутых оболочек для всех доступных моментов времени t_i .

2. Шаг 6: кластеризация с целью замены исходных вершин $\mathcal{V}$ на центроиды кластеров $\mathcal{C} = \{c_j\}_{j=1}^C$ таким образом, чтобы полученный в результате динамический граф не был перегружен слишком плотными облаками вершин (рис. 2, а).

3. Шаги 7–9: учет большого числа грозовых очагов (множества $\{\mathcal{T}^{(i)}\}_{i=1}^N$ для каждого требуемого момента времени t_i) приводит к тому, что даже после кластеризации число вершин оказывается заметно больше, чем в случае статичной картины из единственного множества грозовых очагов $\mathcal{T}$, – из-за этого процедура валидации ребер становится

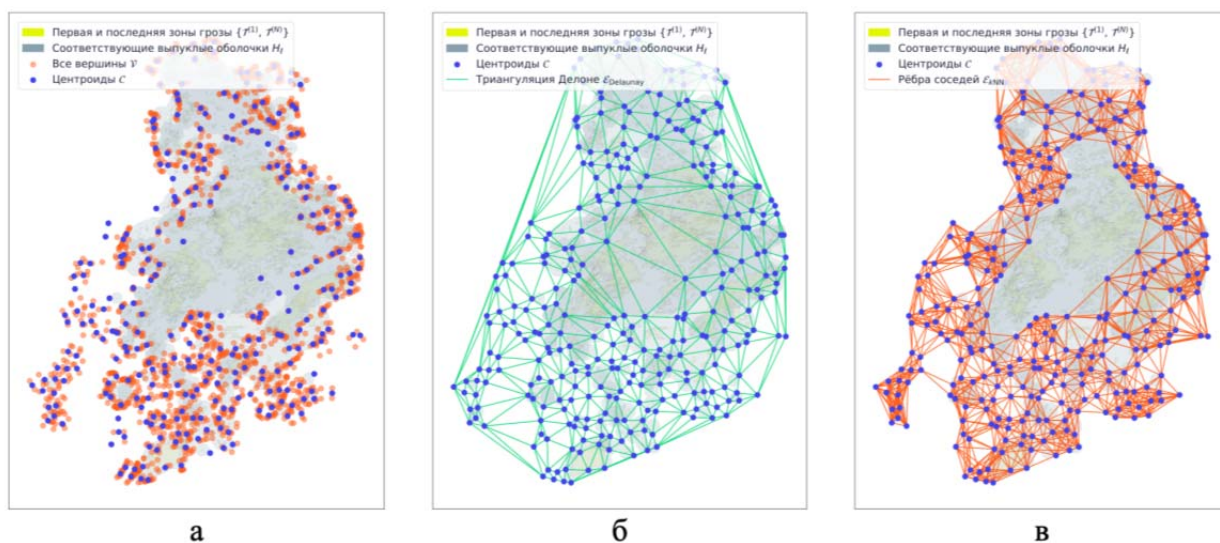


Рис. 2. Создание динамического графа⁴: а – множества вершин V и центроидов C ; б – триангуляция Делоне (до валидации ребер); в – ребра, соединяющие k ближайших соседей (до валидации ребер)

Fig. 2. Dynamic graph construction⁴: а – sets of nodes V and centroids C ; б – Delaunay triangulation (prior to edge validation); в – edges connecting the k nearest neighbours (prior to edge validation)

слишком ресурсоемкой. По этой причине предлагается проверять не все возможные ребра, а некоторое множество ребер-кандидатов $\mathcal{E}_{\text{cand}}$, полученное как объединение:

3.1. Триангуляции Делоне $\mathcal{E}_{\text{Delaunay}}$ [17] – триангуляции множества центроидов C , в ко-

торой для любой треугольной ячейки окружность, описанная вокруг треугольника, не содержит в своей внутренней никаких других точек из C (позволяет обеспечить наличие связей между дальними вершинами (рис. 2, б)):

$$\mathcal{E}_{\text{Delaunay}} = \bigcup_{\Delta \in \text{Triangulation}(C)} \{(p, q) \mid c_p, c_q \in \Delta\}. \quad (12)$$

3.2. Множества ребер, соединяющих каждую вершину с k ее ближайшими соседями (k -nearest neighbors, k NN) [18] (позволяют обеспечить наличие связей между ближайшими вершинами (рис. 2, в)):

$$\mathcal{E}_{k\text{NN}} = \{(p, q) \mid c_q \in \operatorname{argmin}_{c_j \in C, c_j \neq c_p}^k \operatorname{dist}(c_p, c_j)\}. \quad (13)$$

4. Шаги 10–14: для каждого момента времени для каждого ребра-кандидата из $\mathcal{E}_{\text{cand}}$ проверяется, пересекает ли оно хотя бы одну из

вогнутых оболочек текущей радиолокационной картины $\mathcal{T}^{(i)}$, и, если нет, ребро добавляется в соответствующее множество $\mathcal{E}^{(i)}$.

5. Шаг 15: получен взвешенный динамический граф с фиксированным множеством вершин C и уникальными для каждого момента времени t_i наборами ребер $\{\mathcal{E}^{(i)}\}_{i=1}^N$.

Алгоритм 2. Метод создания динамического графа

Требования: прогноз множества грозных очагов $\{\mathcal{T}^{(i)}\}_{i=1}^N$ для каждого требуемого мо-

⁴ Упрощенно: на данном рисунке и далее в качестве коэффициента допустимого отклонения при упрощении границ оболочек и создании кластеров использовалось значение 30 000 (30 км), в то время как при практической реализации предлагаемого метода для достижения лучших результатов авторами рекомендуется использовать значение 5 000 (5 км), что приведет к увеличению числа всех вершин в примерно 3 раза (по сравнению с картиной, изображенной на рисунке), а числа центроидов – примерно в 10 раз.

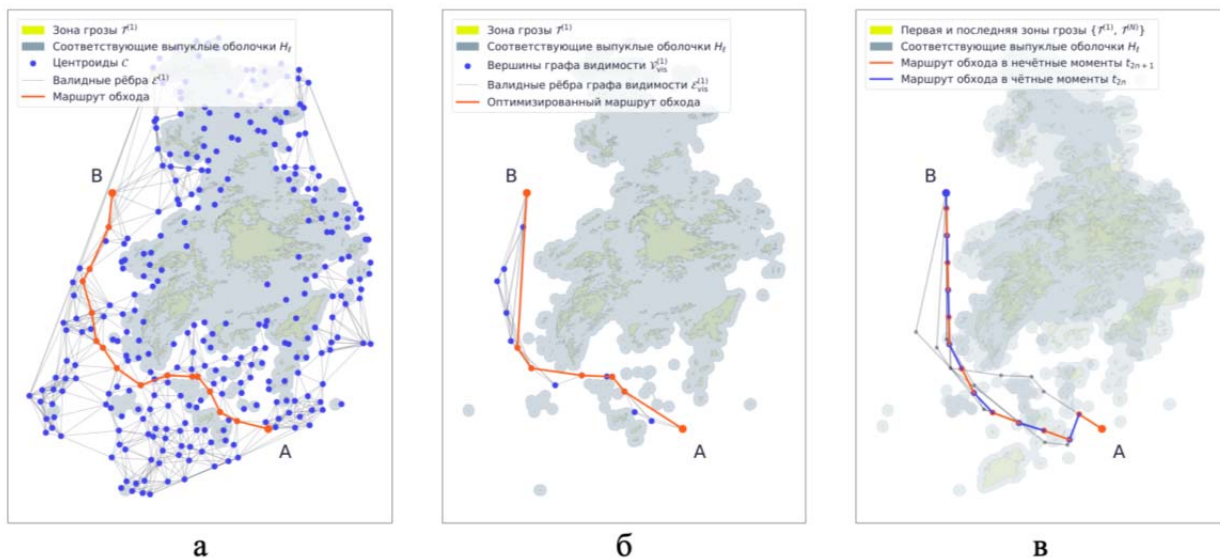


Рис. 3. Нахождение маршрута обхода на динамическом графе: *а* – кратчайший путь из *A* в *B* на $G^{(1)}(\mathcal{C}, \mathcal{E}^{(1)})$; *б* – оптимизация маршрута обхода за счет построения дополнительного графа видимости; *в* – финальный маршрут обхода как совокупность отрезков длины $L = V \cdot \Delta t$ для каждого t_i
Fig. 3. Finding an avoidance route on a dynamic graph: *a* – the shortest path from *A* to *B* on $G^{(1)}(\mathcal{C}, \mathcal{E}^{(1)})$; *б* – route optimization by constructing an additional visibility graph; *в* – the final avoidance route as a sequence of segments of length $L = V \cdot \Delta t$ for each t_i

мента времени t_i ; параметр кластеризации d_{clust} (в работе принят равным 5 км); число k ближайших соседей для определения ребер-кандидатов (в работе принято равным 10).

1. Инициализировать пустое множество вершин $\mathcal{V} = \{\}$.

2. Для каждого множества грозовых очагов $\mathcal{T}^{(i)}$ из $\{\mathcal{T}^{(i)}\}_{i=1}^N$:

3. Для каждой вогнутой оболочки H_l , соответствующей текущей радиолокационной картине $\mathcal{T}^{(i)}$ в момент t_i :

4. Упростить границы H_l с помощью алгоритма Дугласа – Пекера и представить оболочку в виде множества точек $\mathcal{H}_l$.

5. Обновить множество вершин $\mathcal{V} \leftarrow \mathcal{V} \cup \mathcal{H}_l$.

6. Разделить полученное множество вершин $\mathcal{V}$ на кластеры с параметром кластеризации d_{clust} (кластер может включать от 1 вершины) и получить множество центроидов этих кластеров $\mathcal{C} = \{c_j\}_{j=1}^{\mathcal{C}}$.

7. Для множества точек $\mathcal{C}$ построить триангуляцию Делоне – получить множество ребер-кандидатов $\mathcal{E}_{\text{Delaunay}}$.

8. Для каждой вершины из $\mathcal{C}$ найти k ее ближайших соседей по евклидову расстоя-

нию – получить множество ребер-кандидатов $\mathcal{E}_{k\text{NN}}$.

9. Получить объединение ребер-кандидатов $\mathcal{E}_{\text{cand}} = \mathcal{E}_{\text{Delaunay}} \cup \mathcal{E}_{k\text{NN}}$.

10. Произвести валидацию ребер. Для каждого момента времени t_i :

11. Инициализировать пустое множество валидных ребер $\mathcal{E}^{(i)} = \{\}$.

12. Для каждого ребра-кандидата $E_{pq} = (p, q)$ из $\mathcal{E}_{\text{cand}}$:

13. Проверить, пересекает ли E_{pq} хотя бы одну из оболочек H_l текущей радиолокационной картины $\mathcal{T}^{(i)}$.

14. Если не пересекает, то добавить его в множество валидных ребер с весом $\text{dist}(c_p, c_q)$: $\mathcal{E}^{(i)} \leftarrow \mathcal{E}^{(i)} \cup \{E_{pq}\}$.

15. Вернуть взвешенный динамический граф $G^{(i)}(\mathcal{C}, \mathcal{E}^{(i)})$.

На рис. 3, *а* показан маршрут обхода зоны грозы $\mathcal{T}^{(1)}$, полученный для динамического графа $G^{(1)}(\mathcal{C}, \mathcal{E}^{(1)})$: он представлен в виде ломаной с большим количеством звеньев, что объясняется использованием заметно большего по сравнению со статичным случаем (рис. 1, *з*) числа вершин, а также примени-

ем триангуляции Делоне для упрощения процедуры валидации ребер.

Полученный маршрут может быть оптимизирован, для этого предлагается: 1) построить небольшой граф видимости $G_{\text{vis}}^{(1)}(\mathcal{V}_{\text{vis}}^{(1)}, \mathcal{E}_{\text{vis}}^{(1)})$, вершины которого – путь из A в B на $G^{(1)}(\mathcal{C}, \mathcal{E}^{(1)})$; 2) провалидировать его ребра; 3) получить оптимизированный маршрут для текущего временного окна как кратчайший маршрут из A в B (рис. 3, б). Финальный маршрут обхода динамически изменяющейся зоны грозовой деятельности, таким образом, может быть получен как совокупность отрезков длины $L = V \cdot \Delta t$, взятых от оптимизированных маршрутов обхода для каждого момента t_i (рис. 3, в, алгоритм 3).

Алгоритм 3. Метод определения маршрута обхода воздушным судном динамически изменяющейся зоны грозовой деятельности

Требования: начальное положение ВС $[x_A, y_A]^T$; значения минимальных расстояний $d_{\min}$ и d_{gap} ; размер окна w ; прогноз множества грозовых очагов $\{\mathcal{T}^{(i)}\}_{i=1}^N$ для каждого требуемого момента времени t_i ; шаг дискретизации времени Δt ; скорость полета ВС V ; точка окончания маршрута обхода $[x_B, y_B]^T$; параметр кластеризации d_{clust} ; число k ближайших соседей для определения ребер-кандидатов.

1. Обозначить текущее положение $[x_{\text{cur}}, y_{\text{cur}}]^T \leftarrow [x_A, y_A]^T, i \leftarrow 1$.

2. Инициализировать множество поворотных пунктов $\mathcal{P} = \{[x_A, y_A]^T\}$, задающих маршрут обхода грозы.

3. Применить алгоритм 2 для получения взвешенного динамического графа $G^{(i)}(\mathcal{C}, \mathcal{E}^{(i)})$.

4. Пока $[x_{\text{cur}}, y_{\text{cur}}]^T \neq [x_B, y_B]^T$:

5. Сформировать текущее временное окно $\mathcal{T}_{\text{cur}} = \mathcal{T}^{(i:i+w)}$.

6. Получить граф для текущего временного окна $G_{\text{cur}} = G^{(i)}(\mathcal{C}, \mathcal{E}^{(i:i+w)}) = G^{(i)}(\mathcal{C}, \cap_{i=i+w}^{i+w} \mathcal{E}^{(i)})$, множество ребер которого представляет собой пересечение множеств $\mathcal{E}^{(i)}$ для $i \in [i, i+w]$.

7. С помощью алгоритма Дейкстры найти множество точек $\mathcal{V}_{\text{vis}}^{(i)} = \{[x_{\text{cur}}, y_{\text{cur}}]^T, \dots, [x_B, y_B]^T\}$, задающих кратчайший маршрут из $[x_{\text{cur}}, y_{\text{cur}}]^T$ в $[x_B, y_B]^T$ на взвешенном графе G_{cur} .

8. Построить граф видимости $G_{\text{vis}}(\mathcal{V}_{\text{vis}}^{(i)}, \mathcal{E}_{\text{vis}}^{(i)})$, где $\mathcal{E}_{\text{vis}}^{(i)} = \{(p, q) \mid p, q \in \mathcal{V}_{\text{vis}}^{(i)}, p \neq q\} \cap \mathcal{E}^{(i:i+w)}$ представляет собой пересечение множества всех возможных ребер для вершин $\mathcal{V}_{\text{vis}}^{(i)}$ и множества всех валидных для текущего окна ребер $\mathcal{E}^{(i:i+w)} = \cap_{i=i+w}^{i+w} \mathcal{E}^{(i)}$.

9. С помощью алгоритма Дейкстры найти оптимизированный маршрут обхода для текущего временного окна как множество точек $\mathcal{P}_{\text{cur}} = \{[x_{\text{cur}}, y_{\text{cur}}]^T, \dots, [x_B, y_B]^T\}$, задающих кратчайший маршрут из $[x_{\text{cur}}, y_{\text{cur}}]^T$ в $[x_B, y_B]^T$ на взвешенном графе $G_{\text{vis}}(\mathcal{V}_{\text{vis}}^{(i)}, \mathcal{E}_{\text{vis}}^{(i)})$.

10. Ограничить полученный маршрут $\mathcal{P}_{\text{cur}}$ длиной $L = V \cdot \Delta t$ (либо конечной точкой маршрута $[x_B, y_B]^T$) и получить соответствующее подмножество поворотных пунктов $\mathcal{P}_{\text{cur}}^L$.

11. Получить новые координаты $[x_{\text{new}}, y_{\text{new}}]^T$ как конечную точку полученного отрезка маршрута $\mathcal{P}_{\text{cur}}^L$.

12. Обновить переменные: $[x_{\text{cur}}, y_{\text{cur}}]^T \leftarrow [x_{\text{new}}, y_{\text{new}}]^T, \mathcal{P} \leftarrow \mathcal{P} \cup \mathcal{P}_{\text{cur}}^L, i \leftarrow i + 1$.

13. Вернуть множество поворотных пунктов $\mathcal{P}$, задающих маршрут обхода воздушным судном динамически изменяющейся зоны грозовой деятельности.

Маршрут обхода считается успешным в том случае, если в каждый момент t_i начальное положение ВС $[x_{\text{cur}}, y_{\text{cur}}]^T$ находится за пределами вогнутых оболочек для текущего временного окна. Если же конечная точка отрезка для t_{i-1} оказывается внутри вогнутых оболочек для $\mathcal{T}^{(i:i+w)}$, в качестве нового начального положения выбирается ближайшая доступная к $[x_{\text{cur}}, y_{\text{cur}}]^T$ вершина динамического графа, но маршрут считается неуспешным.

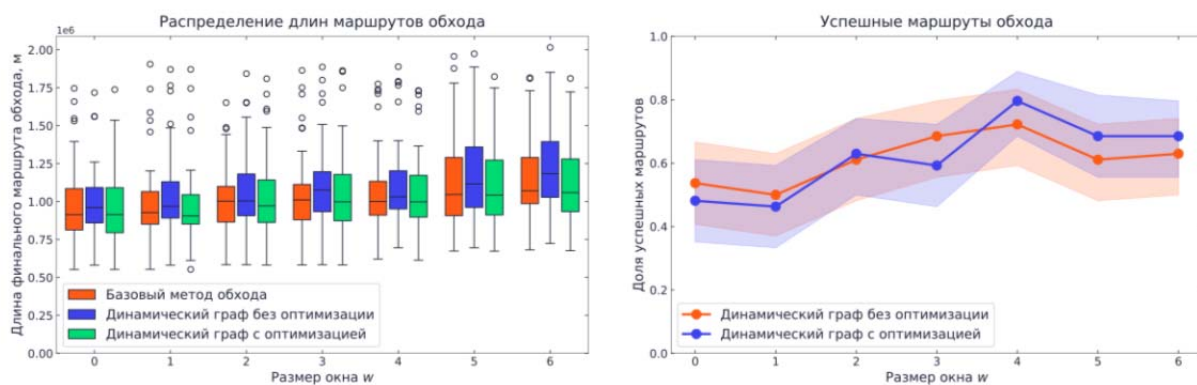


Рис. 4. Распределение длин маршрутов (слева) и доля успешных маршрутов обхода (справа)
Fig. 4. Route length distribution (left) and proportion of successful avoidance routes (right)

Результаты

Предлагаемые в работе методы: 1) базовый (алгоритм 1); 2) основанный на построении динамического графа; а также 3) его оптимизация (алгоритм 3) – были применены для нахождения маршрутов обхода 27 реальных грозовых конфигураций, отобранных на этапе получения данных [10], для размеров окна w от 0 (в каждый момент t_i маршрут обхода строится на основе исключительно текущей радиолокационной картины $\mathcal{T}^{(i)}$ без учета прогноза) до 6. Начальные и конечные точки A и B определялись авторами с учетом динамики развития грозовых очагов таким образом, чтобы точки находились в непосредственной близости от грозы, максимально усложняя задачу нахождения оптимального маршрута обхода; при этом строились не только маршруты из A в B , но и из B в A – всего, таким образом, для каждого метода и окна $w = 0, \dots, 6$ было получено 54 маршрута обхода.

На рис. 4 слева показано распределение длин маршрутов для каждого из методов в зависимости от размера временного окна w ; на рис. 4 справа показан линейный график доли успешных маршрутов в зависимости от размера окна w для обоих методов, основанных на построении динамического графа, с доверительным интервалом 0,95.

Как следует из рис. 4, для всех рассмотренных случаев медианное значение длины

маршрута для метода, основанного на построении динамического графа с оптимизацией, оказалось меньше, чем для других методов. Наибольший процент успешных маршрутов составляет 79,6 % и наблюдается для метода с динамическим графом и дополнительной оптимизацией (напомним, что успешным называется такой маршрут, для которого каждая финальная точка отрезка для момента t_{i-1} находится вне зон выпуклых оболочек, соответствующих окну $\mathcal{T}^{(i:i+w)}$). В случае если при определении маршрута обхода предсказания развития грозы вовсе не используются ($w = 0$), процент успешных маршрутов составляет порядка 50 %.

Как правило, осуществление оптимизации (пункты 8–9 алгоритма 3) направлено на сглаживание зигзагов, образованных по причине использования при построении динамического графа (алгоритм 2) не всех возможных ребер, но отобранного подмножества ребер-кандидатов $\mathcal{E}_{\text{cand}}$, однако в некоторых случаях влияние оптимизации на маршрут обхода может быть куда более ощутимым. Так, на рис. 5, а видно, что первоначально как маршрут без оптимизации, так и маршрут с оптимизацией были проложены между двумя грозовыми очагами, однако в случае с методом без оптимизации ВС подошло к точке разделения очагов слишком поздно, когда вогнутые оболочки соответствующих очагов уже слились, делая пролет между ними невозможным. В результате ВС пришлось до-

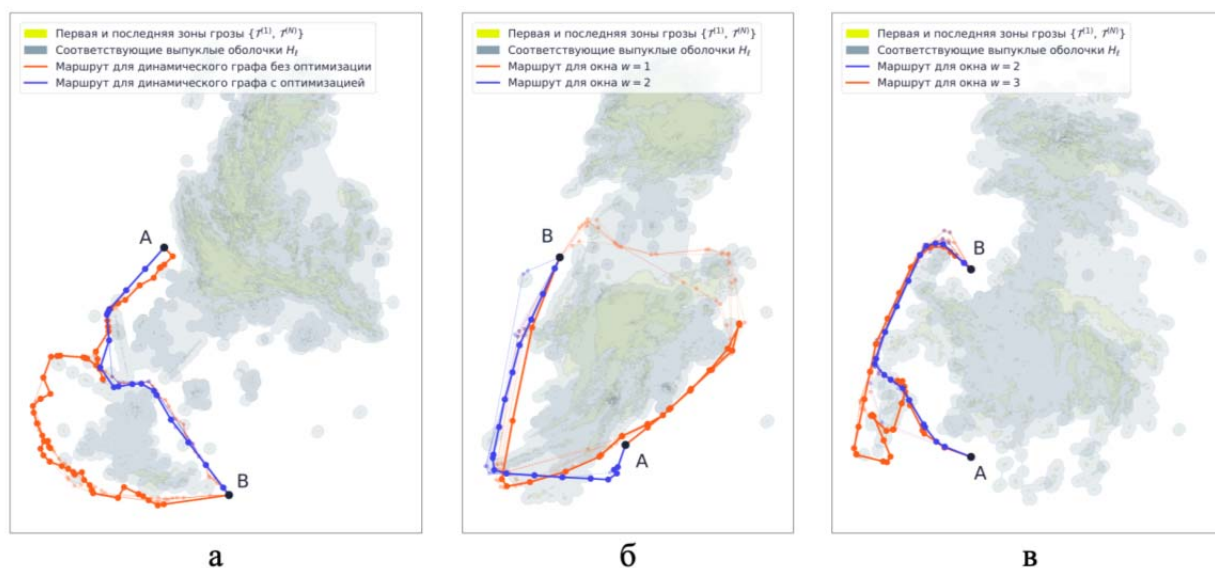


Рис. 5. Примеры маршрутов обхода: *а* – оптимизация позволяет значительно сократить маршрут обхода; *б* – отсутствие учета прогноза развития грозы может привести к попытке обойти очаг с подветренной стороны; *в* – увеличение размера окна, как правило, приводит к увеличению длины маршрута обхода
Fig. 5. Examples of avoidance routes: *a* – optimization allows for a significant reduction of the avoidance route length; *б* – failure to account for the thunderstorm development forecast may lead to an attempt to avoid the cell from the leeward side; *в* – increasing the window size generally leads to an increase in the avoidance route length

полнительно обойти очаг с юго-запада, что привело к увеличению маршрута обхода на 74 % (655,7 км) по сравнению с маршрутом, полученным методом с применением оптимизации.

Из рис. 4 видно, что увеличение размера окна, как правило, влечет за собой увеличение длины маршрута; рис. 5, *в* позволяет проиллюстрировать эту тенденцию: из-за использования увеличенного размера окна вогнутые оболочки двух грозовых очагов сливаются слишком рано, из-за чего пропадает возможность пролететь между ними. В приведенном примере использование окна $w = 2$ по сравнению с $w = 1$ привело к увеличению длины маршрута обхода (полученного методом, основанным на использовании динамического графа с оптимизацией) на 73,3 % (629,7 км).

Однако еще большее увеличение длины маршрута обхода можно получить, если вообще не учитывать прогноз развития грозы и выполнять обход с $w = 0$: так, на рис. 5, *б* видно, что в какой-то момент осуществление обхода грозы с подветренной стороны (маршрут показан оранжевым) становится

невозможным, из-за чего ВС вынуждено вернуться в начальную точку *A* и произвести обход с подветренной стороны, как и было реализовано изначально в случае для маршрута со значением $w = 1$ (показан синим). Таким образом, в рассматриваемом случае учет прогноза развития грозы позволил сократить длину маршрута обхода на 32,6 % (493,5 км).

Для определения влияния выбора метода обхода и размера окна на итоговую длину маршрута был проведен двухфакторный дисперсионный анализ (Analysis of variance, ANOVA) [19], достоверность которого подтверждается гомогенностью дисперсий всех алгоритмов при каждом размере окна w – все значения p -уровней значимости по тесту Левена (Levene's test) [20] составляют $p > 0,48$. Результаты дисперсионного анализа позволили установить следующее.

1. Наличие значимого основного влияния на среднюю длину пути как метода обхода (со значением p -уровня значимости $p \ll 0,001$), так и размера окна ($p \ll 0,001$).

2. Наличие значимого взаимодействия между методом и размером окна ($p = 0,0104$), указывающего на то, что размер окна по-

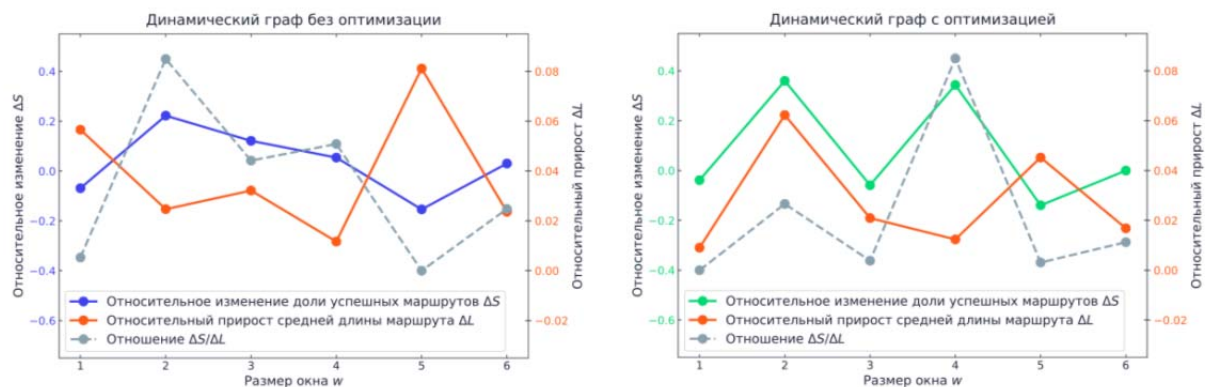


Рис. 6. Относительное изменение доли успешных маршрутов и средней длины маршрута для каждого окна w для метода, основанного на построении динамического графа (слева) и его оптимизированной версии (справа)
Fig. 6. Relative change in the proportion of successful routes and the average route length for each window w for the method based on dynamic graph construction (left) and its optimized version (right)

разному влияет на среднюю длину пути в зависимости от используемого метода.

Относительная разница ΔL_{rel} маршрутов L_A и L_B , полученных с помощью методов A и B , может быть получена как

$$\Delta L_{\text{rel}} = \frac{L_A - L_B}{(L_A + L_B)/2}. \quad (14)$$

Результаты теста Шапиро – Уилка (Shapiro-Wilk test) [21] для проверки гипотезы о нормальности распределения ΔL_{rel} со значением уровня статистической значимости $\alpha = 0,05$ позволили сделать вывод о том, что для всех рассматриваемых w для всех пар алгоритмов распределение ΔL_{rel} статистически значимо отличается от нормального, следовательно, для проверки гипотез о статистически значимом различии средних необходимо использовать непараметрический тест.

В силу парности данных для сравнения средних был использован непараметрический тест Уилкоксона для парных выборок (Wilcoxon signed-rank test) [22] со значением уровня статистической значимости $\alpha = 0,05$, результаты которого показали, что для всех рассмотренных значений w :

1) не существует статистически значимой разницы средних длин маршрута, полученных с помощью базового метода и метода, основанного на применении динамического графа с оптимизацией (значения p -уровней

значимости с поправкой Бонферрони на множественную проверку гипотез для различных значений w лежат в диапазоне $p \in [0,118; 1,0]$);

2) медианная длина оптимизированного маршрута с использованием динамического графа статистически значимо отличается (меньше) от медианной длины маршрута с использованием динамического графа без оптимизации, $p \in [1,04 \cdot 10^{-8}; 8,42 \cdot 10^{-5}]$;

3) медианная длина маршрута для базового алгоритма статистически значимо отличается (меньше) от медианной длины маршрута с использованием динамического графа без оптимизации, $p \in [8,35 \cdot 10^{-8}; 0,006]$.

Результаты парного непараметрического теста Мак-Немара (Pairwise McNemar test) [23] для методов, основанных на использовании динамического графа с оптимизацией и без нее, показывают, что ни для одного из рассматриваемых размеров окна w использование оптимизации не показало статистически значимого улучшения с точки зрения увеличения доли успешных маршрутов (минимальное значение p -уровня значимости составляет $p = 0,386$ и соответствует размерам окна $w = 4$ и $w = 5$).

Для выбора оптимального размера окна w для методов, основанных на создании динамического графа, были построены линейные графики относительного изменения доли успешных маршрутов ΔS и средней длины

маршрута ΔL для каждого окна w по сравнению с предыдущим (рис. 6): оптимальным предлагается считать тот размер окна, которому соответствует наибольший прирост доли успешных маршрутов при как можно меньшем приросте относительного изменения их средней длины (то есть наибольшее значение коэффициента $\Delta S/\Delta L$). Из рис. 6 видно, что для метода без оптимизации таким значением является $w = 2$, а для метода с оптимизацией – $w = 4$.

Обсуждение

Анализируя алгоритмическую сложность [24] базового метода определения маршрута обхода динамически изменяющейся грозы (алгоритм 1) в предположении, что при увеличении размера окна w на один число вершин графа $G_{\text{cur}}(V_{\text{cur}}^{\text{hull}}, E_{\text{cur}}^{\text{hull}})$ увеличивается на среднее значение вершин в каждый момент времени V , можно заключить:

1) в каждый момент времени t_i асимптотика валидации ребра между каждой возможной парой вершин зависит в том числе от размера окна w (значению $w = 0$ соответствует V вершин, $w = 1 - 2V$ вершин и т. д.) и составляет $\mathcal{O}(((w+1)V)^2) \approx \mathcal{O}((wV)^2)$;

2) причем для каждого ребра необходимо проверить пересечение с $(w+1)P$ полигонами, где P – среднее число полигонов для каждого t_i , что в итоге дает сложность $\mathcal{O}(w^3V^2P)$;

3) алгоритмическая сложность алгоритма Дейкстры на графе, ребра которого соединяют все возможные пары вершин, составляет $\mathcal{O}(V^2 + V \log V)$ [25];

4) общая сложность алгоритма для всех моментов времени N , таким образом, составляет $\mathcal{O}((w^3V^2P + V^2 + V \log V)N) \approx \mathcal{O}(w^3V^2N)$ – кубическая зависимость от w и квадратичная зависимость от V делают базовый алгоритм крайне непрактичным.

Усовершенствование базового алгоритма, заключающееся в построении общего для всех моментов t_i динамического графа с постоянным числом вершин V^* , а также в вали-

дации лишь отобранного подмножества ребер-кандидатов $\mathcal{E}_{\text{cand}}$, позволяет существенно уменьшить алгоритмическую сложность метода:

1) асимптотика числа ребер составляет $\mathcal{O}(V^*)$ для триангуляции Делоне и $\mathcal{O}(kV^*)$ для k ближайших соседей, то есть можно считать, что мощность $\mathcal{E}_{\text{cand}}$ линейно зависит от числа вершин динамического графа: $|\mathcal{E}_{\text{cand}}| = cV^*$, где c – некоторая константа;

2) сложность получения триангуляции Делоне, а также получения ближайших соседей (с использованием иерархического дерева R-tree или KD-tree [26]) составляет $\mathcal{O}(V^* \log V^*)$ для обоих алгоритмов;

3) для каждого момента t_i ребра $\mathcal{E}_{\text{cand}}$ валидируются только относительно текущего числа полигонов P , что соответствует асимптотике $\mathcal{O}(|\mathcal{E}_{\text{cand}}|P) = \mathcal{O}(V^*P)$; таким образом, сложность построения графа и валидации для всех моментов N линейна от числа вершин и составляет $\mathcal{O}(V^*PN)$;

4) после построения динамического графа во время непосредственной работы алгоритма необходимо получить пересечение $w+1$ множеств $\cap_i^{i+w} \mathcal{E}^{(i)}$ с приблизительной асимптотикой $\mathcal{O}(w|\mathcal{E}_{\text{cand}}|)$, а также применить алгоритм Дейкстры, сложность которого составит $\mathcal{O}(|\mathcal{E}_{\text{cand}}| + V^* \log V^*)$; сложность для N шагов составит $\mathcal{O}((wcV^* + V^* \log V^*)N)$;

5) таким образом, предрасчет динамического графа переносит вычислительно сложные процедуры на этап предобработки данных, значительно ускоряя работу метода при непосредственном выполнении обхода грозы; общая сложность предлагаемого метода становится практически линейной от V^* и составляет $\mathcal{O}(V^*PN + (wV^* + V^* \log V^*)N)$.

Оптимизация предложенного метода (алгоритм 3) предполагает построение дополнительного графа видимости с r вершинами ($r \ll V^*$), полученными как поворотные пункты неоптимизированного маршрута обхода, и $\mathcal{O}(r^2)$ ребрами, валидация которых не требует дополнительных вычислительных затрат, так как уже была осуществлена на этапе построения динамического графа. Уве-

личение алгоритмической сложности оптимизированной версии метода происходит только за счет нахождения кратчайшего пути на новом небольшом графе видимости и составляет $\mathcal{O}(r^2)$.

Проведенные статистические тесты свидетельствуют о том, что не существует статистически значимой разницы средних распределений длин маршрутов для базового метода и для метода, основанного на применении динамического графа с оптимизацией, то есть предложенный в настоящей работе метод позволяет перейти от базового алгоритма с кубической асимптотикой от размера окна w и квадратичной от среднего числа вершин V к методу, полностью независимому от w и зависящему от числа вершин динамического графа как $\mathcal{O}(V^* \log V^*)$.

Таким образом, основные преимущества предлагаемого метода заключаются в следующем.

1. Динамический граф строится один раз на этапе предобработки данных, после чего переиспользуется на каждом шаге алгоритма, значительно снижая вычислительную сложность нахождения маршрута обхода динамически изменяющейся зоны грозы.

2. Использование для нахождения кратчайшего маршрута на динамическом графе не всех возможных ребер, но подмножества ребер-кандидатов $\mathcal{E}_{\text{cand}}$ позволяет перейти от сложности алгоритма Дейкстры $\mathcal{O}(V^2 + V \log V)$ к асимптотике $\mathcal{O}(V^* + V^* \log V^*)$, что также значительно упрощает вычисления и способствует уменьшению времени, затрачиваемого на нахождение маршрута обхода на очередном шаге алгоритма.

3. Кроме того, подход, описанный в алгоритме 3, предоставляет возможность использовать один и тот же динамический граф независимо от выбранного размера окна w , что позволяет запускать его в реальных условиях полета для нескольких w параллельно и выбирать маршрут с наилучшим значением коэффициента $\Delta S / \Delta L$ (рис. 6).

Для еще более рационального использования вычислительных ресурсов при практической реализации алгоритма 3 авторами

предлагается рассмотреть следующие возможности оптимизации метода.

1. Использование пространственной индексации по ребрам препятствий (например, с помощью иерархических деревьев R-tree) позволяет уменьшить асимптотику валидации ребер от $\mathcal{O}(|\mathcal{E}_{\text{cand}}|P)$ до $\mathcal{O}(|\mathcal{E}_{\text{cand}}| \log P)$, на порядки снижая практическое время нахождения маршрута обхода. R-tree-подобные структуры используют минимальные ограничивающие прямоугольники и позволяют быстро отбрасывать препятствия, гарантированно не пересекающиеся с проверяемым ребром [27].

2. Кроме того, валидация каждого из ребер для каждого момента t_i может выполняться в произвольном порядке, независимо от остальных валидаций, – это позволяет выполнять ее параллельно на K ядрах, уменьшая, таким образом, общее время валидации в K раз.

3. Валидность ребер $\mathcal{E}_{\text{cand}}$ для каждого рассматриваемого t_i можно хранить как битовую маску – битсет (BitSet) [28]: множество валидных ребер $\mathcal{E}^{(i)}$ превращается в битсет $\mathcal{B}^{(i)}$ длины $|\mathcal{E}_{\text{cand}}|$, каждый j -й элемент которого является единицей, если ребро валидно, либо нулем в противном случае:

$$\mathcal{B}^{(i)}[j] = \begin{cases} 1, & \text{если } \mathcal{E}_{\text{cand}}[j] \in \mathcal{E}^{(i)}; \\ 0, & \text{если } \mathcal{E}_{\text{cand}}[j] \notin \mathcal{E}^{(i)}. \end{cases} \quad (15)$$

Пересечение ребер $\bigcap_{i=i+w}^i \mathcal{E}^{(i)}$, таким образом, сводится к побитовому пересечению $\bigcap_{i=i+w}^i \mathcal{B}^{(i)}$ и позволяет перейти от зависящей от размера окна асимптотики $\mathcal{O}(w|\mathcal{E}_{\text{cand}}|)$ к сложности $\mathcal{O}(|\mathcal{E}_{\text{cand}}|/p)$, где p – длина машинных слов, в виде которых хранится битсет (обычно $p = 64$).

4. Еще большей оптимизации данного шага можно добиться, если для момента t_i не считать пересечение битсетов $\bigcap_{i=i+w}^i \mathcal{B}^{(i)}$ заново, а использовать предварительно закешированное пересечение $\mathcal{B}_{\text{cache}}^{(i-1)} = \bigcap_{i=i+w-1}^i \mathcal{B}^{(i)}$ и получить множество валидных ребер для текущего временного окна за единственную

операцию пересечения как $\bigcap_i^{i+w} \mathcal{B}^{(i)} = \mathcal{B}_{cache}^{(i)} \cap \mathcal{B}^{(i+w)}$.

5. Помимо классического алгоритма Дейкстры, для нахождения кратчайшего маршрута на полученном взвешенном динамическом графе может быть использован любой другой алгоритм с лучшей асимптотикой [29].

Сравнивая предлагаемый в настоящей работе метод определения маршрута обхода грозы на динамическом графе с другими, в том числе эвристическими, методами, такими как, например, быстрорастущие случайные деревья (Rapidly-exploring random trees) [30], вероятностные «дорожные карты» (Probabilistic roadmaps) [31], стохастические методы [32], можно выделить следующие его достоинства.

1. Относительная простота и высокая скорость вычислений после первичного построения динамического графа.

2. Простота масштабирования и параллельного применения.

3. Возможность применения в ситуациях с множеством препятствий сложных форм и конфигураций.

4. Детерминированность и воспроизводимость при одних и тех же начальных условиях.

Однако важное допущение, лежащее в основе применения метода определения маршрута обхода грозы на динамическом графе, заключается в принятии прогноза множества грозовых очагов $\{\mathcal{T}^{(i)}\}_{i=1}^N$ как совершенно достоверного, хотя на самом деле он носит не абсолютный, но вероятностный характер.

Перспективным направлением развития предложенного метода является учет вероятностного характера наукастинга грозы [33], что можно реализовать, например, за счет валидации ребер по ансамблю прогнозов с заданной вероятностью. Кроме того, важный шаг по усовершенствованию предлагаемого метода определения маршрута обхода заключается в обеспечении постобработки полученного с помощью алгоритма 3 маршрута, которая может позволить сгладить его, исключив лишние маневры, а также обеспечить

проверку «комфортности» маршрута и его соответствия аэродинамическим ограничениям ВС.

В контексте применения метода определения оптимального маршрута обхода динамически изменяющейся зоны грозы в районе аэродромов и аэроузлов существенным фактором являются ограничения структуры воздушного пространства, включая запретные, опасные зоны, зоны ограничения полетов, а также временные ограничения (NOTAM). Учет таких зон может быть интегрирован в алгоритм аналогично процедуре обхода зон грозовой деятельности: для этого требуется добавление в навигационную систему актуальных границ зон ограничений в виде геометрических препятствий и валидация ребер динамического графа на отсутствие пересечений с указанными ограничениями.

Отметим также, что предлагаемый метод не исключает обязательного управления воздушным движением со стороны диспетчера обслуживания воздушного движения (ОВД): предполагается, что экипаж будет согласовывать рассчитанный маршрут обхода с органами ОВД как при полете по маршруту, так и при маневрировании в пределах района аэродрома (аэроузла). В перспективе при реализации функций автоматизированного обхода гроз процесс согласования может быть частично или полностью автоматизирован, в том числе за счет адаптации алгоритма для учета окружающих ВС и кооперативного обхода грозовой зоны несколькими бортами, выполняющими полет в общей области ответственности. Такой подход обладает высоким практическим потенциалом для районов с интенсивным трафиком, однако приводит к существенному усложнению задачи, поскольку требует совместной оптимизации траекторий, разрешения конфликтов между ВС и учета ограничений ОВД в реальном времени, что делает задачу значительно более вычислительно емкой и методологически трудоемкой, чем обход препятствия единичным ВС.

Выводы

Таким образом, в настоящей работе предложен и реализован метод определения маршрута обхода изменяющейся во времени зоны грозового фронта, основанный на создании динамического графа и нахождении кратчайшего пути на нем.

1. Математически формализована задача нахождения оптимального маршрута динамически изменяющейся зоны грозы, основные требования к маршруту обхода сформулированы в виде задачи условной оптимизации (7)–(11).

2. Разработан метод построения динамического графа с фиксированным множеством вершин и временно изменяющимся множеством ребер, в котором вершины формируются на основе кластеризации границ вогнутых оболочек для всех временных шагов, а ребра определяются как объединение множеств, полученных по триангуляции Делоне и по алгоритму ближайших соседей (k NN) с последующей валидацией по радиолокационным данным. Такой подход позволил существенно снизить вычислительную сложность по сравнению с пересозданием графа на каждом шаге и обеспечить устойчивость графа при изменении временного окна.

3. Предложен метод оптимизации маршрута обхода, основанный на построении вспомогательного графа видимости, позволяющий устранить избыточные звенья маршрута без потери корректности обхода. Оптимизированный метод демонстрирует наилучшие результаты как по длине маршрута, так и по доле успешных обходов.

4. Проведенный статистический анализ подтвердил: 1) отсутствие статистически значимых различий между базовым методом и методом, основанным на динамическом графе с оптимизацией ($p > 0,1$), что указывает на сопоставимую эффективность при меньшей вычислительной нагрузке; 2) статистически значимое сокращение длины маршрута при оптимизации динамического графа относительно неоптимизированного варианта ($p < 0,006$).

5. Предложен метод выбора оптимального размера окна прогнозирования, позволяющий в реальном времени адаптировать параметры планирования маршрута в зависимости от динамики грозовой активности, обеспечивая баланс между устойчивостью маршрута и его длиной, а также предотвращая преждевременное объединение грозовых ячеек в оболочки.

6. Практическая значимость работы заключается в том, что разработанный метод может быть интегрирован в состав интеллектуальной адаптивной системы поддержки принятия решений при обходе грозовой деятельности [34], способной: 1) учитывать прогноз развития конвективных процессов в режиме реального времени; 2) предлагать пилоту безопасные и экономичные маршруты обхода в соответствии с концепцией ТВО, обеспечивая, таким образом, повышение ситуационной осведомленности членов летного экипажа ВС.

Предложенный метод обеспечивает основу для построения интеллектуальных навигационных решений, объединяющих динамическое прогнозирование грозовой активности, адаптивное планирование маршрута и автоматизированную поддержку принятия экипажами ВС решений в условиях быстро меняющейся метеорологической обстановки.

Список литературы

1. Lui G.N., Hon K.K., Liem R.P. Weather impact quantification on airport arrival on-time performance through a Bayesian statistics modeling approach [Электронный ресурс] // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2022. Vol. 143. ID: 103811. DOI: 10.1016/j.trc.2022.103811 (дата обращения: 10.10.2025).

2. DeLaura R. Modeling convective weather avoidance in enroute airspace / R. DeLaura, M. Robinson, M. Pawlak, J. Evans [Электронный ресурс] // 13th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology. AMS, LA, New Orleans, 2008. 12 p. URL:

<https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/4574.pdf> (дата обращения: 10.10.2025).

3. **Sharman R., Williams J.K.** The complexities of thunderstorm avoidance due to turbulence and implications for traffic flow management // Aviation, range and aerospace meteorology special symposium on weather-air traffic management integration, 2009. 10 p. URL: https://ams.confex.com/ams/89annual/techprogram/paper_149843.htm (дата обращения: 10.10.2025).

4. **Franco A.** A probabilistic storm avoidance concept for en-route flight / A. Franco, A. Valenzuela, D. Rivas, D. Sacher, J. Lang, T. Hauf [Электронный ресурс] // Proceedings of the 10th SESAR Innovation Days. SESAR Joint Undertaking, 2020. 8 p. URL: <https://idus.us.es/server/api/core/bitstreams/162d9edd-e5e7-471d-8b6c-fdc6d6a95878/content> (дата обращения: 10.10.2025).

5. **Deng X.** Multi-obstacle path planning and optimization for mobile robot / X. Deng, R. Li, L. Zhao, K. Wang, X. Gui [Электронный ресурс] // Expert Systems with Applications. 2021. Vol. 183. ID: 115445. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.115445 (дата обращения: 10.10.2025).

6. **Luo J., Wang Z.X., Pan K.L.** Reliable path planning algorithm based on improved artificial potential field method [Электронный ресурс] // IEEE Access. 2022. Vol. 10. Pp. 108276–108284. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3212741 (дата обращения: 10.10.2025).

7. **Rosenow J., Lindner M., Scheiderer J.** Advanced flight planning and the benefit of in-flight aircraft trajectory optimization [Электронный ресурс] // Sustainability. 2021. Vol. 13, iss. 3. ID: 1383. DOI: 10.3390/su13031383 (дата обращения: 10.10.2025).

8. **Lu L., Liu C.** Research on trajectory planning in thunderstorm weather based on dynamic window algorithm during approach segment [Электронный ресурс] // Scientific Programming. 2022. ID: 7031928. 10 p. DOI: 10.1155/2022/7031928 (дата обращения: 10.10.2025).

9. **Costas P., de Oliveira I.R.** Advancing operational efficiency: airspace users' perspective on trajectory-based operations // Systems and Control. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2412.08783 (дата обращения: 10.10.2025).

10. **Коваленко Г.В., Ядров И.А.** Способ определения маршрута обхода воздушным судном грозы методом нахождения кратчайшего пути на графе // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2025. № 3 (46). С. 35–55. DOI: 10.51955/2312-1327_2025_3_35

11. **Agarwal D., Bharti P.S.** A review on comparative analysis of path planning and collision avoidance algorithms // International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering. 2018. Vol. 12, no. 6. Pp. 608–624.

12. **Xu J.** A concave hull algorithm for scattered data and its applications / J. Xu, Z. Zheng, Y. Feng, X. Qing // 2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing. IEEE, 2010. No. 5. Pp. 2430–2433. DOI: 10.1109/CISP.2010.5648277

13. **Saalfeld A.** Topologically consistent line simplification with the Douglas-Peucker algorithm // Cartography and Geographic Information Science. 1999. Vol. 26, iss. 1. Pp. 7–18. DOI: 10.1559/152304099782424901

14. **Rachmawati D., Gustin L.** Analysis of Dijkstra's algorithm and A* algorithm in shortest path problem [Электронный ресурс] // Journal of Physics: Conference Series, 2020. Vol. 1566. ID: 012061. DOI: 10.1088/1742-6596/1566/1/012061 (дата обращения: 10.10.2025).

15. **Crouch M.S., McGregor A., Stubbs D.** Dynamic graphs in the sliding-window model. In book: Algorithms. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. Pp. 337–348. DOI: 10.1007/978-3-642-40450-4_29

16. **Aubian G., Brunelli F., Dragan F.F. и др.** On the complexity of computing a fastest temporal path in interval temporal graphs [Электронный ресурс] // 2025. 16 p. URL: <https://inria.hal.science/hal-04863343v1/document> (дата обращения: 10.10.2025).

17. **Dinas S., Banon J.M.** A review on Delaunay triangulation with application on computer vision // International Journal of Computer Science and Engineering. 2014. Vol. 3, iss. 2. Pp. 10–18.

18. **Kramer O.** K-nearest neighbors. In book: Dimensionality reduction with unsupervised nearest neighbors. Berlin, Heidelberg:

Springer Berlin Heidelberg, 2013. Vol. 51. Pp. 13–23. DOI: 10.1007/978-3-642-38652-7_2

19. Langenberg B. A tutorial on using the paired t test for power calculations in repeated measures ANOVA with interactions / B. Langenberg, M. Janczyk, V. Koob, R. Kliegl, A. Mayer // *Behavior Research Methods*. 2023. Vol. 55. Pp. 2467–2484. DOI: 10.3758/s13428-022-01902-8

20. Zhou Y., Zhu Y., Wong W.K. Statistical tests for homogeneity of variance for clinical trials and recommendations [Электронный ресурс] // *Contemporary clinical trials communications*. 2023. Vol. 33. ID: 101119. DOI: 10.1016/j.conctc.2023.101119 (дата обращения: 10.10.2025).

21. González-Estrada E., Villaseñor J.A., Acosta-Pech R. Shapiro-Wilk test for multivariate skew-normality // *Computational Statistics*. 2022. Vol 37, iss. 4. Pp. 1985–2001. DOI: 10.1007/s00180-021-01188-y

22. Thakkar B. Continuous variable analyses: student's t-test, Mann–Whitney U test, Wilcoxon signed-rank test // *Translational cardiology*. 2025. Pp. 165–167. DOI: 10.1016/B978-0-323-91790-2.00052-6

23. Pembury Smith M.Q.R., Ruxton G.D. Effective use of the McNemar test [Электронный ресурс] // *Behavioral Ecology and Sociobiology*. 2020. Vol. 74. ID: 133. DOI: 10.1007/s00265-020-02916-y (дата обращения: 10.10.2025).

24. Wilf H.S. Algorithms and complexity. 2nd ed. CRC Press, 2002. 232 p. DOI: 10.1201/9780429294921

25. Jurkiewicz P. Empirical time complexity of generic Dijkstra algorithm / P. Jurkiewicz, E. Biernacka, J. Domżał, R. Wójcik // *2021 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM)*. France, Bordeaux, 2021. Pp. 594–598.

26. Zhao Y. KD-Box: Line-segment-based KD-tree for interactive exploration of large-scale time-series data / Y. Zhao, Y. Wang, J. Zhang, C.-W. Fu, M. Xu, D. Moritz // *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. 2021. Vol. 28, iss. 1. Pp. 890–900. DOI: 10.1109/TVCG.2021.3114865

27. Gu T. The RLR-tree: A reinforcement learning based r-tree for spatial data / T. Gu, K. Feng, G. Cong, C. Long, Z. Wang, S. Wang [Электронный ресурс] // *Proceedings of the ACM on Management of Data*, 2023. Vol. 1, iss. 1. ID: 63, 26 p. DOI: 10.1145/3588917 (дата обращения: 10.10.2025).

28. Jiang Y., Fang G. Enhancing the Apriori Algorithm with BitSet Encoding and Hash Prefixes on Spark // *2024 6th International Conference on Electronic Engineering and Informatics (EEI)*. IEEE, 2024. Pp. 1067–1072. DOI: 10.1109/EEI63073.2024.10696454

29. Hanauer K., Henzinger M., Schulz C. Recent advances in fully dynamic graph algorithms—a quick reference guide [Электронный ресурс] // *ACM Journal of Experimental Algorithmics*. 2022. Vol. 27. ID: 1.11. 45 p. DOI: 10.1145/3555806 (дата обращения: 10.10.2025).

30. Andrés E. Informed scenario-based RRT* for aircraft trajectory planning under ensemble forecasting of thunderstorms / E. Andrés, D. González-Arribas, M. Soler, M. Kamgarpour, M. Sanjurjo-Rivo [Электронный ресурс] // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2021. Vol. 129. ID: 103232. DOI: 10.1016/j.trc.2021.103232 (дата обращения: 10.10.2025).

31. Ravankar A.A. HPPRM: hybrid potential based probabilistic roadmap algorithm for improved dynamic path planning of mobile robots / A.A. Ravankar, A. Ravankar, T. Emaru, Y. Kobayashi // *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. Pp. 221743–221766. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3043333 (дата обращения: 10.10.2025).

32. González-Arribas D. Robust aircraft trajectory planning under uncertain convective environments with optimal control and rapidly developing thunderstorms / D. González-Arribas, M. Soler, M. Sanjurjo-Rivo, M. Kamgarpour, J. Simarro // *Aerospace Science and Technology*. 2019. Vol. 89. Pp. 445–459. DOI: 10.1016/j.ast.2019.03.051

33. Коваленко Г.В., Ядров И.А. Применение Seq2seq-моделей для прогнозирования развития грозовой деятельности с целью повышения уровня ситуационной осведомленности пилота в полете // *Научный вестник*

МГТУ ГА. 2025. Т. 28, № 1. С. 20–38. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-20-38

34. Kovalenko G.V., Yadrov I.A., Kuts K.A. Intelligent adaptive flight crew decision support system for thunderstorm avoidance // *Rus-Russian Aeronautics*. 2023. Vol. 66. Pp. 552–559. DOI: 10.3103/S1068799823030170

References

1. Lui, G.N., Hon, K.K., Liem, R.P. (2022). Weather impact quantification on airport arrival on-time performance through a Bayesian statistics modeling approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 143, ID: 103811. DOI: 10.1016/j.trc.2022.103811 (accessed: 10.10.2025).

2. DeLaura, R., Robinson, M., Pawlak, M., Evans, J. (2008). Modeling convective weather avoidance in enroute airspace. In: *13th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology*. AMS, New Orleans, LA, 12 p. Available at: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/4574.pdf> (accessed: 10.10.2025).

3. Sharman R., Williams J.K. (2009). The complexities of thunderstorm avoidance due to turbulence and implications for traffic flow management. In: *Aviation, range and aerospace meteorology special symposium on weather-air traffic management integration*, 10 p. Available at: https://ams.confex.com/ams/89annual/techprogram/paper_149843.htm (accessed: 10.10.2025).

4. Franco, A., Valenzuela, A., Rivas, D., Sacher, D., Lang, J., Hauf, T. (2020). A probabilistic storm avoidance concept for enroute flight. In: *Proceedings of the 10th SESAR Innovation Days*. SESAR Joint Undertaking, 8 p. Available at: <https://idus.us.es/server/api/core/bitstreams/162d9edd-e5e7-471d-8b6c-fdcdbd6a95878/content> (accessed: 10.10.2025).

5. Deng, X., Li, R., Zhao, L., Wang, K., Gui, X. (2021). Multi-obstacle path planning and optimization for mobile robot. *Expert Systems with Applications*, vol. 183, ID: 115445. DOI: 10.1016/j.eswa.2021.115445 (accessed: 10.10.2025).

6. Luo, J., Wang, Z.X., Pan, K.L. (2022). Reliable path planning algorithm based on

improved artificial potential field method. *IEEE Access*, vol. 10, pp. 108276–108284. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3212741 (accessed: 10.10.2025).

7. Rosenow, J., Lindner, M., Scheiderer, J. (2021). Advanced flight planning and the benefit of in-flight aircraft trajectory optimization. *Sustainability*, vol. 13, issue 3. ID: 1383. DOI: 10.3390/su13031383 (accessed: 10.10.2025).

8. Lu, L., Liu, C. (2022). Research on trajectory planning in thunderstorm weather based on dynamic window algorithm during approach segment. *Scientific Programming*, ID: 7031928, 10 p. DOI: 10.1155/2022/7031928 (accessed: 10.10.2025).

9. Costas, P., de Oliveira, I.R. (2024). Advancing operational efficiency: airspace users' perspective on trajectory-based operations. *Systems and Control*. DOI: 10.48550/arXiv.2412.08783 (accessed: 10.10.2025).

10. Kovalenko, G.V., Yadrov, I.A. (2025). Method for determining an aircraft route to avoid a thunderstorm using the shortest path on a graph. *Crede Experto: Transport, Society, Education, Language*, no. 3 (46), pp. 35–55. DOI: 10.51955/2312-1327_2025_3_35 (in Russian)

11. Agarwal, D., Bharti, P.S. (2018). A review on comparative analysis of path planning and collision avoidance algorithms. *International Journal of Industrial and Manufacturing Engineering*, vol. 12, no. 6, pp. 608–624.

12. Xu, J., Zheng, Z., Feng, Y., Qing, X. (2010). A concave hull algorithm for scattered data and its applications. In: *2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing*. IEEE, no. 5, pp. 2430–2433. DOI: 10.1109/CISP.2010.5648277

13. Saalfeld, A. (1999). Topologically consistent line simplification with the Douglas-Peucker algorithm. *Cartography and Geographic Information Science*, vol. 26, issue 1, pp. 7–18. DOI: 10.1559/152304099782424901

14. Rachmawati, D., Gustin, L. (2020). Analysis of Dijkstra's algorithm and A* algorithm in shortest path problem. *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1566, ID: 012061. DOI: 10.1088/1742-6596/1566/1/012061 (accessed: 10.10.2025).

15. Crouch, M.S., McGregor, A., Stubbs, D. (2013). Dynamic graphs in the sliding-window model. In book: *Algorithms*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 337–348. DOI: 10.1007/978-3-642-40450-4_29
16. Aubian, G., Brunelli, F., Dragan, F.F. et al. (2025). On the complexity of computing a fastest temporal path in interval temporal graphs, 16 p. Available at: <https://inria.hal.science/hal-04863343v1/document> (accessed: 10.10.2025).
17. Dinas, S., Banon, J.M. (2014). A review on Delaunay triangulation with application on computer vision. *International Journal of Computer Science and Engineering*, vol. 3, issue 2, pp. 10–18.
18. Kramer, O. (2013). K-nearest neighbors. In book: *Dimensionality reduction with unsupervised nearest neighbors*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, vol. 51, pp. 13–23. DOI: 10.1007/978-3-642-38652-7_2
19. Langenberg, B., Janczyk, M., Koob, V., Kliegl, R., Mayer, A. (2023). A tutorial on using the paired t test for power calculations in repeated measures ANOVA with interactions. *Behavior Research Methods*, vol. 55, pp. 2467–2484. DOI: 10.3758/s13428-022-01902-8
20. Zhou, Y., Zhu, Y., Wong, W.K. (2023). Statistical tests for homogeneity of variance for clinical trials and recommendations. *Contemporary Clinical Trials Communications*, vol. 33. ID: 101119. DOI: 10.1016/j.conctc.2023.101119 (accessed: 10.10.2025).
21. González-Estrada, E., Villaseñor, J.A., Acosta-Pech, R. (2022). Shapiro-Wilk test for multivariate skew-normality. *Computational Statistics*, vol. 37, issue 4, pp. 1985–2001. DOI: 10.1007/s00180-021-01188-y
22. Thakkar, B. (2025). Continuous variable analyses: student's t-test, Mann–Whitney U test, Wilcoxon signed-rank test. *Translational cardiology*, pp. 165–167. DOI: 10.1016/B978-0-323-91790-2.00052-6
23. Pembury Smith, M.Q.R., Ruxton, G.D. (2020). Effective use of the McNemar test. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, vol. 74. ID: 133. DOI: 10.1007/s00265-020-02916-y (accessed: 10.10.2025).
24. Wilf, H.S. (2002). *Algorithms and Complexity*. 2nd ed. CRC Press, 232 p. DOI: 10.1201/9780429294921
25. Jurkiewicz, P., Biernacka, E., Domżał, J., Wójcik, R. (2021). Empirical time complexity of generic Dijkstra algorithm. In: *2021 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM)*. Bordeaux, France, pp. 594–598.
26. Zhao, Y., Wang, Y., Zhang, J., Fu, C.W., Xu, M., Moritz, D. (2021). KD-Box: Line-segment-based KD-tree for interactive exploration of large-scale time-series data. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 28, issue 1, pp. 890–900. DOI: 10.1109/TVCG.2021.31114865
27. Gu, T., Feng, K., Cong, G., Long, C., Wang, Z., Wang, S. (2023). The RLR-tree: A reinforcement learning based r-tree for spatial data. In: *Proceedings of the ACM on Management of Data*, vol. 1, issue 1, ID: 63, 26 p. DOI: 10.1145/3588917 (accessed: 10.10.2025).
28. Jiang, Y., Fang, G. (2024). Enhancing the Apriori Algorithm with BitSet Encoding and Hash Prefixes on Spark. In: *2024 6th International Conference on Electronic Engineering and Informatics (EEI)*, pp. 1067–1072. DOI: 10.1109/EEI63073.2024.10696454
29. Hanauer, K., Henzinger, M., Schulz, C. (2022). Recent advances in fully dynamic graph algorithms—a quick reference guide. *ACM Journal of Experimental Algorithmics*, vol. 27, ID: 1.11, 45 p. DOI: 10.1145/3555806 (accessed: 10.10.2025).
30. Andrés, E., González-Arribas, D., Soler, M., Kamgarpour, M., Sanjurjo-Rivo, M. (2021). Informed scenario-based RRT* for aircraft trajectory planning under ensemble forecasting of thunderstorms. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 129, ID: 103232. DOI: 10.1016/j.trc.2021.103232 (accessed: 10.10.2025).
31. Ravankar, A.A., Ravankar, A., Emaru, T., Kobayashi, Y. (2020). HPPRM: hybrid potential based probabilistic roadmap algorithm for improved dynamic path planning of mobile robots. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 221743–221766. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3043333 (accessed: 10.10.2025).

32. González-Arribas, D., Soler, M., Sanjurjo-Rivo, M., Kamgarpour, M., Simarro, J. (2019). Robust aircraft trajectory planning under uncertain convective environments with optimal control and rapidly developing thunderstorms. *Aerospace Science and Technology*, vol. 89, pp. 445–459. DOI: 10.1016/j.ast.2019.03.051

33. Kovalenko, G.V., Yadrov, I.A. (2025). Application of Seq2Seq models for predicting the development of thunderstorm activity to en-

hance the pilot's situational awareness in flight. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 28, no. 1, pp. 20–38. DOI: 10.26467/2079-0619-2025-28-1-20-38 (in Russian)

34. Kovalenko, G.V., Yadrov, I.A., Kuts, K.A. (2023). Intelligent adaptive flight crew decision support system for thunderstorm avoidance. *Russian Aeronautics*, vol. 66, pp. 552–559. DOI: 10.3103/S1068799823030170

Сведения об авторах

Коваленко Геннадий Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры летной эксплуатации и безопасности полетов в гражданской авиации СПбГУ ГА, kgvf@inbox.ru.

Ядров Илья Александрович, аспирант кафедры летной эксплуатации и безопасности полетов в гражданской авиации СПбГУ ГА, yadrov.ilya@gmail.com.

Information about the authors

Gennadiy V. Kovalenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Flight Operations and Flight Safety in Civil Aviation Chair, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov, kgvf@inbox.ru.

Ilya A. Yadrov, Postgraduate Student of the Flight Operations and Flight Safety in Civil Aviation Chair, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation A.A. Novikov, yadrov.ilya@gmail.com.

Поступила в редакцию 23.11.2025
Одобрена после рецензирования 12.01.2026
Принята в печать 23.07.2026

Received 23.11.2025
Approved after reviewing 12.01.2026
Accepted for publication 23.07.2026

УДК 629.7.083

DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-29-45

A calculation methodology for the quantitative parameters of the aircraft operational cycle based on current regulatory standards

M.A. Kondratyeva¹, S.N. Kuznetsov¹, A.V. Fryazinov¹

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

Abstract: Scientific and methodological research by leading scientists in the field of aircraft operational efficiency management has developed a comprehensive approach to determining the quantitative parameters of operational and technical characteristics. Significant accumulated experience in continuing airworthiness allows not only to define but also to objectively evaluate and confirm operational and technical characteristics at all stages of the aircraft lifecycle, creating a unified methodological framework. The developed model is based on an analysis of the aircraft operational cycle, which consists of the flight duration according to a typical profile and the ground stay duration. Key interrelated parameters for design and planning are the estimated annual flight time, defined by industry standards, and the serviceability factor. It has been established that with increasing flight duration and annual flight time, the number of operational cycles decreases, which objectively leads to an increase in the required ground stay duration to fulfill the plan. The practical value of this work lies in the calculation results obtained, which allowed for standardizing the values of ground parking duration and the possible number of operating cycles for various aircraft classes: from local airliners to long-haul aircraft. A methodology for graphical and analytical determination of the minimum required aircraft availability factor for achieving a specified annual flight time is presented. This allows for the identification of critical combinations of parameters when plan fulfillment becomes impossible without changing operating conditions. The presented methodology goes beyond a formal description of the relationships and provides a practical tool for designing new aircraft with optimized characteristics, for planning airline production activities, and for the operational management of maintenance processes. The main result is the ability to quantitatively substantiate management decisions aimed at improving the efficiency of technical operations and reducing labor and material costs for airlines.

Keywords: aircraft operation, operational cycle, annual flight hours, serviceability factor, ground parking duration, maintenance, efficiency, standardization.

For citation: Заменить на Kondratyeva, M.A., Kuznetsov, S.N., Fryazinov, A.V. (2026). A calculation methodology for the quantitative parameters of the aircraft operational cycle based on current regulatory standards. Civil Aviation High Technologies, vol. 29, no. 4, pp. 29–45. DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-29-45

Методика расчета количественных параметров оперативного цикла эксплуатации воздушного судна на основе действующих нормативов

М.А. Кондратьева¹, С.Н. Кузнецов¹, А.В. Фрязинов¹

*¹Иркутский филиал Московского государственного технического университета
гражданской авиации, г. Иркутск, Россия*

Аннотация: Научно-методические исследования ведущих ученых в области управления эффективностью технической эксплуатации воздушных судов (ВС) сформировали комплексный подход к определению количественных параметров эксплуатационно-технических характеристик. Накопленный значительный опыт в области поддержания летной годности позволяет не только задавать, но и объективно оценивать и подтверждать эксплуатационно-технические характеристики на всех этапах жизненного цикла ВС, создавая единую методическую базу. В основе разработанной модели лежит анализ операционного цикла эксплуатации ВС, который складывается из продолжительности полета по типовому профилю и

длительности наземной стоянки. Ключевыми взаимосвязанными параметрами для проектирования и планирования являются расчетный годовой налет, определяемый отраслевыми стандартами, и коэффициент исправности. Установлено, что с увеличением продолжительности полета и годового налета количество эксплуатационных циклов уменьшается, что объективно приводит к увеличению требуемой длительности стоянки для выполнения плана. Практическая ценность работы заключается в полученных результатах расчетов, которые позволили нормировать значения длительности стоянок и возможного количества циклов эксплуатации для различных классов ВС: от самолетов местных воздушных линий до дальних магистральных самолетов. Представлена методика графического и аналитического определения минимально потребного коэффициента исправности ВС для выполнения заданного годового налета. Это позволяет выявить критические сочетания параметров, когда выполнение плана становится невозможным без изменения операционных условий. Представленная методика не ограничивается формальным описанием взаимосвязей, а представляет практический инструмент для проектирования новых воздушных судов с оптимизированными характеристиками для планирования производственной деятельности авиакомпаний и для оперативного управления процессами технического обслуживания. Главным итогом является возможность количественно обосновывать управленческие решения, направленные на повышение эффективности технической эксплуатации и снижение трудовых и материальных затрат авиапредприятий.

Ключевые слова: эксплуатация воздушных судов, операционный цикл, годовой налет, коэффициент исправности, длительность стоянки, техническое обслуживание, эффективность, нормирование.

Для цитирования: Кондратьева М.А., Кузнецов С.Н., Фрязинов А.В. Методика расчета количественных параметров оперативного цикла эксплуатации воздушного судна на основе действующих нормативов // Научный вестник МГТУ ГА. 2026. Т. 29, № 4. С. 29–45. DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-29-45

Introduction

Aircraft fleet planning is a critical task for airlines aimed at ensuring safety and profitability. Scientific and methodological research in the field of aircraft technical operation efficiency management conducted by leading scientists of the Gromov Flight Research Institute, the State Research Institute of Civil Aviation, and the Moscow State Technical University of Civil Aviation, such as N.N. Smirnov, A.A. Itskovich, Yu.M. Chinyuchin, S.V. Daletsky, G.N. Gipich, I.G. Kirpichev, S.V. Kuznetsov, V.S. Shapkin, and others, have established objective requirements for expected operating conditions that determine the quantitative parameters and design conditions in accordance with which the operational and technical characteristics of aircraft must be specified, evaluated, and confirmed. Significant scientific and practical experience in the field of ensuring and maintaining airworthiness has been accumulated [1–13].

In the context of intensive development and ever-increasing competition in the global air transportation market, improving aircraft operational efficiency is a key factor in the economic sustainability of airlines. One of the challenges in this area is optimizing the aircraft stand-to-flight operating cycle, which directly determines

critical metrics such as the annual flight time of the aircraft fleet, its serviceability level, and, ultimately, the profitability of operations.

During aircraft development and operation, a unified scientific and methodological framework is maintained for assessing, confirming, and comparing these metrics. At the same time, there is an objective need to continually improve the scientific and methodological framework for aircraft technical operation, aimed at increasing maintenance efficiency and reducing labor and material costs for airlines.

In practice, aircraft operation management often encounters a contradiction between regulatory targets and operational constraints imposed by ground handling schedules, the actual technical condition of the fleet, and flight duration. The lack of a clear quantitative tool for analyzing the interplay of these factors leads to suboptimal decisions, failure to meet planned targets, or unreasonably high resource requirements.

The objective of this study is to develop a methodology for quantitatively analyzing the aircraft operating cycle aimed at ensuring planned annual flight hours by establishing a quantitative relationship between key operational parameters (annual flight hours, flight duration, ground parking duration, and serviceability factor). This methodology also aims to create a practical tool for standardizing grounding time

during the design of new aircraft, determining the minimum required fleet availability for flight plan execution, and identifying time slack and bottlenecks in airline operations.

The scientific novelty of this study lies in the development of an analytical framework for the theory of technical operation as applied to the problem of synchronizing the planned, technological, and actual operating modes of aircraft.

Materials and methods

The research material comprised the following: regulatory and technical documentation (OST 1.02785-2009), the works of leading scientists in the field of technical operation, and technological regulations¹.

This article presents a multi-level approach using a set of calculation and analytical methods characteristic of scientific and methodological research in the field of aircraft technical operation.

Based on the analytical and calculation method, quantitative dependencies were derived, determining a quantitative assessment of operating parameters (ground parking duration, number of cycles) for given basic standard operating parameters (annual flight time, flight duration).

The comparative-analytical method compared calculated values with regulatory requirements and actual data, which helped identify time reserves and critical conditions for flight plan execution.

The use of a graphical-analytical method allowed for the visualization of dependencies, making the analysis clearer and the interpretation of complex relationships more accessible for decision-making based on visual data.

Using the limit values and constraints method, critical parameter boundaries (at which the system failed to meet requirements) were identified and the system's resilience to deviations from the standard state was assessed.

The empirical-statistical method validated the calculation model in practice by comparing calculations with actual data to confirm their reliability.

The used methods made it possible to achieve the research goal of establishing relationships between parameters and creating a tool for improving aircraft operational efficiency.

Results

Estimated values of the key quantitative parameters of expected aircraft operating conditions, including the flight endurance according to a typical profile, the estimated annual flight time of the aircraft, and the duration of transit maintenance (aircraft preparation for a return flight), serve as the initial data for the design of new aircraft [2–5, 14].

The flight endurance of an aircraft according to a typical profile t_{fl} is determined based on a feasibility study of the aircraft characteristics (flight speed, aircraft weight), airport characteristics (requirements for the runway or landing site and its equipment), the purpose and regions of aircraft operation (average route length, availability of alternate airfields along the routes, planned aircraft usage characteristics)¹.

In this case, the estimated annual flight time for one aircraft T_{ann} , ensured by the maintenance system, is established depending on the flight duration according to the typical profile t_{fl} (tab. 1) [2, 14] and in accordance with OST 1.02785-2009².

In the scientific works of leading scientists in the field of technical operation [1–5, 12] it was established that the technically possible annual flight time of an aircraft T_{ann} is determined by the parameters of the operational cycle of the aircraft, i.e. the duration of the aircraft's stay at airports between adjacent flights (the duration of the aircraft preparation for flight) at base, intermediate and final airports t_{gnd} , the duration

¹ STO ISM TG 4.1.2.1.03.05-19. (2019). Technological Schedules for Ground Handling of Aircraft at JSC International Airport Irkutsk. Introduced 2019-10-24. Irkutsk: JSC International Airport Irkutsk, 579 p. (in Russian)

² OST 1.02785-2009. (2010). Aviation Standard. Civil Aviation Aircraft. Operational and Technical Characteristics. General Requirements. Introduced 2010-07-01. Moscow: FSUE "NIISU", 29 p. (in Russian)

Table 1

Estimated annual flight hours per an aircraft

Flight duration according to typical profile t_{fl} , hours	Estimated annual flight time per an aircraft T_{ann} , hours
$1.0 \leq t_{fl} < 1.5$	2500
$1.5 \leq t_{fl} < 2.5$	3000
$2.5 \leq t_{fl} \leq 5$	3500
$t_{fl} > 5$	4000

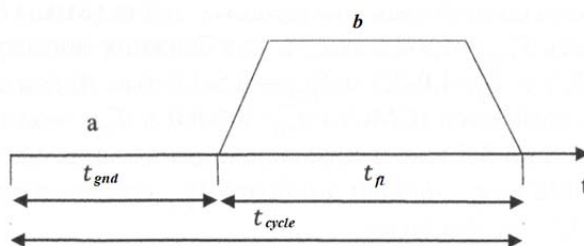


Fig. 1. Diagram of the operational cycle of aircraft operation: *a* – preparation for flight; *b* – flight

of a non-stop flight of an aircraft t_{fl} , as well as the available time of a day t_{day} for performing flights (fig. 1), while the total value of the parameters t_{gnd} and t_{fl} determines the duration of the operational cycle of operation t_{cycle} .

$$t_{cycle} = t_{gnd} + t_{fl}. \quad (1)$$

$$n_{tcycle} = \frac{365 t_{day}}{t_{cycle}} = \frac{365 t_{day}}{t_{gnd} + t_{fl}} = \frac{365 \cdot 24 \cdot K_{serv}}{t_{gnd} + t_{fl}} = \frac{8760 \cdot K_{serv}}{t_{gnd} + t_{fl}}. \quad (2)$$

Based on the number of aircraft operating cycles per year (i.e. the number of aircraft take-offs (landings), n_{tcycle} the cycle duration t_{cycle} is determined:

$$t_{cycle} = \frac{8760 \cdot K_{serv}}{n_{tcycle}}. \quad (3)$$

The available time of day for performing flights depends on the K_{serv} serviceability indicator and is determined as $t_{day} = 24 \cdot K_{serv}$ [4, 5].

The number of cycles (flight preparation – flight) n_{tcycle} per year is determined by the expression [4, 5]:

The number of cycles n_{tcycle} , multiplied by the duration of a non-stop flight $\overline{t_{fl}}$, gives the desired value of the flight time for a certain i -th period of operation (day, month, quarter, year) $T_{ann.i}$ [4, 5], and taking into account formulas (2), (3), the flight time of an aircraft is determined by the expression:

$$T_{ann.i} = n_{tcyclei} \cdot \overline{t_{fl.i}} = \frac{\Phi_i \cdot K_{serv.i}}{t_{cyclei}} \cdot \overline{t_{fl.i}} = \frac{\Phi_i \cdot K_{serv.i}}{t_{gnd.i} + t_{fl.i}} \cdot \overline{t_{fl.i}}, \quad (4)$$

or per year of operation:

$$T_{ann} = n_{tcycle} \cdot \overline{t_{fl}} = \frac{365 t_{day}}{t_{cycle}} \cdot \overline{t_{fl}} = \frac{8760 \cdot K_{serv}}{t_{gnd} + t_{fl}} \cdot \overline{t_{fl}}, \quad (4')$$

where $T_{ann.i}$ – estimated flight time per an aircraft in the i -th operational period (hours);

$\overline{t_{fl.i}}$ – average flight duration according to the standard profile in the i -th operational period (hours);

$\overline{t_{gnd.i}}$ – average aircraft parking time at airports in the i -th operational period (hours);

$\overline{t_{cyclei}}$ – average operational cycle duration in the i -th operational period (hours);

Φ_i – time fund in the i -th operational period of the aircraft;

$K_{serv.i}$ – aircraft serviceability factor in the i -th operational period;

$n_{tcyclei}$ – number of “preparation-flight” cycles in the i -th operational period.

Formula (4) links all key parameters into a single system and can serve as a basic equation for further analytical calculations. It should be noted that the presented formula operates with average parameter values based on statistical data [2, 4, 5].

Based on quantitative requirements for the operational and technical characteristics of civil aviation aircraft under expected operating conditions, such as the aircraft’s flight duration according to the standard profile t_{fl} and the estimated annual flight time per aircraft T_{ann} , it is possible to derive calculation relationships that

allow one parameter, in particular t_{gnd} , to be determined with fixed values of the others.

For the estimated values of the annual flight time T_{ann} and the aircraft’s flight duration according to the standard profile t_{fl} (tab. 1), with the aircraft being technically serviceable, the possible ground parking duration t_{gnd} in the operational cycle can be calculated based on the transformed formulas (2), (3), and (4) presented above:

$$t_{gnd} = t_{cycle} - t_{fl} = \frac{8760 \cdot K_{serv} \cdot t_{fl}}{T_{ann}} - t_{fl}, \quad (5)$$

or

$$t_{gnd} = \frac{(8760 \cdot K_{serv} - T_{ann}) \cdot t_{fl}}{T_{ann}}. \quad (6)$$

Thus, the aircraft grounding duration t_{gnd} in the operational cycle depends on the serviceability K_{serv} , the flight duration t_{fl} and the aircraft flight time T_{ann} , i.e. $t_{gnd} = f(K_{serv}, T_{ann}, t_{fl})$.

Using the given expressions (2), (3), (4), the possible non-stop flight duration t_{fli} can also be calculated taking into account the planned flight time over a given aircraft operating period (possible annual flight time) $T_{ann.i}$ and the operational cycle duration t_{cyclei} over the same period (or the aircraft grounding duration t_{gnd}).

$$t_{fli} = \frac{T_{ann.i} \cdot t_{cyclei}}{\Phi_i \cdot K_{serv.i}} = \frac{T_{ann} \cdot t_{cycle}}{8760 \cdot K_{serv}} = \frac{T_{ann} \cdot t_{gnd}}{8760 \cdot K_{serv} - T_{ann}}. \quad (7)$$

The calculated values of the possible aircraft parking duration t_{gnd} for the calculated annual flight time T_{ann} and the aircraft flight duration according to the typical profile t_{fl} , as well as the possible number of operational aircraft operation cycles per year n_{tcycle} , with a technically serviceable aircraft are presented in Table 2. In this case, the maximum possible number of aircraft operation cycles per year n_{tcycle} corresponds to the minimum aircraft parking duration $t_{gnd.min}$.

For short-haul aircraft ($1.0 \leq t_{fl} < 1.5$ h) with 2,500 flight hours, the permissible parking duration is 2.5–3.76 hours, which allows for up to six

cycles per day. For long-haul aircraft ($t_{fl} > 5$ h) with 4,000 flight hours, the parking duration must be at least 5.95 hours, and the daily number of cycles is reduced to 1–2.

Using expressions (5), (6), it is possible to determine the range of aircraft parking duration values t_{gnd} depending on their class, taking into account the flight duration t_{fl} and the possible annual flight time T_{ann} (with a technically sound aircraft), as well as the number of possible aircraft operating cycles per year n_{tcycle} (tab. 3). It should be noted that, based on the calculated values of aircraft operating cycles n_{tcycle} it is also possible to calculate the technical service

Table 2

Values of the estimated duration of aircraft parking and the number of possible aircraft operating cycles

Flight duration according to typical profile t_{fl} , hours	Estimated annual flight time per an aircraft T_{ann} , hours	Estimated duration of aircraft parking t_{gnd} , hours	Duration of the operational cycle t_{cycle} , hours	Number of possible aircraft operating cycles per day $n_{tcycle\ day}$	Number of possible aircraft operating cycles per year n_{tcycle}
$1.0 \leq t_{fl} < 1.5$	2500	$2.504 \leq t_{gnd} < 3.756$	$3.504 \leq t_{cycle} < 5.256$	$n_{tcycle\ day} = 4 \dots 6$	$n_{tcycle} = 1666 \dots 2500$
$1.5 \leq t_{fl} < 2.5$	3000	$2.88 \leq t_{gnd} < 4.8$	$4.38 \leq t_{cycle} < 7.3$	$n_{tcycle\ day} = 3 \dots 5$	$n_{tcycle} = 1200 \dots 2000$
$2.5 \leq t_{fl} \leq 5$	3500	$3.757 \leq t_{gnd} \leq 7.514$	$6.257 \leq t_{cycle} \leq 12.514$	$n_{tcycle\ day} = 2 \dots 3$	$n_{tcycle} = 700 \dots 1400$
$t_{fl} > 5$	4000	$t_{gnd} > 5.95$	$t_{cycle} > 10.95$	$n_{tcycle\ day} = 1 \dots 2$	$n_{tcycle} \leq 800$

Table 3

Values of the estimated ground parking duration t_{gnd} , the number of possible aircraft operating cycles n_{tcycle} depending on the aircraft class

Aircraft class	Flight duration t_{fl} , hours	Possible annual flight time per aircraft T_{ann} , hours	Estimated aircraft ground parking duration t_{gnd} , hours	Duration of operational cycle t_{cycle} , hours	Number of possible aircraft operation cycles per day $n_{tcycle\ day}$	Number of possible aircraft operation cycles per year n_{tcycle}
Local Aircraft	0.5...1.0	1500...2500	2.42...2.504	2.92...3.504	6...8	2500...3000
Short Haul Aircraft	1.0...2.5	2500...3000	2.504...4.8	3.504...7.3	3...7	1200...2500
Medium Haul Aircraft	2.5...6.0	3000...3500	4.8...9.0	7.3...15.0	1...5	584...1200
Long Haul Aircraft	6.0...8.0 and more	3500...4500 and more	7.57...9.0	15...15.57	1	515...645

life of the aircraft and its components based on landings.

As the aircraft class and flight duration increase, significantly increasing the aircraft's grounding duration to meet the estimated flight time requires a sharp reduction in the number of cycles (landings) per year. For example, for long-haul aircraft, the number of cycles does not exceed 515–645 per year, which is critical for assessing their landing resource.

The obtained calculated values of the aircraft ground parking duration t_{gnd} in the operational cycle can be used to develop technological schedules for ground handling of newly designed aircraft of various classes, and to adjust them with due regard for the flight duration t_{fl} and estimated annual flight time T_{ann} . In doing so, it should be taken into account that the minimum parking duration $t_{gnd\ min}$ is constrained by the

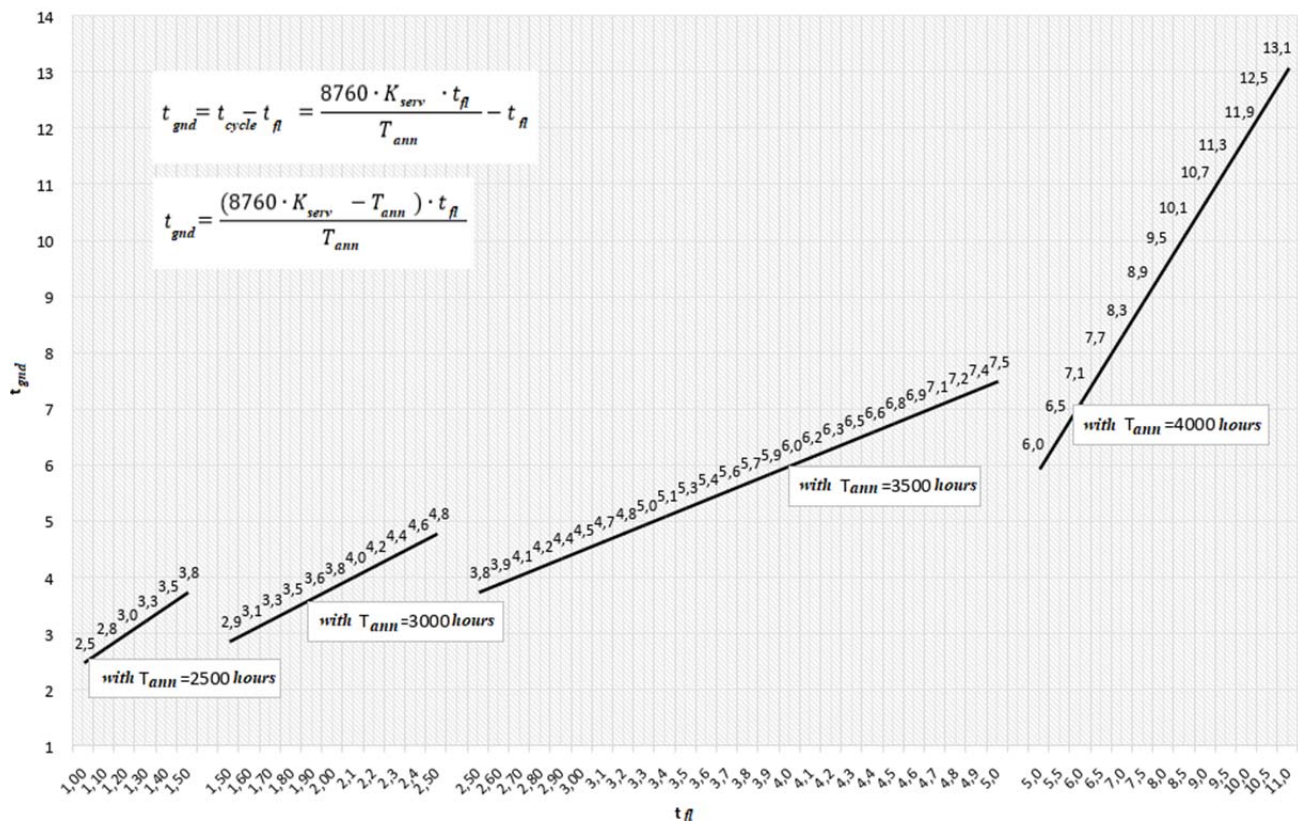


Fig. 2. Estimated duration of aircraft parking t_{gnd} depending on the estimated annual flight time $T_{ann} = \text{const}$ and the duration of the aircraft flight according to the typical profile t_{fl}

technological ground-handling schedule, while the maximum parking duration $t_{gnd \max}$ is limited by the serviceability coefficient K_{serv} , the estimated annual flight hours T_{ann} and the flight time t_{fl} of the aircraft.

The dependence of the calculated duration of aircraft parking t_{gnd} on the calculated values of the annual flight time $T_{ann} = \text{const}$ and the duration of the aircraft flight according to the typical profile t_{fl} , $t_{gnd} = f(K_{serv} = 1,0, T_{ann} = \text{const}, t_{fl} = \text{var})$ are presented in Figure 2.

As the aircraft flight time T_{ann} and flight duration t_{fl} increase over the estimated aircraft operating period, the number of operational cycles n_{cycle} decreases, leading to an increase in the potential grounding duration t_{gnd} . The aircraft grounding duration t_{gnd} in the operational operating cycle, with increasing flight duration t_{fl} can increase by a factor of 1.5 to 2, assuming a constant annual aircraft flight time

$T_{ann} = \text{const}$. Thus, with $T_{ann} = 2500$ h, and t_{fl} from 1.0 to 1.5 hours, t_{gnd} increases by a factor of 1.5, and with $T_{ann} = 4000$ h, and t_{fl} from 5.0 to 11 hours, t_{gnd} increases by a factor of 2 or more.

Figure 3 shows the dependence of aircraft grounding duration t_{gnd} on aircraft serviceability K_{serv} , assuming an estimated annual aircraft flight time T_{ann} and a specified flight duration t_{fl} .

A decrease in the aircraft serviceability factor K_{serv} necessitates a reduction in grounding time t_{gnd} to maintain the planned flight time. To ensure the aircraft's estimated technically feasible annual flight time T_{ann} the aircraft serviceability factor K_{serv} must not fall below 50–60 %. Under such conditions, the ground parking duration may decrease severalfold, which affects the maintenance operations performed during pre-flight preparations. Furthermore, with a flight duration along the typ-

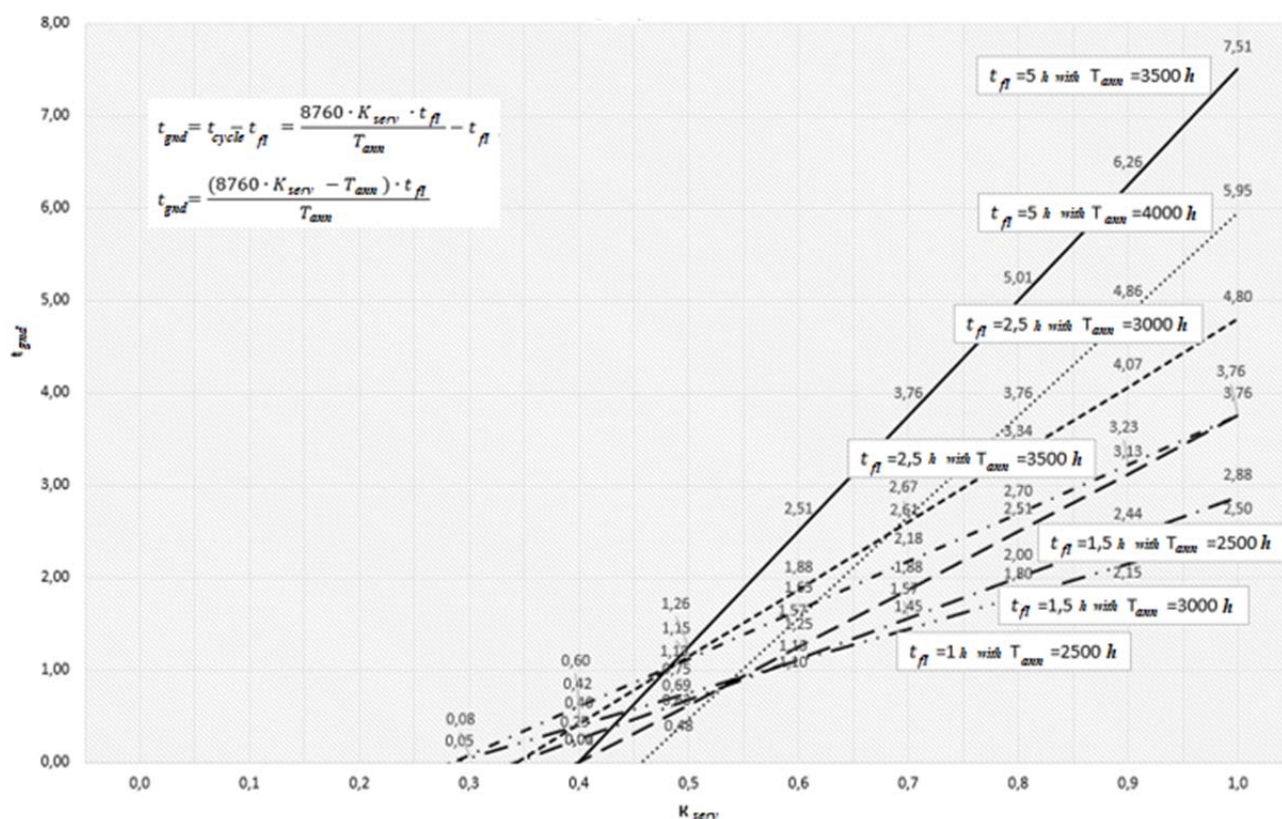


Fig. 3. Dependence of t_{gnd} on K_{serv} for the estimated annual flight time of the aircraft T_{ann} and the specified flight duration t_{fl}

Table 4

Aircraft ground parking duration at Irkutsk International Airport

Aircraft ground parking duration prior to initial departure $t_{gnd.init}$, hours	Aircraft ground parking duration arriving on a transit (turnaround) flight $t_{gnd.turn}$, hours	Aircraft ground parking duration arriving on a final flight $t_{gnd.term}$, hours	$\sum t_{gnd}$
1.0	0.83	0.77	2.6

ical profile $t_{fl} = 11$ h and $T_{ann} = 4000$ h, given a pre-flight preparation time $t_{gnd} = 13$ h, exceeding the flight time beyond 11 hours leads to an extension of the daily operational cycle of the aircraft. The higher the flight time T_{ann} and flight duration t_{fl} , the more stringent the aircraft's serviceability requirements must be.

In practice, the t_{gnd} value is established on the basis of standard technological aircraft maintenance schedules used in preparation for

departure at base, intermediate (transit) and final airports³.

As an example, Figure 4 presents the technological schedules for ground handling of aircraft at Irkutsk Airport, and Table 4 provides the parking duration values⁴.

Based on the planned flight time $T_{ann,i}$, the aircraft flight time $t_{fl,i}$, and the ground parking

³ STO ISM TG 4.1.2.1.03.05-19. (2019). Technological Schedules for Ground Handling of Aircraft at JSC International Airport Irkutsk. Introduced 2019-10-24. Irkutsk: JSC International Airport Irkutsk, 579 p. (in Russian)

⁴ Там же.



Technological schedule for ground handling of aircraft types CRJ-100, -200, Dash-8, E-170, -175, E-190-195, SSJ-100, F-50, -100, An-148, An-24, An-26 and their modifications, for departure (domestic flight).

Appendix No. 3.7
to STO ISM TG 4.1.2.1.03.05-19

		Start	End	Duration	Executor	1:00	0:50	0:40	0:30	0:20	0:10	0:00	departure
1	Installation of passenger stairs**	01:00	00:58	00:02	СОПП								
2	SAB mode	01:00	00:00	01:00	ПД								
3	Refuelling	00:56	00:38	00:18	ВСТК, ТЗК								
4	Inspection of baggage compartments	00:56	00:46	00:10	ПД								
5	Toilet servicing and water filling	00:54	00:38	00:16	СпоНО								
6	Cabin crew check-in	01:00	00:54	00:06	АК								
7	Flight crew check-in	00:46	00:40	00:06	АК								
8	Loading of onboard meals	00:54	00:38	00:16	САС								
9	Loading of cargo and mail	00:46	00:24	00:22	СОПП								
10	Aircraft readiness	-	00:20	-	ПДСА								
11	Cabin inspection (security check)	00:38	00:32	00:16	ПД								
12	Baggage loading	00:26	00:10	00:16	СОПП								
13	Passenger boarding	00:20	00:10	00:10	СпоНО								
14	Delivery of towbar	00:10	if needed		СпоНО								
15	Tug arrival	00:10	if needed		СпоНО								
16	Removal of passenger stairs**	00:08	00:06	00:02	СОПП								
17	Removal of wheel chocks	00:06	00:04	00:02	СпоНО								
18	Engine start	00:04	00:00	00:04	Экипаж								
19	De-icing and aircraft taxiing		if needed		СпоНО								

Note: Operations marked with ** are performed for Embraer-170/175 and Embraer-190/195.



Technological schedule for ground handling of aircraft types CRJ-100, -200, Dash-8, E-170, E-195, SSJ-100, F-50, -100, An-148, An-24, An-26 and their modifications, for turnaround (domestic flight)

Appendix No. 3.5
to STO ISM TG 4.1.2.1.03.05-19

		Start	End	Duration	Executor	arrival	0:50	0:40	0:30	0:20	0:10	0:00	departure
1	Aircraft arrival at parking stand, installation of chocks	-	00:50	не>15	СпоНО								
2	SAB mode	00:50	00:00	00:50	ПД								
3	Installation of passenger stairs**	00:50	00:48	00:02	СОПП								
4	Passenger disembarkation	00:48	00:40	00:08	СпоНО								
5	Baggage unloading	00:46	00:34	00:12	СОПП								
6	Cargo and mail unloading	00:46	00:34	00:12	СОПП								
7	Inspection of baggage compartments	00:34	00:28	00:06	ПД								
8	Cabin cleaning	00:40	00:28	00:12	СпоНО								
9	Removal of used in-flight meals	00:40	00:34	00:06	САС								
10	Refuelling	00:38	00:28	00:10	ВСТК, ТЗК								
11	Toilet servicing and water filling	00:38	00:28	00:10	СпоНО								
12	Cabin crew check-in	00:50	00:46	00:04	АК								
13	Flight crew check-in	00:50	00:46	00:04	АК								
14	Loading of in-flight meals	00:36	00:28	00:08	САС								
15	Cabin security inspection	00:28	00:20	00:06	ПД								
16	Aircraft readiness	-	00:20	-	ПДСА								
17	Cargo and mail loading	00:28	00:10	00:18	СОПП								
18	Baggage loading	00:22	00:10	00:12	СОПП								
19	Passenger boarding	00:20	00:10	00:10	СпоНО								
20	Delivery of towbar	00:10	if needed		СпоНО								
21	Removal of passenger stairs**	00:08	00:06	00:02	СОПП								
22	Removal of wheel chocks	00:06	00:04	00:02	СпоНО								
23	Engine start	00:04	00:00	00:04	Экипаж								
24	De-icing and aircraft taxiing		if needed		СпоНО								

Note: Operations marked with ** are performed for Embraer-170/175 and Embraer-190/195.

Fig. 4. Technological schedules for pre-departure ground handling of aircraft arriving on a transit (turnaround) flight and on a terminating flight, in accordance with the ground handling organization manual of Irkutsk International Airport

Executor abbreviations: СОПП – Passenger Handling Service; ПД – Apron Inspection; ВСТК – East Siberian Fuel Company; ТЗК – Fuel Refueling Complex; СпоНО – Ground Handling Service; АК – Airline; САС – Aviation Supply Service; СОПП – Passenger and Cargo Handling Service; ПДСА – Apron Security and Aviation Service; Экипаж – Crew, ПО – Security Service



International
Airport
Irkutsk

Appendix No.
to STO ISM TG 4.1.2.1.03.05-19

Technological schedule for ground handling of aircraft types CRJ-100, -200, Dash-8, E-170, E-195, SSJ-100, F-50, -100, An-148, An-24, An-26 and their modifications, for turnaround (domestic flight)

	Start	End	Duration	Executor	arrival	0:46	0:40	0:30	0:20	0:10	0:00
1 Aircraft arrival at parking stand, installation of chocks	-	00:46	не>15	СноНО							
2 Installation of passenger stairs**	00:46	00:44	00:02	СОПН							
3 Passenger disembarkation	00:44	00:34	00:10	СноНО							
4 Baggage unloading	00:42	00:26	00:16	СОПН							
5 Cargo and mail unloading	00:34	00:14	00:20	СОПН							
6 Cabin cleaning	00:26	00:10	00:22	СноНО							
7 Removal of used in-flight meals	00:30	00:20	00:10	CAC							
8 Toilet servicing and water draining	00:30	00:14	00:16	СноНО							
9 Removal of passenger stairs**	00:02	00:02	00:00	СОПН							
10 Handover of the aircraft to the Aviation Security Service	00:08	00:02	00:06	ПО							

Note: Operations marked with ** are performed for Embraer-170/175 and Embraer-190/195.

Continuation of Fig. 4. Technological schedules for pre-departure ground handling of aircraft arriving on a transit (turnaround) flight and on a terminating flight, in accordance with the ground handling organization manual of Irkutsk International Airport

Executor abbreviations: СОПН – Passenger Handling Service; ПД – Apron Inspection; BCTK – East Siberian Fuel Company; ТЗК – Fuel Refueling Complex; СноНО – Ground Handling Service; АК – Airline; CAC – Aviation Supply Service; СОПН – Passenger and Cargo Handling Service; ПДСА – Apron Security and Aviation Service; Экипаж – Crew, ПО – Security Service

duration $t_{gnd.i}$ (constrained by the technological ground-handling schedule), the minimum required serviceability factor $K_{serv.min.i}$ for

accomplishing the flight plan can be calculated using the transformed formula:

$$K_{serv.min.i} = \frac{T_{ann.i} \cdot t_{cyclei}}{\Phi_i \cdot t_{fl.i}} = \frac{T_{ann.i} \cdot (t_{gnd.i} + t_{fl.i})}{\Phi_i \cdot t_{fl.i}} = \frac{T_{ann} \cdot (t_{gnd} + t_{fl})}{8760 \cdot t_{fl}} \quad (8)$$

Figure 5 presents a graphical method for calculating the minimum required aircraft serviceability factor $K_{serv.min}$ to fulfill the annual flight plan using the example of short-haul aircraft, subject to $T_{ann} = 2500$ hours with different flight durations $t_{fl} = 1.0 \dots 2.5$ hours. A similar approach is applicable to calculating the minimum required serviceability ratio of aircraft of other classes.

The graph is constructed in the following sequence:

1. For the calculated values of annual flight time $T_{ann} = const$, aircraft flight duration according to a typical profile $t_{fl} = var$ and aircraft serviceability factor $K_{serv} = var$ the technically possible aircraft parking duration t_{gnd} is calculated using formulas (5), (6) and graphical dependencies $t_{gnd} = f(t_{fl}; K_{serv})$ are plotted.

2. A horizontal line corresponding to the normalized ground parking duration $t_{gnd std}$ (constrained by the technological ground-handling time of the aircraft, as given in Table 4) is plotted on the graph. At the intersections of this line with the curves representing the parking duration t_{gnd} the values of the minimum required serviceability factor $K_{serv.min.i}$ are determined. This coefficient can also be calculated by formula (8) taking into account the normalized parking duration $t_{gnd std}$.

Thus, for the considered example with $T_{ann} = 2500$ hours:

- for $t_{fl} = 2.5$ hours and $t_{gnd std} = 2.6$ hours, the minimum required serviceability coefficient is $K_{serv.min} = 0.58$;

- for $t_{fl} = 2$ hours and $t_{gnd std} = 2.6$ hours, the minimum required serviceability coefficient is $K_{serv.min} = 0.66$,

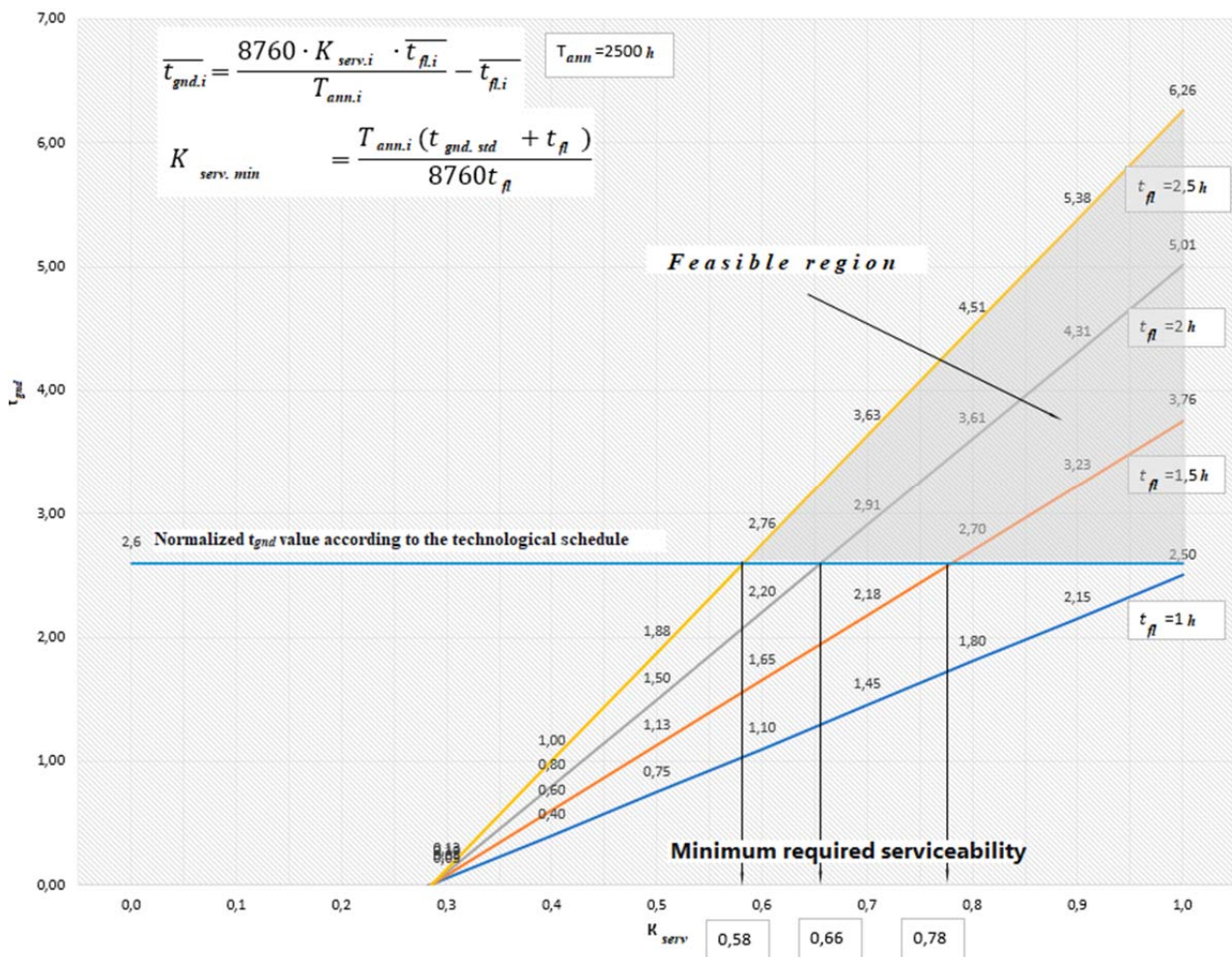


Fig. 5. Graphical determination of the minimum required serviceability coefficient $K_{serv.min}$ for short-haul aircraft at a standardized parking duration value $t_{gnd.std}$

- for $t_{fl} = 1.5$ hours and $t_{gnd.std} = 2.6$ hours, the minimum required serviceability coefficient is $K_{serv.min} = 0.78$,

- for $t_{fl} = 1$ hour and $t_{gnd.std} = 2.6$ hours, the minimum required serviceability coefficient is $K_{serv.min.i}$ exceeds 1.0, meaning that under these conditions, achieving the planned block hours $T_{ann} = 2500$ hours is impossible, since the calculated parking duration $t_{gnd} = 2.504$ hours (tab. 2) for a technically serviceable aircraft ($K_{serv} = 1.0$), is less than the normalized parking duration specified by the technological schedule $t_{gnd.std} = 2.6$ hours (tab. 4).

Based on the considered example, it can be concluded that to ensure a planned flight time of $T_{ann.i} = 2500$ hours with $t_{fl} = var$ it is necessary

to maintain the aircraft serviceability level no lower than the calculated value $K_{serv.min}$.

It should be noted that in this case, the minimum required aircraft serviceability factor is calculated for a single aircraft, whereas when planning the production activities of an airline, the minimum required aircraft serviceability factor should be taken into account based on the average fleet size, taking into account departing and arriving aircraft [15].

The range of permissible values for the parking duration t_{gnd} will be limited by the standardized parking duration according to the technological schedule of standards $t_{gnd.std}$ and the calculated value t_{gnd} . Moreover, the difference between these standard indicators

$\Delta t_{gnd} = t_{gnd} - t_{gnd\ std}$ provides a reserve time necessary to eliminate various organizational, technical, weather, and other causes of aircraft flight delays. This time buffer is a fundamental element in the operational risk management system [16–18]. A study by the Bureau of Transportation Statistics (BTS) on the causes of flight delays in 2020 found that 41% of delays were caused by airline disruptions, including maintenance issues [19].

As an example, let's calculate the reserve time. With an aircraft serviceability of 80%, a planned flight time of $T_{ann,i} = 2500$ hours, and a flight duration of $t_{fl} = 2.5$ hours, the parking duration can be $t_{gnd} = 4.51$ hours (fig. 5), and with a standardized parking duration (limited by the technological time of aircraft ground maintenance) $t_{gnd\ std} = 2.6$ hours. Consequently, the aircraft downtime reserve for eliminating operational failures will be equal to $\Delta t_{gnd} = 1.91$ hours (42% of the estimated parking duration). It is important to note that this reserve does not prevent departure delays, but it is critically important for achieving the total annual planned flight time. This is especially relevant in light of BTS data for 2019, according to which 18.87% of flights were delayed by more than 15 minutes [19].

Discussion

The conducted study demonstrates a sophisticated level of integration of operational and technological parameters in the aircraft maintenance system. The presented methodology goes beyond a formal description of the relationships and provides a practical tool for analyzing management tradeoffs in airline planning.

The fundamental physical relationship under consideration (4) represents a theoretical model of the general dependence of the planned annual flight time on the operational cycle parameters and aircraft serviceability $T_{ann} = f(K_{serv}, t_{gnd}, t_{fl})$. The aircraft flight time T_{ann} is the dependent variable, and its value is limited by preparation time and serviceability. This formula is widely known among leading

specialists in the field of technical maintenance; it explains the basic principles of calculating technically feasible annual flight time and is used as a basis for creating management standards, strategic planning, and for analyzing the performance of airlines. It should be noted that in this formula (4) the operating cycle parameters are averaged based on empirical data on aircraft operation and are of a statistical nature [13, 15].

The maintenance system management is carried out in a “top-down” manner, based on averaged aircraft operational data, with the question being posed: “What level of resources is required to achieve the result?” That is, a search is conducted for the optimal balance among inter-related parameters in order to maximize flight hours (a statistical management approach).

The methodology presented by the authors is deterministic in nature and is based on engineering principles, where achieving the planned flight hours is considered a function of the specified operational cycle parameters. The proposed methodology, based on the basic formula (4), establishes the inverse relationships $t_{gnd} = f(K_{serv}, T_{ann}, t_{fl})$, $t_{fl} = f(K_{serv}, T_{ann}, t_{gnd})$, $K_{serv} = f(t_{gnd}, T_{ann}, t_{fl})$. This decomposition of the system into elements is based on the physical and technological limitations of the aircraft (flight time, preparation time, and specified flight hours), with flight hours being considered an independent, specified variable. The proposed methodology offers a mechanism for achieving these target indicators. It transforms the standard indicator T_{ann} from a static control plane to a dynamic operational management plane, answering the key question: “By what means and under what conditions can the specified flight time be achieved?” (an engineering-deterministic approach). The developed mathematical model can be used for two-way management of the maintenance system: both “top-down” (from planned indicators to operational tasks) and “bottom-up” (through monitoring the achievement of planned flight time, i.e., from monitoring execution to adjusting the plan).

A system of equations (5), (6), (7), (8) based on academic formulas (1), (2), (3), (4) forms

an analytical basis for informed decision-making. It allows:

- to quantitatively assess the effect of changes in parameters such as flight duration (t_{fl}), ground parking duration (t_{gnd}) and the serviceability coefficient (K_{serv}), on the key performance indicator—annual flight hours (T_{ann});
- to model various operating scenarios, conducting “what-if” analyses to assess the consequences of changes in schedules, maintenance technology, or fleet condition;
- to achieve significant operational flexibility for long-haul airlines by having more time available for ground handling without compromising scheduled flight hours, while for short-haul routes, imposing increased demands on the accuracy of planning and synchronization of all ground processes due to time constraints;
- to identify the systemic gap between the technologically standard ($t_{gnd\ std}$) and estimated (t_{gnd}) parking times, which represents a hidden reserve of operational efficiency that can be used to improve flight regularity, compensate for unforeseen delays, and optimize personnel and equipment utilization;
- to move to proactive risk management based on the minimum required availability factor ($K_{serv.min}$, fig. 5) which provides a clear quantitative benchmark and direct management indicator for airline services, enabling early schedule adjustments, reallocation of maintenance and repair resources, or fleet renewal planning.

Despite its practical value, the proposed methodology has a number of limitations that limit its future development:

1. The model is deterministic in nature and operates on calculated values, whereas in reality, key parameters (flight duration, ground handling time, and overhaul intervals) are probabilistic [17, 20–23]. This limits the accuracy of forecasts under uncertainty.
2. The model does not fully account for:
 - seasonal and daily variations in aircraft operation, when minimum parking requirements become critical during peak hours;
 - the impact of periodic maintenance procedures that take aircraft out of service for extended periods and directly impact K_{serv} .

Despite some simplifications, the proposed methodology not only allows for the calculation of specific numerical parameters for new aircraft, resource assessment, and operational planning, answering the question: “How can operational management be organized to ensure the aircraft achieves the required flight time?” but also for diagnosing problems, assessing risks, and substantiating requirements for newly developed aircraft and ground operations.

Conclusion

This article is an excerpt from a scientific and methodological study devoted to key aspects of aircraft maintenance efficiency management. The work is applied in nature and draws on existing regulatory frameworks and the works of leading scientists in the field of aircraft maintenance.

According to the authors, the study achieved its objective and allowed the development of a methodology for quantitative analysis of the aircraft operating cycle aimed at ensuring planned annual flight hours. The following key conclusions were formulated based on the results of the study:

1. Estimated values for the potential aircraft parking duration at airports t_{gnd} along with quantitative parameters of expected operating conditions such as the aircraft flight duration according to the typical profile t_{fl} , and the estimated annual flight hours T_{ann} can reflect the technical excellence of the aircraft and its operational documentation and serve as input for the design of new aircraft and airline operational planning.
2. Calculations have shown that, as flight duration increases (when transitioning from local airliners to long-haul aircraft), achieving the standard annual flight time requires a significant increase in grounding time (by 1.5–2 times) while simultaneously sharply reducing the number of operational cycles (from 2500–3000 to 515–645 per year). This determines fundamentally different approaches to organizing maintenance for different aircraft classes.

3. It has been shown that for aircraft with high annual flight time and long flight duration, the requirements for the serviceability factor are extremely stringent. A decrease in K_{serv} below 50–60% makes it impossible to fulfill the planned flight time, since the required grounding time becomes less than the technologically feasible minimum.

4. A practical method for determining the minimum required serviceability is proposed. Using short-haul aircraft as an example, it was demonstrated that to achieve 2500 flight hours with a technical standstill standard of 2.6 hours, the minimum availability factor should be between 0.58 and 0.78, depending on the flight duration. A case ($t_{fl} = 1$ hour) is identified in which the plan cannot be fulfilled, thus avoiding unrealistic planning.

5. The operational reserve indicator was introduced and quantified. Determining the downtime reserve (Δt_{gnd}) allows airlines to assess their resilience to operational disruptions and delays (crew delays, tow truck delays, extended inspections, etc.). The presence of such a reserve (for example, 1.91 hours in the case under consideration) serves as a safeguard to ensure flight regularity.

The presented methodology can serve as a practical tool for aligning an airline's strategic goals with its operational capabilities, enabling quantitative justification of management decisions, identifying bottlenecks, and assessing risks. Despite its limitations, the model provides a reliable analytical foundation for the further development of decision support systems, improving service regularity, and enhancing the economic sustainability of airlines in an increasingly competitive environment. A formalized, deterministic framework is proposed to complement traditional statistical methods in aircraft performance management.

References

1. **Daletskiy, S.V.** (2005). Formation of operational and technical characteristics of civil aviation aircraft. Moscow: Vozdushnyy transport, 416 p. (in Russian)
2. **Daletskiy, S.V., Derkach, O.Ya., Petrov, A.N.** (2002). Efficiency of technical operation of civil aviation aircraft. Moscow: Vozdushnyy transport, 216 p. (in Russian)
3. **Daletskiy, S.V.** (2002). Formation of characteristics of the civil aviation aircraft maintenance system: D. Tekh. Sc. Thesis. Moscow: GosNII GA, 466 p. (in Russian)
4. **Smirnov, N.N., Vladimirov, N.I., Chernenko, Zh.S. et al.** (1990). Technical operation of aircraft, Edited by Smirnov N.N. Moscow: Transport, 423 p. (in Russian)
5. **Smirnov, N.N., Chinyuchin, Yu.M.** (2015). Fundamentals of the theory of technical operation of aircraft: Textbook. Moscow: MGTU GA, 579 p. (in Russian)
6. **Sriram, C., Haghani, A.** (2003). An optimization model for aircraft maintenance scheduling and re-assignment. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 37, issue 1, pp. 29–48. DOI: 10.1016/S0965-8564(02)00004-6
7. **Ryabinin, A.L.** (2001). Methodology for forming requirements for operational and technical characteristics of onboard equipment based on mathematical modeling to reduce total operating costs of civil aircraft: Kand. tekhn. Sc. Thesis. Moscow, 198 p. (in Russian)
8. **Xu, Y.** (2024). Perspectives on modeling airline integrated scheduling problem: a review on state-of-the-art methodologies. *Journal of the Air Transport Research Society*, vol. 3, ID: 100023. DOI: 10.1016/j.jatrs. 2024.100023 (accessed: 10.08.2025).
9. **Chinyuchin, Yu.M., Oidov, N.** (2017). The task of continuing airworthiness on the basis of monitoring resource status. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 20, no. 3, pp. 110–121. (in Russian)
10. **Baev, N.A., Derkach, O.Ya., Kaplan, V.L. et al.** (2012). Operational and technical characteristics and support for the operation of aviation equipment, in Petrov A.N. (Ed.), Moscow: Shirokiy vzglyad, 140 p. (in Russian)
11. **Petrov, A.N., Poltavets, V.A., Svinarchuk, A.I., Kaplan, V.L., Yaloza, Yu.A.** (2012). Development and implementation of general requirements for the operational and technical characteristics of advanced aircraft.

Bezopasnost i nadezhnost aviatsionnoy tekhniki: sbornik statey. Zhukovsky: LII im. M.M. Gromova, pp. 19–26. (in Russian)

12. Chinyuchin, Yu.M., Dodonov, K.N. (2012). Making a simulation model of process of functioning aircraft maintenance system in optimum situation. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 178, pp. 58–64. (in Russian)

13. Vardanyan, G.B., Kochetov, A.S., Petrov, Yu.V., Ugreninov, V.G. (2023). Probabilistic approach to the assessment of the accuracy and reliability of the operational and technical characteristics of aircraft. *Science. Nauka. Tekhnika. Chelovek: istoricheskiye, mirovozzrencheskiye i metodologicheskiye problem*, no. 1 (13), pp. 365–370. (in Russian)

14. Chinyuchin, Ju.M., Oydov, N. (2020). Monitoring the resource status of the fleet of mainline aircraft in the tasks of maintaining their airworthiness in the conditions of Russian and Mongolian airlines: Monograph. Moscow: MGTU GA, 124 p. (in Russian)

15. Kondratieva, M.A., Kuznetsov, S.N., Fryazinov, A.V. (2024). Aircraft serviceability taking into account the average headcount in an airline. In: *Aktualnyye problemy i perspektivy razvitiya grazhdanskoy aviatsii: materialy XIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Irkutsk: MGTU GA, pp. 18–27. (in Russian)

16. Aleksanyan, A.R., Fainburg, I.A., Evdokimova, A.D. (2018). Complex technology of improvement the process of aircraft maintenance efficiency. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 21, no. 2, pp. 143–152. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-2-143-152 (in Russian)

17. Drovosekov, I.V., Matyukhin, K.N. (2024). Analysis of methods used to assess the timeliness of civil aviation aircraft departure in conditions of uncertainty of external factors. *Nauchno-issledovatel'skiye publikatsii*, no. 6, pp. 13–15. (in Russian)

18. Wu, C., Caves, R.E. (2004). Modelling and optimization of aircraft turnaround time at an airport. *Transportation Planning and Technology*, vol. 27, no. 1, pp. 47–66. DOI: 10.1080/0308106042000184454

19. He, Y., Ma, H.-L., Park, W.-Y., Liu, S.Q., Chung, S.-H. (2023). Maximizing

robustness of aircraft routing with heterogeneous maintenance tasks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 177, ID: 103237. DOI: 10.1016/j.tre.2023.103237 (accessed: 10.08.2025).

20. Daletskiy, S.V., Daletskiy, S.S. (2017). Graphical models of the aircraft maintenance process. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 20, no. 1, pp. 36–44. (in Russian)

21. Aleksanyan, A.R., Itskovich, A.A., Evdokimova, A.D. (2017). Actualization of methodic of calculation of actual indicator of civil aircraft dispatch reliability. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 20, no. 6, pp. 81–88. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-6-81-88 (in Russian)

22. Nikolaev, S.V. (2019). Aircraft timely departure probability technique. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 22, no. 5, pp. 94–106. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-5-94-106 (in Russian)

23. Terentev, V.B. (2019). The probability determination of the aircraft timely departure. *Avtomatizatsiya. Sovremennyye Tekhnologii*, vol. 73, no. 8, pp. 362–367. (in Russian)

Список литературы

1. Далецкий С.В. Формирование эксплуатационно-технических характеристик воздушных судов гражданской авиации. М.: Воздушный транспорт, 2005. 416 с.

2. Далецкий С.В., Деркач О.Я., Петров А.Н. Эффективность технической эксплуатации самолетов гражданской авиации. М.: Воздушный транспорт, 2002. 216 с.

3. Далецкий С.В. Формирование характеристик системы технической эксплуатации воздушных судов гражданской авиации: дисс. ... докт. техн. наук. М.: ГосНИИ ГА, 2002. 466 с.

4. Смирнов Н.Н., Владимиров Н.И., Черненко Ж.С. и др. Техническая эксплуатация летательных аппаратов / Под ред. Н.Н. Смирнова. М.: Транспорт, 1990. 423 с.

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

6. **Sriram C., Haghani A.** An optimization model for aircraft maintenance scheduling and re-assignment // *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. 2003. Vol. 37, iss. 1. Pp. 29–48. DOI: 10.1016/S0965-8564(02)00004-6

7. **Рябинин А.Л.** Методика формирования требований к эксплуатационно-техническим характеристикам бортового оборудования на основе математического моделирования из условия снижения суммарных расходов на эксплуатацию гражданских воздушных судов: дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2001. 198 с.

8. **Xu Y.** Perspectives on modelling airline integrated scheduling problem: a review on state-of-the-art methodologies [Электронный ресурс] // *Journal of the Air Transport Research Society*. 2024. Vol. 3. ID: 100023. DOI: 10.1016/j.jatrs.2024.100023 (дата обращения: 10.08.2025).

9. **Чинючин Ю.М., Ойдов Н.** К задачам поддержания летной годности воздушных судов на основе мониторинга их ресурсного состояния // *Научный вестник МГТУ ГА*. 2017. Т. 20, № 3. С. 110–121.

10. **Баев Н.А., Деркач О.Я., Каплан В.Л. и др.** Эксплуатационно-технические характеристики и обеспечение эксплуатации авиационной техники / Под. ред. А.Н. Петрова. М.: Широкий взгляд, 2012. 140 с.

11. **Петров А.Н.** Разработка и внедрение общих требований к эксплуатационно-техническим характеристикам перспективных воздушных судов / А.Н. Петров, В.А. Полтавец, А.И. Свиначук, В.Л. Каплан, Ю.А. Ялоза // *Безопасность и надежность авиационной техники: сборник статей*. Жуковский: ЛИИ им. М.М. Громова, 2012. С. 19–26.

12. **Чинючин Ю.М., Додонов К.Н.** Построение имитационной модели процесса функционирования системы наземного обслуживания воздушных судов в штатной ситуации // *Научный вестник МГТУ ГА*. 2012. № 178. С. 58–64.

13. **Варданян Г.Б.** Вероятностный подход к оценке точности и достоверности эксплуатационно-технических характеристик воздушных судов / Г.Б. Варданян, А.С. Кочетов, Ю.В. Петров, В.Г. Угренинов // *Наука.*

Техника. Человек: исторические, мировоззренческие и методологические проблемы. 2023. Т. 1, № 13. С. 365–370.

14. **Чинючин Ю.М., Ойдов Н.** Мониторинг ресурсного состояния парка магистральных самолетов в задачах поддержания их летной годности в условиях российских и монгольских авиакомпаний: монография. М.: МГТУ ГА, 2020. 124 с.

15. **Кондратьева М.А., Кузнецов С.Н., Фрязинов А.В.** Исправность воздушных судов с учетом среднесписочной численности в авиапредприятии // *Актуальные проблемы и перспективы развития гражданской авиации: материалы XIII Международной научно-практической конференции*. Иркутск, 10–11 октября 2024 г. Иркутск: МГТУ ГА, 2024. С. 18–27.

16. **Алексаян А.Р., Файнбург И.А., Евдокимова А.Д.** Комплексная технология повышения эффективности процесса технической эксплуатации воздушных судов // *Научный вестник МГТУ ГА*. 2018. Т. 21, № 2. С. 143–152. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-2-143-152

17. **Дровосеков И.В., Матюхин К.Н.** Анализ методов, применяемых для оценки своевременности вылета воздушного судна гражданской авиации в условиях неопределенности внешних факторов // *Научно-исследовательские публикации*. 2024. № 6. С. 13–15.

18. **Wu C., Caves R.E.** Modelling and optimization of aircraft turnaround time at an airport // *Transportation Planning and Technology*. 2004. Vol. 27, no. 1. Pp. 47–66. DOI: 10.1080/0308106042000184454

19. **He Y.** Maximizing robustness of aircraft routing with heterogeneous maintenance tasks / Y. He, H.-L. Ma, W.-Y. Park, S.Q. Liu, S.-H. Chung [Электронный ресурс] // *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2023. Vol. 177. ID: 103237. DOI: 10.1016/j.tre.2023.103237 (дата обращения: 10.08.2025).

20. **Далецкий С.В., Далецкий С.С.** Графические модели процесса технической эксплуатации воздушных судов // *Научный вестник МГТУ ГА*. 2017. Т. 20, № 1. С. 36–44.

21. Алексанян А.Р., Ицкович А.А., Евдокимова А.Д. Актуализация методики расчета фактического показателя надежности вылетов гражданских воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 6. С. 81–88. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-6-81-88

22. Николаев С.В. Методика расчета вероятности своевременного вылета летатель-

ного аппарата // Научный вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22, № 5. С. 94–106. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-5-94-106

23. Терентьев В.Б. Определение вероятности своевременного вылета летательного аппарата // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73, № 8. С. 362–367.

Information about the authors

Marina A. Kondratieva, Deputy Dean of the Aircraft Operation Faculty, Irkutsk Branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation, marina_mgtu@mail.ru.

Sergey N. Kuznetsov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Aircraft Operation Faculty, Irkutsk Branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation, sergei20320@mail.ru.

Alexander V. Fryazinov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Aircraft and Engines Chair, Irkutsk Branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation, a.fryazinov@internet.ru.

Сведения об авторах

Кондратьева Марина Александровна, заместитель декана факультета эксплуатации летательных аппаратов Иркутского филиала МГТУ ГА, marina_mgtu@mail.ru.

Кузнецов Сергей Николаевич, кандидат технических наук, доцент, декан факультета эксплуатации летательных аппаратов Иркутского филиала МГТУ ГА, sergei20320@mail.ru.

Фрязинов Александр Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры летательных аппаратов и двигателей Иркутского филиала МГТУ ГА, a.fryazinov@internet.ru.

Поступила в редакцию
Одобрена после рецензирования
Принята в печать

24.10.2025
02.12.2025
23.07.2026

Received
Approved after reviewing
Accepted for publication

24.10.2025
02.12.2025
23.07.2026

УДК 621.396.96

DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-46-62

Концепция автоматизированной системы управления поддержанием летной годности с элементами искусственного интеллекта

С.С. Подосенов¹, О.Г. Феоктистова²

¹ «ОС-Технолоджи», г. Москва, Россия

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

Аннотация: В статье представлена концепция автоматизированной системы управления поддержанием летной годности (АСУ ПЛГ), интегрирующей элементы искусственного интеллекта. Цель исследования – разработка архитектурного подхода, обеспечивающего сквозную обработку эксплуатационных данных (телеметрия, ERP, OEM) для формирования обоснованных рекомендаций по техническому обслуживанию при сохранении ключевой роли и ответственности инженерного персонала. В основе методологии лежит принцип многоуровневой архитектуры, включающей слой сбора гетерогенных данных, аналитическое ядро на основе ансамбля моделей (LSTM-сети, анализ выживаемости по Коксу, распределение Вейбулла) и слой поддержки решений с обязательным контролем со стороны человека через механизм Human Verification Gateway. В результате предложена концепция системы, направленная на реализацию предиктивной аналитики для оценки риска отказов критических компонентов и оптимизации графиков технического обслуживания методами целочисленного программирования. Ключевым принципом является подчиненная роль ИИ, выступающего в качестве инструмента анализа, а не автономного лица, принимающего решения, что соответствует требованиям нормативной базы. Основной вывод заключается в том, что предложенный концептуальный подход создает теоретическую основу для перехода от регламентного к предиктивно-оптимизационному обслуживанию, потенциально способствуя повышению эксплуатационной готовности воздушных судов за счет проактивного планирования работ. Концепция предусматривает интеграцию с цифровыми двойниками и нормативной документацией, формируя ориентир для развития сервисно ориентированных моделей технического обслуживания в авиации.

Ключевые слова: поддержание летной годности, искусственный интеллект, предиктивное техническое обслуживание, анализ выживаемости, распределение Вейбулла, цифровой двойник, оптимизация ресурсов, авиационная безопасность.

Для цитирования: Подосенов С.С., Феоктистова О.Г. Концепция автоматизированной системы управления поддержанием летной годности с элементами искусственного интеллекта // Научный вестник МГТУ ГА. 2026. Т. 29, № 4. С. 46–62. DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-46-62

The concept of an automated airworthiness management system with elements of artificial intelligence

S.S. Podosenov¹, O.G. Feoktistova²

¹OS-TECH, Moscow, Russia

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

Abstract: This article presents a concept for an automated airworthiness management system (AAMXS) that integrates elements of artificial intelligence (AI). The aim of this work is to develop an architectural approach that ensures end-to-end processing of operational data (telemetry, ERP, OEM) to formulate well-founded recommendations for maintenance while maintaining the key role and responsibility of engineering personnel. The methodology is based on the multi-level architecture principle, that includes a heterogeneous data collection layer, an analytical core based on the ensemble of models (LSTM networks, Cox survival analysis, Weibull distribution), and a decision support layer with mandatory human control through the Human Verification Gateway mechanism. As a result, a system concept is proposed, aimed at implementing predictive analytics to assess the risk of critical

component failures and to optimize maintenance schedules using integer programming methods. The key principle is the subordinate role of AI, acting as an analysis tool rather than an autonomous decision-maker, which meets the requirements of the regulatory framework. The main conclusion is that the proposed conceptual approach creates a theoretical basis for the transition from scheduled to predictive-optimized maintenance, potentially contributing to improving aircraft operational readiness through proactive work planning. The concept provides for integration with digital twins and regulatory documentation, forming a guideline for the development of service-oriented maintenance models in aviation.

Keywords: continued airworthiness, artificial intelligence, predictive maintenance, survivability analysis, Weibull distribution, digital twin, resource optimization, aviation safety.

For citation: Podosenov, S.S., Feoktistova, O.G. (2026). The concept of an automated airworthiness management system with elements of artificial intelligence. Civil Aviation High Technologies, vol. 29, no. 4, pp. 46–62. DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-46-62

Введение

Среди динамических систем, в которых для повышения эффективности управления может быть использован прогноз, значительное место занимают системы обслуживания сложных технических объектов [1, 2]. Примером такого объекта является как воздушное судно в целом, так и его функциональные системы и их изделия в частности, туда же можно отнести и систему для поддержания летной годности с элементами искусственного интеллекта.

Концепция системы основана на принципах, изложенных в работе Ю.М. Чинючина [3], где представлена «пирамида летной годности», включающая три основных участника системы поддержания летной годности: разработчика (ОКБ), изготовителя и эксплуатанта. В данной системе этот принцип реализован через интеграцию данных от всех участников: нормативно-технической документации от разработчиков, данных о производстве от изготовителей и эксплуатационной информации от авиакомпаний.

Настоящая концепция опирается на современные методологические подходы к поддержанию летной годности, в которых ключевое значение придается эксплуатационной фазе жизненного цикла воздушных судов (ВС) [4]. Согласно существующим исследованиям, до 65 % всего жизненного цикла ВС приходится именно на эксплуатацию [5]. Это обуславливает принципиальную важность создания инструментов, ориентированных на мониторинг технического состояния и управление им в реальных эксплуатационных

условиях, что и является одной из центральных задач предлагаемой концепции автоматизированной системы управления поддержанием летной годности (АСУ ПЛГ).

Особую актуальность разработке придает проблема отсутствия механизма, способного контролировать выполнение требований поддержания летной годности ВС и обеспечения безопасности полетов, заложенных в авиационных правилах [5]. Предлагаемая АСУ ПЛГ реализует именно такой механизм непрерывного мониторинга и поддержки летной годности.

Концептуально АСУ ПЛГ представляет собой систему, целью которой является переход от реактивного (регламентного) технического обслуживания (ТО) к предиктивно-оптимизационному. Для достижения этой цели предполагается использование следующих основных компонентов:

- сбор и консолидация данных из гетерогенных источников (телеметрия, ERP, OEM, реестры регуляторов, результаты осмотров);
- аналитическое ядро на основе ансамбля моделей (LSTM-сети для временных рядов, анализ выживаемости по Коксу для индивидуального прогноза риска, распределение Вейбулла для оценки базовой надежности компонентов);
- модуль оптимизации на основе целочисленного программирования для формирования графиков ТО с учетом ресурсных ограничений;
- обязательная верификация всех рекомендаций инженером через механизм Human Verification Gateway, что обеспечивает соот-

ветствие нормативным требованиям и сохраняет ответственность персонала.

Методы и методология

Предлагаемая концепция автоматизированной системы управления поддержанием летной годности основывается на принципе сквозной обработки информации – от сбора первичных данных до формирования обоснованных рекомендаций для инженерно-технического персонала. Ключевой методологической основой концепции является предлагаемая многоуровневая архитектура (рис. 1), которая должна обеспечить интеграцию разнородных данных и комплексную аналитику при безусловном приоритете человеческого контроля над всеми управляющими решениями.

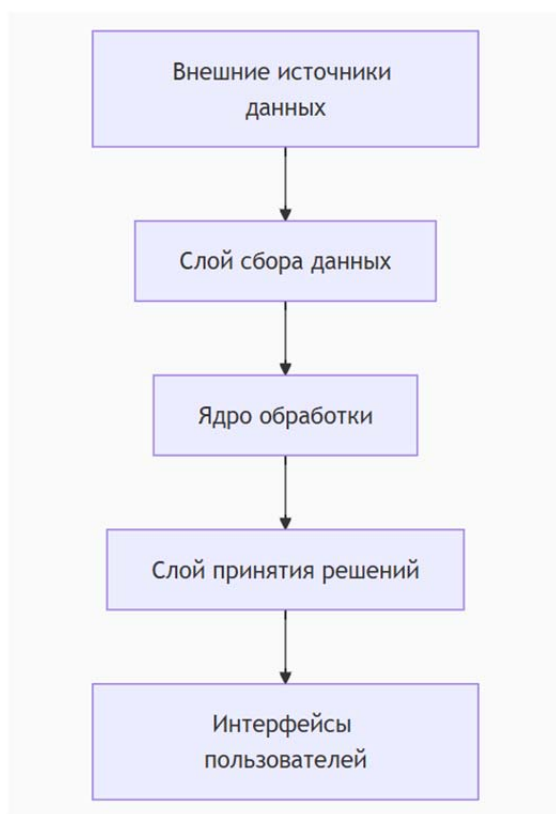


Рис. 1. Многоуровневая архитектура
Fig. 1. Multi-level architecture

В основе предложенной архитектуры лежат принципы многоуровневых экспертных систем [6], предполагающие разделение по-

верхностных знаний (правила диагностики и рекомендации) и глубинных знаний (прогнозные модели и алгоритмы). Такое разделение обеспечивает гибкость и интерпретируемость решений, что полностью соответствует заложенному в концепцию взаимодействию модуля прогнозирования и рекомендательной системы.

Фундаментом для предиктивных оценок служит совокупность данных из источников – бортовых систем, ERP, OEM, реестров регуляторов (ФАВТ), а также данных ручного ввода (осмотры, NDT). Это позволяет создать единую информационную среду и преодолеть фрагментацию данных [5]. Согласно концепции аналитическое ядро должно отвечать за обработку данных и генерацию предиктивных оценок. Предполагаемый состав ключевых модулей и их целевые функции представлены в табл. 1, а детальный разбор ключевых из них, таких как модель прогнозирования отказов на основе анализа выживаемости, приводится в табл. 2.

Модуль прогнозирования отказов использует ансамбли моделей для повышения точности оценок. Например, для двигателя ПС-90А применяется комбинация LSTM-сетей для анализа временных рядов параметров (температура газов EGT, уровень вибрации), анализа выживаемости для оценки остаточного ресурса с учетом цензурированных данных и физически информированных моделей (Physics-Informed ML), корректирующих прогнозы на основе фундаментальных термодинамических закономерностей.

Для иллюстрации принципов работы, заложенных в концепцию, рассмотрим гипотетический сценарий. Предположим, что в ходе мониторинга параметров гидросистемы Boeing 737 выявляется устойчивый рост температуры гидрожидкости в сочетании с увеличением времени наполнения гидроаккумулятора – признаки, характерные для снижения производительности гидронасоса. В рамках концепции предполагается, что система могла бы выполнить такую последовательность анализа: провести сравнение симптомов с базой исторических инцидентов (например, используя метод FTA), осуще-

Таблица 1
Table 1

Ключевые модули аналитического ядра системы и их функции
The key modules of the system analytical core and their functions

Модуль	Технологии	Выходные данные
Предобработки данных	Apache Spark, Python Pandas	Очищенные временные ряды
Прогнозирования отказов	LSTM-сети, Prophet, Survival Analysis	Риск-оценка компонентов (Failure Probability Index)
Оптимизации ресурсов	Линейное программирование (PuLP), генетические алгоритмы	Графики ТО с учетом приоритетов
Цифровой двойник	ANSYS Twin Builder, Unity3D	3D-модель ВС с маркерами износа

свить автоматическую проверку на соответствие актуальным нормативным требованиям (таким как директива EASA 2023-012R13) и на этой основе сформировать структурированную рекомендацию для инженера. Примером такой рекомендации могла бы служить запись: «Рекомендуется рассмотреть замену гидронасоса в течение 50 циклов. Возможная альтернатива: деталь P/N 65-1234 (аналог OEM)». Данный сценарий иллюстрирует, как концепция предусматривает не только диагностику проблемы, но и поддержку принятия решения с учетом операционной логики и нормативной базы.

На рис. 2 представлена UML-диаграмма компонентов системы, демонстрирующая:

- взаимодействие между Data Acquisition Layer и Core Engine через Apache Kafka;
- использование Kubernetes для оркестрации микросервисов в Core Engine;
- механизм одобрения решений (Human Verification Gateway) в Decision Support Layer;
- интеграцию с внешними системами через REST API.

Взаимодействие персонала с системой осуществляется через специализированный

интерфейсный слой. Его ключевым элементом является веб-дашборд, предоставляющий инженерно-техническим сотрудникам не только наглядную визуализацию состояния парка ВС, но и инструменты для управления процессом ТО. Веб-дашборд обеспечивает визуализацию состояния парка ВС (включая цветовую маркировку износа на интерактивных схемах), утверждение (отклонение) рекомендаций, ручную корректировку планов и обратную связь. Система оповещений формирует push-уведомления при критических событиях, а REST API интегрирует дашборд с ERP и другими корпоративными системами.

Обеспечение безопасности и аудита функционирования системы базируется на строгой ролевой модели контроля доступа (RBAC), которая разграничивает права и зоны ответственности между техником, инженером, начальником ТО и представителем регулятора. В рамках модели техник получает на дашборде цифровые задания (рабочие карты), подтверждает выполнение операций ТО и вносит данные первичных осмотров. Инженер верифицирует рекомендации системы, анализирует отчеты и санкционирует сложные работы. Начальник ТО утверждает

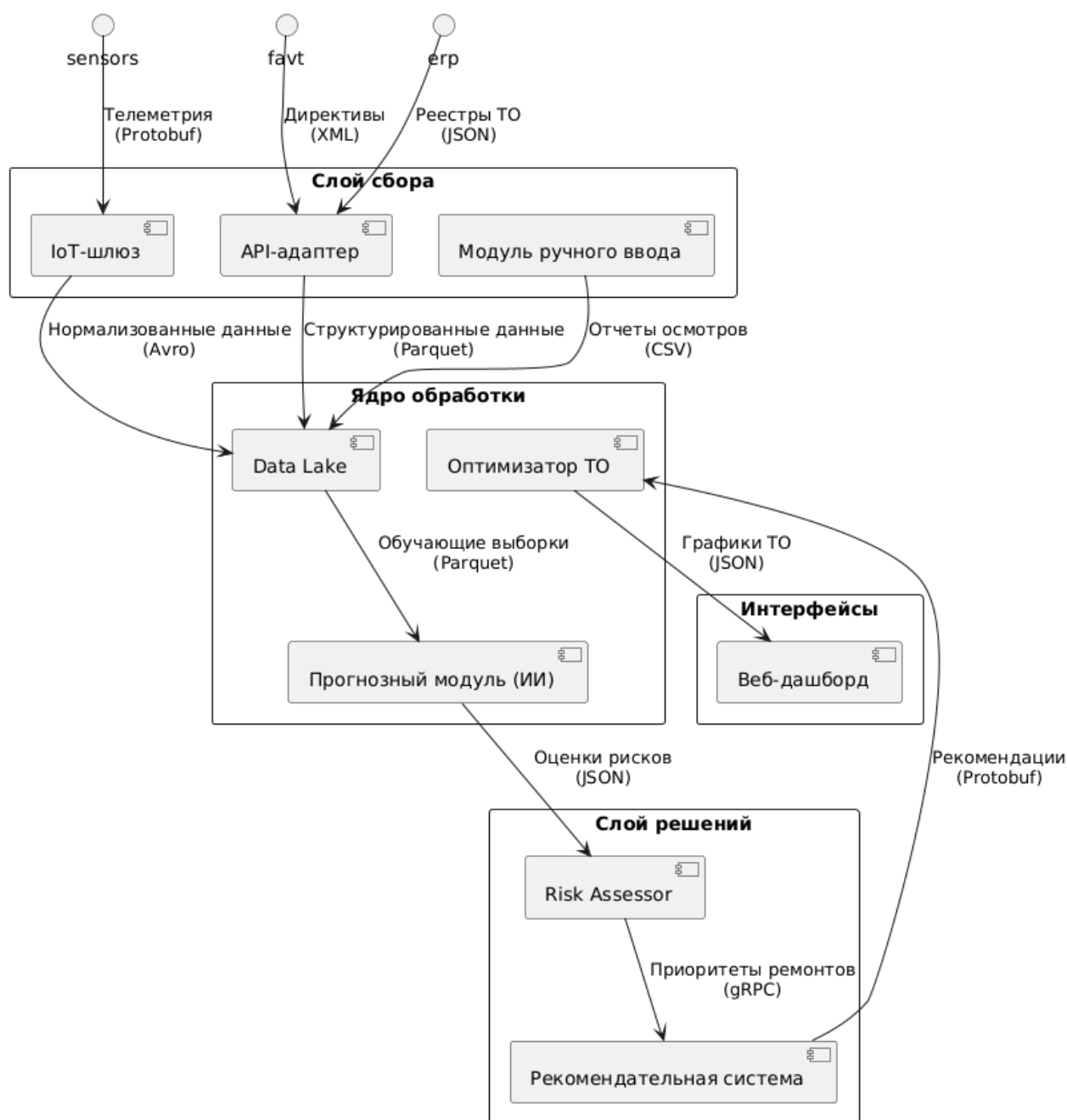


Рис. 2. Uml-диаграмма потоков данных между модулями
Fig. 2. Uml diagram of data flows between the modules

планы и распределяет ресурсы, а представитель регулятора имеет доступ к журналу аудита для контроля. Все действия пользователей в системе подлежат обязательному протоколированию в защищенном журнале изменений, что гарантирует полную прослеживаемость любых операций и соответствует требованиям к документарному сопровожде-

нию процессов поддержания летной годности¹ [7].

¹ Приказ Минтранса РФ № 246 от 13 августа 2015 г. «Об утверждении Федеральных авиационных правил “Требования к юридическим лицам, индивидуальным предпринимателям, осуществляющим коммерческие воздушные перевозки. Форма и порядок выдачи документа, подтверждающего соответствие

Таблица 2
Table 2

Классификация математических моделей в АСУ ПЛГ ВС
The classification of mathematical models in the Automated Control System

Тип задачи	Математическая модель	Применение
Прогнозирование отказов	Survival Analysis, Распределение Вейбулла	Критические узлы (двигатели, шасси)
Оптимизация ТО	Целочисленное программирование	Планирование ангарных работ
Оценка остаточного ресурса	Регрессионные модели	Композитные конструкции
Анализ рисков	Байесовские сети	Системы управления полетом

Предложенная архитектура комплексно решает ключевые операционные проблемы: преодолевает фрагментацию данных за счет создания единой информационной среды, воплощает современные принципы предиктивного ресурсного мониторинга и, что критически важно, через принцип «Сертификационность при проектировании» изначально соответствует строгим требованиям ИКАО и национальных регуляторов.

Для решения ключевых задач предиктивного обслуживания в системе реализован комплекс взаимодополняющих математических моделей, классификация которых по типам решаемых задач, применяемому аппарату и областям применения приведена в табл. 2.

Модель прогнозирования отказов на основе анализа выживаемости (Survival Analysis)

Модель оценивает вероятность безотказной работы компонентов ВС в зависимости от времени и условий эксплуатации. Основана на регрессии Кокса – полупараметрическом методе, учитывающем влияние ковариат на функцию риска [8].

Применение анализа выживаемости в системе поддержания летной годности требует учета специфики авиационных данных, которые часто содержат цензурированные наблюдения. Наиболее распространенным является правое цензурирование, при котором известно время выхода из исследования до наступления определенного события. В контексте авиационной эксплуатации это соответствует случаям, когда компонент ВС снимается с эксплуатации по плановому ремонту или модернизации до наступления отказа.

Модели выживаемости учитывают две целевые переменные: время события T и флаг цензурирования δ , а также вектор признаков X наблюдения при входе в исследование. Это

юридических лиц, индивидуальных предпринимателей, осуществляющих коммерческие воздушные перевозки, требованиям федеральных авиационных правил» [Электронный ресурс] // Консультант-Плюс. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_187361/ (дата обращения: 12.11.2025).

делает модели выживаемости более гибкими и точными по сравнению с другими статистическими методами. В разрабатываемой системе данный подход реализован через учет как терминальных событий (фактические отказы), так и цензурированных наблюдений (плановые замены, вывод из эксплуатации) [9]. Математически модель описывается следующей формулой, определяющей опасность отказа в момент времени t при заданных ковариатах X :

$$\lambda(t|X) = \lambda_0(t) \exp(\beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p), \quad (1)$$

где $\lambda(t|X)$ – опасность отказа в момент времени t ;

$\lambda_0(t)$ – базовая функция риска;

β_i – коэффициенты влияния ковариат;

x_i – ковариаты (наработка, температура, вибрация и т. д.).

$$\begin{aligned} x^1: & \text{накопленная циклическая наработка [циклы взлет-посадка];} \\ x^2: & \text{интеграл термических напряжений [}(T_{\text{gas}} - 650^\circ\text{C})^2 dt, ^\circ\text{C}^2 \cdot \text{ч;} \\ x^3: & \text{RMS вибрации [500–2 000 Гц], мм/с;} \\ x^4: & \text{тренд металлосождения масла, ppm/100ч.} \end{aligned} \quad (2)$$

Для демонстрации работы модели выполнен расчет для конкретного экземпляра двигателя со следующими параметрами:

$$x^1 = 1\,800; x^2 = 2,7 \cdot 10^6; x^3 = 4,8; x^4 = 3,2. \quad (3)$$

На основе исторических данных эксплуатации парка двигателей были определены коэффициенты регрессии Кокса, отражающие вклад каждого параметра в общий риск:

$$\begin{aligned} \text{Коэффициенты: } \beta_1 = 0,021, \beta_2 = 0,18, \beta_3 = 1,75, \beta_4 = 0,93; \\ S = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 = 0,021 \cdot 1800 + 0,18 \cdot 2,7 + 1,75 \cdot 4,8 + 0,93 \cdot 3,2. \end{aligned} \quad (4)$$

Данные получены на основе агрегированных данных из открытых источников, технической документации (ОЕМ) и экспертных оценок инженеров-эксплуатационщиков. В процессе промышленной эксплуатации АСУ ПЛГ эти коэффициенты будут автоматически калиброваться на основе реальных данных мониторинга парка двигателей, обеспечивая переход от экспертной к статистически достоверной модели.

Результаты

Для иллюстрации принципов работы, заложенных в концепцию, рассмотрим гипотетический пример применения модели прогнозирования отказов на основе регрессии Кокса. В качестве объекта для демонстрации выбран авиационный двигатель ПД-14, что обусловлено его критической важностью, сложностью конструкции и высокими требованиями к надежности. Данный пример призван показать, как предложенный в концепции подход мог бы переводить абстрактные вероятности в структурированные рекомендации для службы технического обслуживания.

В соответствии с концепцией для построения прогнозной оценки могут быть выделены ключевые ковариаты, оказывающие влияние на ресурс двигателя. В качестве примера таких ковариат можно рассмотреть:

Далее вычисляется экспонента линейного предиктора и итоговая опасность отказа.

Вычисляем экспоненту:

$$e^S = e^{5,12} \quad k \quad (5)$$

Умножаем базовый риск:

$$\lambda(t|X) = 0,0005 \cdot e^{5,12} \approx 0,084 \text{ отказов в час.} \quad (6)$$

На основе проведенного расчета система автоматически выполняет определенный набор действий. Пороговые значения для классификации рисков (например, $> 0,05$ отказов в час для статуса «Высокий риск») являются настраиваемыми параметрами системы. В рамках концепта они устанавливаются на основе анализа «стоимость – риск» – баланса между вероятностью пропущенного отказа (безопасность) и частотой ложных срабатываний (экономические потери от необоснованного простоя). Это позволит перейти от абстрактных расчетных показателей к конкретным управляющим воздействиям в процессе технического обслуживания.

Разработанная в системе модель прогнозирования отказов на основе анализа выживаемости соответствует рекомендациям по использованию статистических методов для прогнозирования надежности или технического состояния обслуживаемых объектов как величины, подлежащей регулированию [10]. Как отмечено в работе, «задача предсказания будущего состояния объекта по известному прошлому и настоящему является задачей вероятностно-статистического характера», что полностью соответствует подходу, реализованному в системе.

Для эффективного планирования ресурсов авиационного предприятия в системе реализована модель оптимизации технического обслуживания, основанная на методах целочисленного программирования [11]. Данная модель формализует задачу минимизации экономических потерь от простоя воздушных судов при соблюдении ограничений по доступным ресурсам: производственным мощностям ангаров и наличию запчастей. Математическая постановка задачи оптимизации графика технического обслуживания (ТО) формулируется как задача целочисленного линейного программирования и может быть представлена в виде (7)

$$\begin{aligned} \min \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^T c_{it} x_{it}; \\ \text{s.t. } \sum_{t=1}^T x_{it} = 1 \text{ для всех } i \in 1, \dots, m; \\ \sum_{i=1}^m a_{ik} x_{it} \leq b_{kt} \text{ для всех } k \in 1, \dots, K, \forall t; \end{aligned}$$

$$x_{it} \in 0, 1. \quad (7)$$

Индексы: i – воздушное судно; t – период времени в плановом горизонте; k – тип ограниченного ресурса, например рабочее место в ангаре определенного типа или конкретная запчасть.

Переменная решения: x_{it} – бинарная переменная, равная 1, если ВС i назначается на проведение ТО в период t , и 0 в противном случае.

Параметры: c_{it} – экономические потери (стоимость простоя), связанные с выводом ВС i на ТО в период t ; a_{ik} – объем потребления ресурса k (например, человеко-часы, количество единиц запчастей) для обслуживания ВС i ; b_{kt} – доступный объем ресурса k в период t .

Целевая функция минимизирует совокупные экономические потери от простоев всего парка ВС за плановый период. Первое ограничение гарантирует, что каждое воздушное судно будет обслужено ровно один раз в течение горизонта планирования. Второе ограничение – ограничение по ресурсам – обеспечивает то, что суммарная потребность всех ВС, назначенных на обслуживание в период t , по каждому ресурсу k не превышает его доступного объема в этот период.

Критически важными для практической реализации модели оптимизации являются два типа ограничений: производственные мощности и наличие запчастей.

Во-первых, модель учитывает физические ограничения инфраструктуры, а именно производственные мощности ангаров. Математически это выражается ограничением, которое включает количество рабочих мест, их специализацию по типам ВС и график доступности:

$$\sum_{i \in I_v} x \leq C_{at}^v \text{ для всех } a \in A, t \in T, v \in V, \quad (8)$$

где x – бинарная переменная (1, если ВС i обслуживается в период t);

C_{at}^v – вместимость ангара a для типа v в период t ;

I_v – множество ВС типа v .

Во-вторых, существенным фактором является наличие запчастей. Учет лимитиро-

ванных ресурсов запасных частей реализован через балансовое уравнение

$$I_{pt} = I_{pt-1} + S_{pt} - \sum_{i \in I} d_{ip} \cdot x_i \text{ для всех } p \in P, t \in T, \quad (9)$$

где I_{pt} – запас детали p в конце периода t ;
 S_{pt} – поставка детали p в период t ;
 d_{ip} – потребность ВС i в детали p ;
 I_{pt-1} – начальный запас детали p ;
 x_i – бинарная переменная (1, если ВС i обслуживается в период t).

В рамках концепции данная оптимизационная модель служит формальным аппаратом для выражения задачи планирования ТО. Она задает структуру целевой функции (минимизация потерь) и ограничений (ресурсы, запчасти), демонстрируя, как принципы оптимального планирования могут быть интегрированы в систему поддержки принятия решений.

Концепцией предполагается, что на каждом цикле планирования решатель, реализующий методы целочисленного программирования (например, на базе симплекс-метода и метода ветвей и границ), мог бы использоваться для нахождения расписания x_{it} , минимизирующего суммарные потери при заданных ограничениях.

Такой подход позволяет перейти от реактивного планирования «по фактическому состоянию» к проактивному управлению техническим обслуживанием всего парка ВС, что в конечном итоге способствует повышению коэффициента технической готовности авиатранспортного предприятия [12].

Для комплексного анализа надежности механических и электромеханических компонентов воздушных судов (таких как элементы гидросистем, шасси, вспомогательные силовые установки) в системе реализован аппарат распределения Вейбулла. Данный метод является одним из ключевых инструментов для моделирования интенсивности отказов в течение жизненного цикла, так как его гибкость (за счет параметра формы β) позволяет описывать характерные фазы эксплуатации: приработку, нормальную работу и период износа [13, 14]. Универсальность данного распределения позволяет описать три крити-

ческих фазы эксплуатации: приработку, нормальную работу и износ, что наглядно демонстрируется характерной «ваннообразной» кривой интенсивности отказов (рис. 3).



Рис. 3. Кривая интенсивности отказов
Fig. 3. The failure rate curve

Применение распределения Вейбулла в контексте авиационной эксплуатации может быть расширено за счет учета корреляционных связей между последовательными отказами, что особенно важно для прогнозирования вторичных отказов в сложных системах ВС [2, 15]. Рабочий процесс применения данного метода в АСУ ПЛГ, представленный на рис. 4, включает последовательные этапы сбора данных о наработке, оценки параметров распределения и расчета вероятности безотказной работы [8].

Математический аппарат в контексте АСУ ПЛГ основан на функции вероятности безотказной работы (функции надежности). Для примера рассчитаем данный показатель типового гидронасоса системы управления механизацией крыла SSJ-100 для гидронасоса SSJ-100:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta}. \quad (10)$$

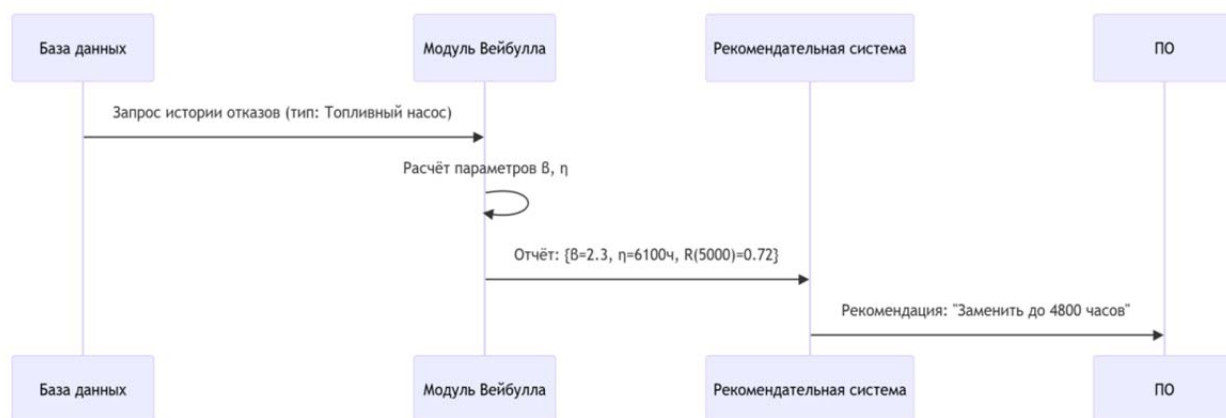


Рис. 4. Рабочий процесс распределения Вейбулла
Fig. 4. Weibull distribution workflow

Рассмотрим иллюстративный пример. Для типового гидронасоса SSJ-100 можно оценить вероятность безотказной работы $R(t)$ по формуле (10). При гипотетических параметрах (например, $t = 3\,500$ ч, $\eta = 5\,200$ ч, $\beta = 2,8$) расчет дает значение $R(t) \approx 0,78$. В рамках концепции такое значение могло бы интерпретироваться как сигнал для планирования контроля. Порог для инициации контроля (например, $R(t) < 0,8$) является настраиваемым параметром концепции, устанавливаемым на основе анализа «стоимость — риск».

Интеграция данной модели в рабочий процесс АСУ ПЛГ позволяет визуализировать зависимость вероятности безотказной работы от наработки (рис. 5). График наглядно демонстрирует взаимосвязь между временем эксплуатации и надежностью компонента, построенную по распределению Вейбулла с параметрами $\eta = 5\,200$ ч, $\beta = 2,8$. В реальной работе системы параметры η и β автоматически оцениваются для каждого компонента на основе его уникальной эксплуатационной истории, что позволяет строить персонализированные кривые и обеспечивает точность прогноза. Такая визуализация позволяет инженеру мгновенно оценить запас надежности, динамику износа, близость к критическим порогам и планировать мероприятия с учетом визуального прогноза.

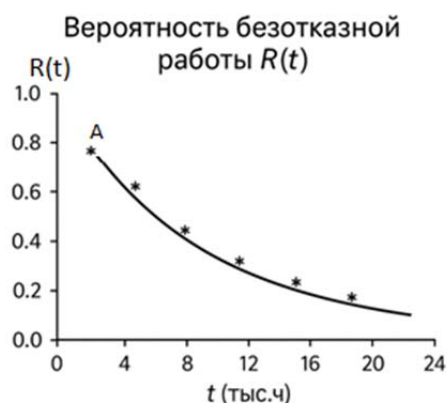


Рис. 5. Вероятность безотказной работы
Fig. 5. Probability of failure-free operation

Текущая наработка компонента (3 500 ч) соответствует точке А, где $R(t) \approx 0,78$. Горизонтальная линия на уровне $R = 0,8$ обозначает установленный порог: при снижении вероятности ниже этой границы система автоматически рекомендует провести плановый контроль. Такая визуализация позволяет инженеру мгновенно оценить запас надежности и приоритетность вмешательства.

Согласно концепции формирование предварительных рекомендаций может инициироваться при достижении пороговых значений, таких как вероятность безотказной работы $R(t)$. Например, при снижении $R(t)$ ниже установленного предела система могла бы сгенерировать структурированное уведомление для инженера. В отличие от простого от-

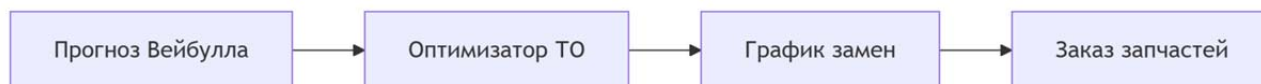


Рис. 6. Интеграция с планированием

Fig. 6. The integration with planning

слеживания наработки по документам, АСУ ПЛГ в реальном времени оценивает интегральный износ компонента на основе телеметрии, условий эксплуатации и прогнозных моделей, что позволяет перейти от обслуживания по календарному пробегу к обслуживанию по фактическому состоянию. Например, при снижении $R(t)$ ниже установленного порога система генерирует структурированное уведомление.

Компонент: Турбина двигателя ПС-90А (серийный номер 0238).

Текущая наработка: 10 050 ч.

Прогноз $R(t)$: 0,82 ($\beta = 3,1$, $\eta = 12\ 600$).

Рекомендация: Запланировать замену до 11 000 ч.

Окончательное решение о характере и сроках вмешательства принимает инженер по летной годности после анализа всех данных.

К преимуществам реализации в АСУ ПЛГ относятся два ключевых аспекта. Во-первых, обеспечивается персонализация моделей за счет использования отдельных параметров для каждого двигателя с учетом условий эксплуатации (климат, режимы полета). Во-вторых, реализована глубокая интеграция с системой планирования, что иллюстрируется на рис. 6.

Данная реализация обеспечивает сквозную функциональность: интеграцию с базой данных системы, автоматический расчет вероятности отказа, генерацию предаварийных предупреждений для службы ТО и адаптацию под конкретные типы компонентов. Такой подход позволяет осуществлять проактивное планирование ремонтов, минимизируя вероятность внезапных отказов и связанные с ними эксплуатационные риски [15, 16].

Важно разграничить роли двух ключевых вероятностных моделей, используемых в си-

стеме: регрессии Кокса и распределения Вейбулла. На первый взгляд, они обе оценивают надежность, но решают принципиально разные задачи в рамках единой архитектуры АСУ ПЛГ.

Модель пропорциональных рисков Кокса является полупараметрической. Ее главная сила – в оценке влияния изменяющихся во времени ковариат на риск отказа. Она отвечает на вопрос, как текущее состояние двигателя (вибрация, температура, износ масла) влияет на вероятность его отказа в ближайшее время. Модель Кокса идеальна для индивидуального прогнозирования для каждого конкретного агрегата на основе его телеметрии в реальном времени. Она позволяет системе обнаружить зарождающийся дефект.

Модель на основе распределения Вейбулла является параметрической. Она описывает базовый закон надежности для целого класса однотипных компонентов (например, всех гидронасосов типа NS-23). Параметры распределения (β , η) характеризуют физику износа данного типа оборудования: период приработки ($\beta < 1$), нормальной эксплуатации ($\beta \approx 1$) или старения ($\beta > 1$). Модель Вейбулла отвечает на вопрос, какова вероятность безотказной работы нового гидронасоса данного типа к наработке t . Она используется для долгосрочного планирования потребности в запчастях и стратегического управления парком.

Сама система использует модели совместно. Распределение Вейбулла задает базовую линию надежности. Модель Кокса, анализируя текущие ковариаты конкретного двигателя, корректирует эту базовую линию, вычисляя его индивидуальный риск. Например, если двигатель ПД-14 эксплуатируется в тяжелых условиях (высокая вибрация, жаркий климат), модель Кокса покажет, что его



Рис. 7. Диаграмма потоков данных между модулями
Fig. 7. The diagram of data flows between the modules

риск отказа выше, чем предсказывает «усредненная» кривая Вейбулла для данного типа двигателей.

Обсуждение

Предложенная архитектурная концепция АСУ ПЛГ базируется на фундаментальном принципе подчиненной роли искусственного интеллекта (ИИ). Такой подход является методологическим стержнем концепции и обусловлен прежде всего строгими требованиями нормативной базы [7], а также необходимостью сохранения ключевой роли и ответственности сертифицированного инженерно-технического персонала. В рамках данной концепции искусственный интеллект рассматривается не как автономный субъект, а как аналитический инструмент-ассистент.

С технической точки зрения архитектура системы формирует трехуровневый барьер автономии ИИ, что наглядно отражено на UML-диаграмме потоков данных между модулями (рис. 7).

Алгоритм принятия решения, отраженный на рис. 7, функционирует следующим образом.

ИИ-прогноз: Аналитическое ядро системы формирует прогноз (оценку риска) и предварительную рекомендацию.

Верификация: Данную рекомендацию в обязательном порядке рассматривает инженер по летной годности (ИЛГ). На этом этапе инженер анализирует обоснование, сформированное механизмами объяснимого ИИ (ХАИ), проверяет исходные данные и может запросить дополнительные сведения. Блок

«Верификация» и есть процесс человеческого анализа.

Решение инженера: Инженер принимает одно из двух решений:

Утверждение: Если рекомендация обоснована, инженер ее утверждает. Далее система фиксирует решение и инициирует соответствующие процессы (планирование, заказ запчастей и т. д.).

Отклонение: Если инженер с рекомендацией не согласен, он ее отклоняет с обязательным указанием причины в системе.

Обработка отклоненного решения: Любое отклоненное решение не игнорируется, а направляется в контур «Аудит решения». Здесь оно анализируется для возможной корректировки моделей ИИ (обратная связь) и для контроля соответствия процессов нормативным требованиям. Это ключевой элемент для обучения и улучшения системы.

Итоговый результат: Финальное решение о допуске ВС к полетам принимается исключительно на основании утвержденного инженером заключения, которое учитывает как выводы ИИ, так и профессиональное суждение специалиста.

Таким образом, диаграмма отражает не линейный, а разветвленный процесс, где человек (ИЛГ) является центральным звеном верификации и принятия решения, а система обеспечивает полную прослеживаемость и учет всех случаев, включая отклонения.

1. На уровне данных ИИ имеет доступ только к сырым данным в защищенном хранилище (Data Lake), не взаимодействуя с системами управления ВС.

2. На уровне решений все выводы в обязательном порядке проходят через челове-

скую верификацию (Human Verification Gateway, HVG).

3. На нормативном уровне обеспечивается соответствие всем требованиям, исключаяющим подмену заключения инженера.

Центральным элементом системы является принцип верифицируемости выводов. Любая рекомендация, сгенерированная моделью машинного обучения (например, LSTM-сетью или моделью анализа выживаемости), сопровождается методологическим обоснованием и возможностью ручной проверки исходных данных. Это напрямую соотносится с требованием ГОСТ Р 57907-2017 о возможности переопределения автоматизированных решений и обеспечивает необходимый уровень доверия к системе со стороны эксплуатантов.

Это технически реализует и обеспечивает выполнение ключевого принципа, закрепленного в ГОСТ Р 57907-2017: окончательное решение и ответственность за допуск воздушного судна к эксплуатации остаются за сертифицированным инженерно-техническим персоналом. Предоставляя инженеру полное методологическое обоснование, доступ к исходным данным и явный механизм утверждения (отклонения) (Human Verification Gateway), система не подменяет специалиста, а дает ему расширенные аналитические возможности, сохраняя за ним право окончательного вердикта. Такой подход и обеспечивает необходимый уровень доверия к системе со стороны эксплуатантов. На практике, как показано на рис. 7, это реализовано через механизм HVG, который выступает обязательным шлюзом для всех управляющих рекомендаций, направляемых инженеру.

Функционально ИИ в системе выступает в нескольких взаимодополняющих аспектах. Как диагностический аналитик он позволяет выявлять скрытые корреляции в многопараметрических временных рядах телеметрии и классифицировать зарождающиеся дефекты, что затруднительно для традиционных методов контроля. Одновременно в качестве прогностического оптимизатора система рассчитывает интервалы технического обслуживания не по фиксированным регламентам, а на

основе непрерывной оценки фактического износа. Для этого система использует агрегированные и преобразованные данные телеметрии (такие как температура газов, вибрация, данные спектроскопии масла – см. раздел «Результаты», формулы (2)–(3)), которые служат входными параметрами для прогнозных моделей анализа выживаемости и распределения Вейбулла.

Балансировка рисков безопасности и экономических затрат осуществляется в рамках оптимизационной модели (7) через настраиваемые весовые коэффициенты в целевой функции и жесткие нормативные ограничения, исключаяющие выход за пределы безопасной эксплуатации. Таким образом, система ищет график ТО, минимизирующий затраты, но только среди сценариев, удовлетворяющих всем требованиям безопасности, заложенным в ее алгоритмы и проверяемым инженером при верификации. Важно подчеркнуть, что прогнозные модели работают в рамках предопределенных параметров (принцип контекстуальной ограниченности), анализируя исключительно структурированные данные и исторические шаблоны, и не выходят за рамки аналитической функции.

Наконец, система реализует функцию нормативного контроля, автоматически проводя аудит выполненных работ на соответствие актуальным директивам (например, EASA AD 2023-015R2) и Федеральным авиационным правилам. Это создает дополнительный контур безопасности и снижает «человеческий фактор» в части соблюдения нормативной базы.

Процесс взаимодействия в критическом сценарии, таком как отказ генератора, наглядно демонстрирует работу этих принципов и соответствует потокам данных, изображенным на рис. 7. Система детектирует аномалию, формирует структурированное предупреждение с указанием критичности, компонента и приоритета проверки, после чего инженер проводит верификацию, анализируя исторические данные и визуализацию, сгенерированную механизмами объяснимого

ИИ (ХАИ). Только после этого финальное решение фиксируется в защищенном журнале.

Важно обозначить ключевые ограничения и вызовы, связанные с реализацией предложенной концепции.

Зависимость от данных: Практическая эффективность концепции в решающей степени будет определяться объемом, качеством и репрезентативностью исторических и операционных данных, необходимых для обучения и калибровки предиктивных моделей. Проблема работы с неполными, зашумленными и цензурированными данными требует отдельного методологического внимания.

Интеграционная сложность: Внедрение подобного решения сопряжено со значительными интеграционными вызовами, включая необходимость взаимодействия с унаследованными (legacy) системами, обеспечения кибербезопасности каналов передачи данных и преодоления организационного сопротивления.

Вопросы доверия и интерпретируемости: Для принятия ответственных решений инженеру требуется понимание логики, приведшей к рекомендации. Поэтому крайне важным направлением развития концепции является интеграция методов объяснимого ИИ (ХАИ), которые повысят прозрачность сложных моделей (например, ансамблей на основе LSTM) и укрепят доверие пользователей.

Регуляторное соответствие: Несмотря на заложенный в концепцию принцип Human Verification Gateway, процедура сертификации подобной системы регуляторными органами (ФАВТ, EASA) потребует отдельной глубокой проработки и, вероятно, создания новых стандартов.

Заключение

В результате проведенного исследования разработана архитектура автоматизированной системы управления поддержанием летной годности с интеграцией элементов искусственного интеллекта. Основные научные

и практические результаты работы заключаются в следующем.

1. Разработана и научно обоснована многоуровневая архитектура АСУ ПЛГ, реализующая принципы многоуровневых экспертных систем [6] и обеспечивающая сквозную обработку данных от сбора телеметрии до формирования управляющих решений. Архитектура включает четыре ключевых слоя: сбора данных, обработки, принятия решений и интерфейсный слой.

2. Реализован принцип подчиненной роли искусственного интеллекта, соответствующий требованиям Федеральных авиационных правил [7] и ГОСТ Р 57907-2017. Система позиционирует ИИ как аналитический инструмент-ассистент, не обладающий доступом к исполнительным механизмам, с обязательной верификацией выводов через Human Verification Gateway.

3. Разработан комплекс математических моделей для решения ключевых задач поддержания летной годности:

- модель прогнозирования отказов на основе регрессии Кокса [8] с учетом цензурированных данных;
- модель оптимизации технического обслуживания методами целочисленного программирования;
- модель анализа надежности на основе распределения Вейбулла [13] с учетом корреляционных связей.

4. Теоретически и методологически обосновано соответствие системы принципам поддержания летной годности, включая ориентацию на эксплуатационную фазу жизненного цикла ВС (65 % от общего цикла) и реализацию механизма непрерывного мониторинга.

Перспективы дальнейших исследований связаны с развитием методов объяснимого искусственного интеллекта (ХАИ) для повышения доверия к рекомендациям системы, а также с интеграцией цифровых двойников критических систем воздушных судов для более точного прогнозирования остаточного ресурса.

Список литературы

1. Самуленков Ю.И., Филатова Я.А., Грузд А.Д. Построение имитационной математической модели системы технического обслуживания воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2021. Т. 24, № 4. С. 38–49. DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-4-38-49

2. Лапшин В.А. Онтологии в компьютерных системах. М.: Научный мир, 2010. 224 с.

3. Чинючин Ю.М., Смирнов Н.Н., Кирдюшкин В.С. Проблемы совершенствования системы поддержания летной годности воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. № 178. С. 7–12.

4. Чинючин Ю.М. Методология и современные научные проблемы технической эксплуатации летательных аппаратов: учеб. пособие. М.: МГТУ ГА, 1999. 64 с.

5. Большедворский Г.А., Дадобаев Х.Г. Методологические аспекты поддержания летной годности воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2013. № 197. С. 31–35.

6. Балтрашевич В.Э. Архитектура многоуровневых экспертных систем // Тенденции развития науки и образования. 2022. № 84-1. С. 75–79. DOI: 10.18411/trnio-04-2022-17

7. Васильев Ю.А., Петровский М.И., Машечкин И.В. Применение регуляризации при вычислении критериев разбиения в моделях анализа выживаемости // Вычислительные методы и программирование. 2024. Т. 25, № 3. С. 357–377. DOI: 10.26089/NumMet.v25r328

8. Микулик И.И. Методика для решения задачи выбора признаков в регрессионной модели Кокса // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2024. № 3. С. 85–94. DOI: 10.24143/2072-9502-2024-3-85-94

9. Чинючин Ю.М., Тарасов С.П. Нормативная база технической эксплуатации и сохранения летной годности воздушных судов: учеб. пособие. М.: МГТУ ГА, 2003. 96 с.

10. Чинючин Ю.М., Грузд А.Д. К вопросу прогнозного метода формирования оптимальных режимов технического обслужи-

вания функциональных систем воздушных судов // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества: сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию отечественной гражданской авиации. Москва, 18–19 мая 2023 г. М.: ИД Академии имени Н.Е. Жуковского, 2023. С. 293–295.

11. Ицкович А.А., Алексанян А.Р., Файнбург И.А. Построение математической модели процессов технической эксплуатации авиационной техники как замкнутой системы массового обслуживания // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 219 (9). С. 46–52.

12. Писаренко В.Н. Техническое обслуживание воздушных судов как система поддержания летной годности гражданской авиационной техники: монография [Электронный ресурс] // Самара: СамНЦ РАН, 2017. 170 с. URL: <https://repo.ssau.ru/jspui/bitstream/123456789/42797/1/Писаренко%20В.Н.%20Техническое%20обслуживание%20017.pdf> (дата обращения: 10.12.2025).

13. Шепета А.П., Исаков В.И. Корреляционные функции случайных процессов, распределенных по закону Вейбулла // Инновации в сфере информационных технологий: от идеи к внедрению (ИвСИТ-2024): сборник материалов III международной научно-практической конференции. Ивановгород, 29 октября 2024 г. Казань: ООО «Бук», 2024. С. 23–28.

14. Подоплекин Ю.Ф., Шепета Д.А., Иванов И.Н. Моделирование анизотропного стохастического пространственного поля, распределенного по закону Вейбулла // Морская радиоэлектроника. 2024. № 3 (89). С. 48–53.

15. Cox D.R. Regression models and life-tables // Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological). 1972. Vol. 34, iss. 2. Pp. 187–220. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1972.tb00899.x

16. Герасимова Е.Д., Смирнов Н.Н., Ойдов Н. Влияние надежности функциональных систем на эффективность технической эксплуатации воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 1. С. 45–52.

References

1. Samulenkov, Yu.I., Filatova, Ya.A., Gruz, A.D. (2021). Aircraft maintenance system simulation mathematical model construction. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 24, no. 4, pp. 38–49. DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-4-38-49 (in Russian)
2. Lapshin, V.A. (2010). Ontologies in computer systems. Moscow: Nauchnyy mir, 224 p. (in Russian)
3. Chinyuchin, Y.M., Smirnov, N.N., Kirdyushkin, V.S. (2012). Problems of aircraft airworthiness keeping system development. *Nauchnyy vestnik MGTU GA*, no. 178, pp. 7–12. (in Russian)
4. Chinyuchin, Yu.M. (1999). Methodology and modern scientific problems of aircraft technical operation: Tutorial. Moscow: MGTU GA, 64 p. (in Russian)
5. Bolshedvorsky, G.A., Dadobaev, H.G. (2013). Methodological aspects of aircraft's maintenance airworthiness. *Nauchnyy vestnik MGTU GA*, no. 197, pp. 31–35. (in Russian)
6. Baltrashevich, V.E. (2022). Architecture of multilevel expert systems. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*, no. 84-1, pp. 75–79. DOI: 10.18411/trnio-04-2022-17 (in Russian)
7. Vasilev, Iu.A., Petrovskiy, M.I., Mashechkin, I.V. (2024). Applying regularization to calculate split criterion for survival models. *Numerical methods and programming*, vol. 25, no. 3, pp. 357–377. DOI: 10.26089/NumMet.v25r328 (in Russian)
8. Mikulik, I.I. (2024). Methodology of solving the feature selection problem for the cox regression model. *Vestnik of astrakhan state technical university. Series: management, computer science and informatics*, no. 3, pp. 85–94. DOI: 10.24143/2072-9502-2024-3-85-94 (in Russian)
9. Chinyuchin, Yu.M., Tarasov, S.P. (2003). Regulatory framework for technical operation and maintaining airworthiness of aircraft: Tutorial. Moscow: MGTU GA, 96 p. (in Russian)
10. Chinyuchin, Yu.M., Gruz, A.D. (2023). On the issue of the predictive method for forming optimal maintenance regimes for functional systems of aircraft. In: *Grazhdanskaya aviatsiya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva: sbornik tezisov dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu otechestvennoy grazhdanskoy aviatsii*. Moscow: ID Akademii imeni N.Ye. Zhukovskogo, pp. 293–295. (in Russian)
11. Aleksanyan, A.R., Itskovich, A.A., Faynburg, I.A. (2015). The construction of mathematical model of processes of maintenance of aircraft engineering as a closed service system. *Nauchnyy vestnik MGTU GA*, no. 219 (9), pp. 46–52. (in Russian)
12. Pisarienko, V.N. (2017). Aircraft maintenance as a system for the airworthiness support of civil aviation aircraft: Monograph. Samara: SamNTs RAN, 170 p. Available at: <https://repo.ssau.ru/jspui/bitstream/123456789/42797/1/Писаренко%20В.Н.%20Техническое%20обслуживание%202017.pdf> (accessed: 10.12.2025). (in Russian)
13. Shepeta, A.P., Isakov, V.I. (2024). Correlation functions of random processes distributed according to the Weibull law. In: *Innovatsii v sfere informatsionnykh tekhnologiy: ot idei k vnedreniyu (IvSIT-2024): sbornik materialov III mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Kazan: OOO "Buk", pp. 23–28. (in Russian)
14. Podoplekin, Yu.F., Shepeta, D.A., Ivanov, I.N. (2024). Modeling of anisotropic stochastic spatial field distributed according to the weibull law. *Morskaya radioelektronika*, no. 3 (89), pp. 48–53. (in Russian)
15. Cox, D.R. (1972). Regression models and life-tables. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, vol. 34, issue 2, pp. 187–220. DOI: 10.1111/j.2517-6161.1972.tb00899.x
16. Gerasimova, E.D., Smirnov, N.N., Nambat, O. (2017). The effect of reliability of functional systems on the efficiency of the technical operation of the aircraft. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 20, no. 1, pp. 45–52. (in Russian)

Сведения об авторах

Подосенов Сергей Сергеевич, аспирант кафедры вычислительных машин, комплексов, систем и сетей МГТУ ГА, специалист по сопровождению и внедрению ПО «ОС-Технолоджи», bekar999@mail.ru.

Феоктистова Оксана Геннадьевна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой вычислительных машин, комплексов, систем и сетей МГТУ ГА, o.feoktistova@mstuca.ru.

Information about the authors

Sergey S. Podosenov, Postgraduate Student of the Computing Machines, Complexes, Systems and Networks Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Software Support and Implementation Specialist at OS-Technologies, bekar999@mail.ru.

Oksana G. Feoktistova, Doctor of Technical Sciences, Professor, the Head of the Computing Machines, Complexes, Systems and Networks Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, o.feoktistova@mstuca.ru.

Поступила в редакцию	22.01.2026	Received	22.01.2026
Одобрена после рецензирования	04.03.2026	Approved after reviewing	04.03.2026
Принята в печать	23.07.2026	Accepted for publication	23.07.2026

УДК 621.438-226.739.6
DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-63-72

Experimental study of the possibility of managing the concentration of the vapor flow during the applying of a thermal protective coating by the electron-beam method

V.M. Samoilenko¹, R.G. Ravilov², V.G. Opokin², M.D. Petrov³

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

²*Lytkarinsky Machine-building Plant – branch of PJSC “ODK-UMPO”, Lytkarino, Russia*

³*Central Institute of Aviation Engine Engineering named after Baranova, Moscow, Russia*

Abstract: Currently, thermal barrier coatings (TBCs) are used on the turbine blades of gas turbine engines (GTEs) in order to reduce the gas temperature on the blade material, which improves the performance and efficiency of the turbine blades. The authors have accumulated experimental data that allow them to obtain TBCs of the required microstructure and composition on the turbine blade using electron beam physical vapor deposition (EB-PVD). The TBCs protect the metal base of the GTE blades from the high-temperature effects of the gas flow. The article discusses a new approach to the technological process of applying a heat-resistant coating using the electron-beam method. The experience of applying thermal protection coatings by electron beam evaporation and condensation in a vacuum show that the thickness of the ceramic pillars and their orientation relative to the turbine blade have a significant impact on the performance of such a coating, as well as on the thermal conductivity and heat resistance of the coating. In this article, the process of electron beam evaporation and condensation in a vacuum is examined from the perspective of a methodology adapted to the process of applying thermal protection coatings, the thickness of the coating, the materials chosen for the coating, and the desired microstructure of the coating. The presented work focuses on the ability to control the concentration of the vapor flow on the deposited parts in order to reduce the coating formation time and the consumption of the evaporated material. The article discusses the features of coating thickness and microstructure formation, depending on the substrate position relative to the crucible. A method for coating formation is proposed, which allows to increase the density of the steam flow on the blade and increase the material utilization rate. Experimental studies of the influence of the angle of steam incidence on the turbine blade on its density during condensation on the part are presented.

Keywords: thermal barrier coating (TBC), steam flow, vacuum evaporation, pool temperature, evaporation rate, ceramic rod.

For citation: Samoilenko, V.M., Ravilov, R.G., Opokin, V.G., Petrov, M.D. (2026). Experimental study of the possibility of managing the concentration of the vapor flow during the applying of a thermal protective coating by the electron-beam method. Civil Aviation High Technologies, vol. 29, no. 4, pp. 63–72. DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-63-72

Экспериментальное исследование возможности управления концентрацией парового потока при нанесении теплозащитного покрытия электронно-лучевым методом

В.М. Самойленко¹, Р.Г. Равилов², В.Г. Опокин², М.Д. Петров³

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

²*Лыткаринский машиностроительный завод – филиал ПАО «ОДК-УМПО»,
г. Лыткарино, Россия*

³*Центральный институт авиационного моторостроения им. Баранова,
г. Москва, Россия*

Аннотация: В настоящее время теплозащитные покрытия (ТЗП) применяют на лопатках турбины газотурбинных двигателей (ГТД) с целью уменьшения температуры газа на материале лопатки, что повышает эксплуатационные характеристики и эффективность применения лопаток турбины. Авторами накоплены экспериментальные данные,

позволяющие получить на лопатке турбины ТЗП требуемой микроструктуры и состава методом электронно-лучевого осаждения из паровой фазы (Electron Beam Physical Vapor and Deposition, EB-PVD), которые защищают металлическую основу лопаток ГТД от высокотемпературного воздействия газового потока. В статье рассматривается новый подход к технологическому процессу нанесения теплозащитного покрытия электронно-лучевым методом. Опыт нанесения ТЗП методом электронно-лучевого испарения и конденсации в вакууме показывает, что толщина керамических столбов и их ориентация относительно лопатки турбины существенно влияют на работоспособность подобного покрытия, а также приводят к изменению таких характеристик, как теплопроводность и термостойкость покрытия. В статье технологический процесс электронно-лучевого испарения и конденсации в вакууме рассматривается с точки зрения методологии, адаптированной к процессу нанесения теплозащитного покрытия, толщины формируемого покрытия, материалов, выбранных для нанесения покрытия и получения требуемой микроструктуры покрытия. Основное внимание уделяется возможности управления концентрацией парового потока на осаждаемые детали с целью уменьшения времени формирования покрытия и снижения расхода испаряемого материала. Рассматриваются особенности формирования толщин и микроструктур покрытий в зависимости от расположения подложки относительно тигля. Предложен способ формирования покрытий, позволяющий увеличить плотность парового потока на лопатке и увеличить коэффициент использования материала. Представлены экспериментальные исследования влияния угла падения пара на лопатку турбины на его плотность при конденсации на детали.

Ключевые слова: теплозащитное покрытие, паровой поток, вакуумное испарение, температура ванны, скорость испарения, керамический штабик.

Для цитирования: Самойленко В.М. Экспериментальное исследование возможности управления концентрацией парового потока при нанесении теплозащитного покрытия электронно-лучевым методом / В.М. Самойленко, Р.Г. Равилов, В.Г. Опокин, М.Д. Петров // Научный вестник МГТУ ГА. 2026. Т. 29, № 4. С. 63–72. DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-63-72

Introduction

The applied thermal barrier coatings (TBCs) on turbine blades structurally consist of a metallic bond coat formed from special heat-resistant alloys of the MCrAlY system and an outer ceramic layer, most often made of yttria-stabilized zirconia ($ZrO_2 \cdot Y_2O_3$). The most advanced method for applying the outer ceramic layer is electron-beam physical vapor deposition (EB-PVD) in vacuum, which imparts to the deposited ceramic a specific columnar structure (fig. 1). As the experience of the authors of [1, 2] and of other researchers [3–6] shows, the microstructure, thickness, and growth direction of the columns depend significantly on the technological parameters of the ceramic deposition process.

During electron-beam evaporation of the material in a high vacuum of $10^{-4} \dots 10^{-6}$ mm Hg, the spatial density of the vapor flow above the evaporator follows a cosine distribution law, according to which the maximum density is observed in the direction of normal line towards the evaporation surface (angle = 0). The heating of the evaporated material is carried out by automatic scanning of the electron beam over the surface of the rod. Over time, due to imperfect scanning or the emergence of certain differences

in local absorption/reflection conditions, protruding areas form on the surface; the evaporation rate on these areas tends to decrease, even to a complete stop, while their height naturally increases [7, 8]. This undesirable phenomenon leads to non-uniform evaporation of the ceramic rod (fig. 2) and affects the shape of the vapor cloud [8, 9].

Therefore, subjected to the electron beam, a zone with very high vapor pressure may form above the molten material, causing the melt surface to become concave (fig. 3). As a result, the vapor flow density decreases more sharply with increasing angle φ (the vapor cloud becomes focused). The deepening of the evaporation surface also leads to this same effect. If the cold crucible walls hinder the distribution of the vapor flow (fig. 3, c), their influence on the evaporator characteristic is called the “chimney effect”. Both of these factors change the evaporator characteristic so that it becomes similar to the spatial distribution of the vapor flow density issuing from a discharge nozzle.

Stable maintenance of the most even shape of the melt pool (without protrusions or low spots) and constancy of its level relative to the crucible are among the main technological conditions for ensuring repeatability of the coating deposition

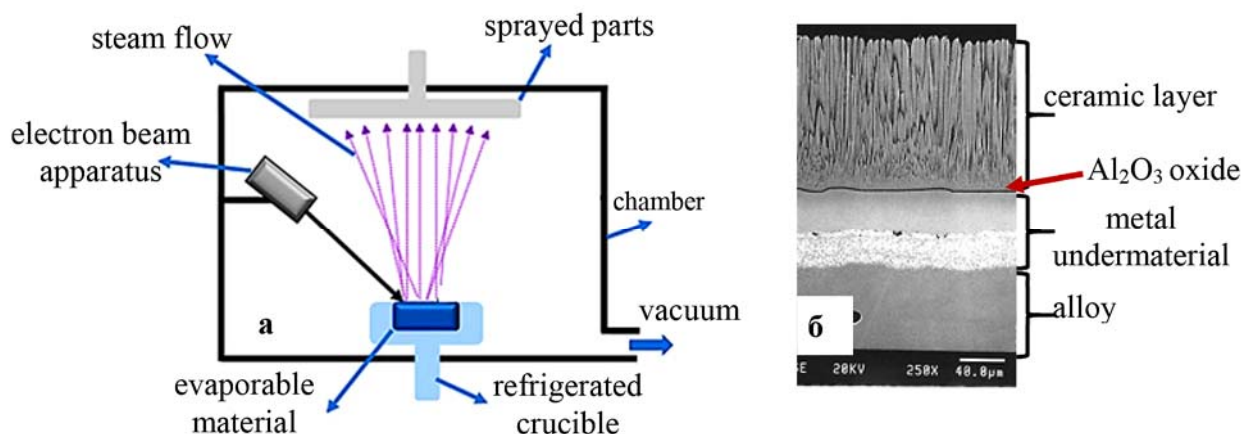


Fig. 1. Scheme of electron beam evaporation of the material (a) and microstructure (б) of the formed thermal barrier coating



Fig. 2. Appearance of uneven evaporation of the surface of a ceramic rod made of stabilized zirconium dioxide in an electron beam installation

process on parts from melt to melt. To achieve this, the operator must concentrate the beam scanning on the protruding parts of the rod that have formed and melt them flush with the pool surface, and set the melt level by changing the feed rate of the rod into the crucible. At high evaporation rates, a zone (1, in fig. 3, d) [7] with high vapor density may form above the crucible surface; vapor particles outside this zone distribute rectilinearly from its surface (the vapor cloud is substantially scattered).

To improve evaporation stability in modern electron-beam coating deposition facilities, the most advanced automated control systems are used, such as EBCS (Electron Beam Control System) for precise positioning and control of the electron beam in equipment manufactured by ALD Vacuum Technologies GmbH [10, 11]. These systems make it possible to achieve a

nearly flat surface of the evaporating ceramic rod; however, they cannot completely eliminate the formation of protrusions, and operator involvement in the process cannot be fully automated.

As it can be seen from the schematic of the electron-beam evaporation process (fig. 1, a), in order to obtain the required coating thickness at each point of the blade, it is necessary to create conditions for the ceramic particles evaporated from the crucible to reach that point. For this purpose, a high vacuum is maintained in the installation to prevent collisions between ceramic molecules and their scattering [10, 11]; in this case, the “line-of-sight” condition applies, i.e., only surfaces that are in direct line of sight from the crucible are coated. However, the cosine distribution of the vapor flow (fig. 3) also leads to significant deposition of the evaporated material

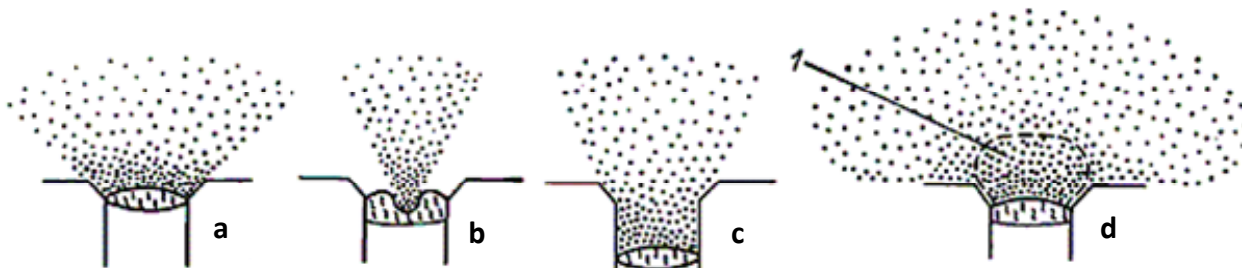


Fig. 3. The effect of the shape of the evaporation surface of real evaporators with a small surface on the distribution of the flow density: a – the formation of a convex surface due to the surface tension of the evaporated material; b – the restriction of the vapor distribution by the walls of the crucible when the crucible is not fully filled with material; c – the formation of a concave surface due to a local increase in vapor pressure; d – the formation of a vapor cloud 1 that acts as a vapor source instead of the evaporation surface



Fig. 4. Appearance of the electron beam installation with ceramic condensation on its walls

on the walls of the electron-beam facility installation (fig. 4), which considerably increases its consumption. Furthermore, in order to obtain a uniform coating thickness at every point along the blade airfoil profile during its rotation in the facility, it is necessary to select a coating zone (working zone) with a relatively uniform vapor flow density [12, 13].

It can be seen that in order to reduce the consumption of the evaporated material, it is necessary to control the vapor flow in a given direction. Improving the ceramic layer of the TBC by densifying it, with the aim of reducing gas permeability and porosity – which will reduce the penetration of fuel combustion products into the inter-columnar space – is one of the directions for improving TBCs.

Research Data and Discussion

In the electron-beam method of coating deposition on parts, the material, for example $\text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$, is evaporated in a vacuum installation from a crucible by heating with an electron beam and then condenses on the part surface (fig. 1, a). Evaporation of oxides is generally accompanied by a change in the form of the original molecules. For most refractory compounds used in protective coating deposition, dissociation of the original molecules with the formation of gaseous products is characteristic. However, in works [12, 14, 15], $\text{ZrO}_2 \cdot \text{Y}_2\text{O}_3$ ceramic is cited as an example of a material that evaporates from water-cooled copper crucibles under a focused electron beam with virtually no

Table 1

Dissociation of zirconium dioxide during evaporation in an electron beam installation

Vapor phase composition, percent by volume	Temperature, K		
	2950	3500	4000
O	36.6	38.42	39.67
O ₂	0.33	0.82	1.4
Zr	0.02	0.06	0.13
ZrO	38.95	40.0	42.0
ZrO ₂	26.1	20.7	16.8
Degree of dissociation, α	0.59	0.65	0.72

change in its original composition. The dissociation process is discussed in works [4, 16], where the degree of dissociation of ZrO₂ is given (tab. 1) and it is indicated that the oxygen present in the dissociation products is partially removed from the evaporation zone and carried away into the vacuum system. To compensate for this loss, a method is used in which a certain amount of oxygen is supplied to the crucible zone, resulting in the formation of a white layer of ZrO₂·Y₂O₃ of stoichiometric composition.

The degree of dissociation depends on many process parameters, including the temperature of the melt pool of the evaporated ceramic, the evaporation rate, and the vacuum level. Evidence of the ceramic dissociation process is the black color (fig. 2) of the surface of the ceramic rod after it has cooled [4, 16].

In order to investigate the process of formation of thicknesses and microstructures of coatings deposited in a cosine vapor flow, the authors conducted the following experiment. To eliminate the influence of the blade shape (curvature), flat specimens (plates) were fabricated and welded to the locks of a test blade (fig. 5). The plates were divided into sections for the study of the formed coatings.

The coating structure was investigated by X-ray diffractometry and scanning electron microscopy. The coating thickness was evaluated using scanning electron microscopy and optical metallography (at magnifications of up to 1000×). Thickness measurements for each of the specimens were performed at least 3 times.

The formation of coatings begins with the deposition of a thin film of the condensing material on the substrate (part surface). An atom (molecule) striking the surface enters the field of attractive forces of the surface atoms (molecules). The following situations are possible after this: (1) the atom is adsorbed and finally “sticks” to the surface; (2) some time after adsorption, the atom leaves the surface again; (3) the impinging atom is instantly reflected from the surface [17, 18]. Usually, the first two possibilities occur. The probability of capture of an incident atom is characterized by the condensation coefficient α_k , equal to the ratio of the number of atoms condensed on the surface to the total number of incident atoms. The value of α_k decreases with increasing substrate temperature and with increasing size mismatch (difference in crystal lattice parameters) between the condensing substance and the substrate [12]. It should be emphasized that in electron-beam evaporation, the vapor flow consists almost entirely of neutral atoms; the degree of ionization does not exceed 0.05–0.1% [12].

The material distribution during deposition from a point source is determined by the formula

$$d_m/d_s \sim (m/h^2) \cdot \cos\varphi,$$

where d_m is the mass of material deposited on the surface element d_s , m is the total amount of evaporated material, h is the distance from the evaporator to the condensation surface, and φ is the angle between the vapor flow direction and the normal to the surface element. Typically, the following values are adopted: $h = 250 \div 300$ mm,

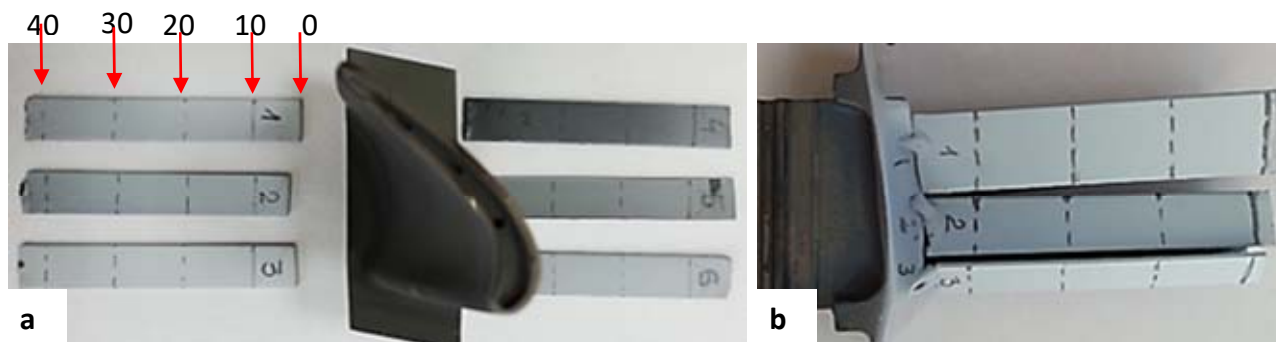


Fig. 5. Appearance of the blade (a) and its model with plates (b)

and the length (diameter) of the condensation surface $l = 150 \div 180$ mm [12]; in fact, these are limiting values.

As follows from the material distribution formula for evaporation in vacuum using electron beams, the zone of uniform deposition occupies a small area on a hemisphere with a large radius, i.e., the efficiency of the process (facility productivity) is low and apparently cannot be significantly increased.

During the experiment in the UE-175 unit, it was found that to deposit a ceramic layer of ~ 100 μ m thickness on the blades, about 450....500 grams of ceramic are evaporated during the process cycle. At the same time, about 1.5 grams are deposited on one blade, and on 14 blades – 21 grams of ceramic. Thus, the utilization factor of the evaporated material is only 4%. Most of the evaporated material overflies the parts and deposits on the vacuum installation walls in all directions. Screens are installed to protect them. Therefore, it seems reasonable to evaluate the possibility of using special screens to direct (concentrate) the vapor cloud toward the parts to be coated.

It was found that the vapor flow density distribution (fig. 6) changes cosinusoidally. Actually, the vapor flow density decreases more sharply with increasing angle φ (the angle of incidence of the vapor flow on the substrate), which is why it is recommended to set the radius R of the substrate placement relatively large.

The nature of the variation of the vapor flow profile was analyzed based on the results of thickness measurements (tab. 2) and microstruc-

tures (fig. 7) of coatings on different sections of the plates, depending on their position above the crucible.

As it can be seen (fig. 7), the inclination of the crystallites and the thickness of the ceramic layer are consistent with the variation in the vapor flow density profile of the deposited ceramic. It can be observed that in the central part of the plates (fig. 7, *a*) the coating thickness is 10–15% greater than away from the central part (fig. 7, *b, c, d*), and the inclination angle of the ceramic columns reaches 10–13 (fig. 7, *c, d*). Consequently, the performance characteristics of the formed coating will be lower at the periphery of the working zone.

The same pattern of thickness variation is also observed on other specimens – the plates (fig. 5, 7).

In view of the foregoing, as one possible option for concentrating the vapor cloud of the evaporator, it is proposed to install a special cone above the crucible (fig. 8), either with cooling of its walls or uncooled (this will have to be determined in experiments, as well as the degree of condensation of the material evaporated from the crucible on the walls of this cone). In the electron-beam installation, the electron beam is moved by scanning at an angle of $\sim 50^\circ$ to the crucible surface. As a result, the electron beam will impinge on the crucible through an open aperture in the protective cone near its base. An observation port for viewing the surface of the evaporated material is also required. Therefore, in this case, a part of the vapor flow will immediately escape into the vacuum chamber.

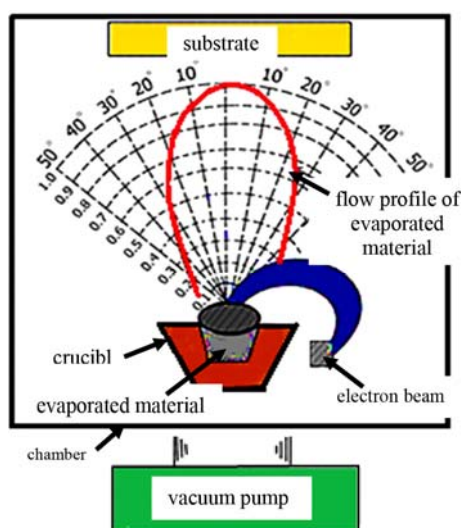


Fig. 6. Distribution of vapor flow density from a small-surface evaporator with a power of 5 kW, evaporation from a water-cooled crucible, evaporation rate of 0.4 g/min

Table 2

Coating thickness and microstructure on sample № 1

Crucible center distance d , mm	0	10	20	30	40
Coating thickness, mkm	97	98	109	86	77
Microstructure in Figure 7	a	b	c	d	

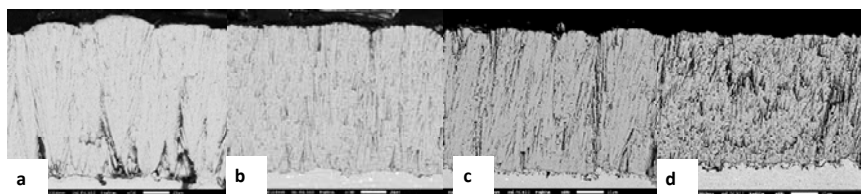


Fig. 7. The microstructure of the TBC on the plate, depending on the location above the crucible: a – above the crucible; b – 20 mm from the center; c – 30 mm from the center; d – 40 mm from the center

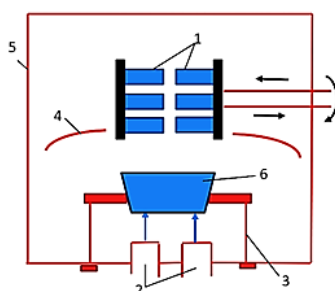


Fig. 8. Diagram of the modified electron beam installation: 1 – sprayed parts, 2 – crucibles, 3 – shutter, 4 – protective screens, 5 – vacuum chamber, 6 – cone

The modification of the electron-beam facility proposed by the authors is intended to reduce the consumption of the evaporated material.

Conclusions

1. It has been established that the vapor flow of the evaporated material in the electron-beam facility exhibits a cosine-type density distribution, which significantly affects the thickness and microstructure of the resulting coating in different regions of the working zone.

2. It has been experimentally established that the coating thickness and the direction of growth of ceramic crystallites vary depending on the position of the substrate surface relative to the centre of the crucible.

3. A modification of the electron-beam facility has been proposed, aimed at concentrating the vapor flow in order to increase the utilization factor of the evaporated material.

References

1. Samoylenko, V.M., Aksenov, A.N., Ravilov, R.G., Opokin, V.G. (2023). Protective coatings for turbine blades of III-IV generation. *Elektrometallurgiya*, no. 1, pp. 21–28. DOI: 10.31044/1684-5781-2023-0-1-21-28 (in Russian)
2. Opokin, V.G., Ravilov, R.G., Shestakov, V.V., Samoylenko, V.M. (2022). Prospects for the development of heat-protective coatings for turbine blades of gas turbine engines. *Nauka. Tekhnika. Chelovek: istoricheskiye, mirovozzrencheskiye i metodologicheskiye problemy*, vol. 1, no. 12, pp. 449–454. (in Russian)
3. Grechanyuk, N.I., Osokin, V.A., Shpak, P.A., Piyuk, E.L. (2005). Effect of production parameters on the structure of the outer ceramic layer in two-layer metal – ceramic coatings prepared by electron-beam deposition in one production cycle. *Powder metallurgy and metal ceramics*, vol. 44, no. 3-4, pp. 137–142. DOI: 10.1007/s11106-005-0071-9
4. Tamarin, Y.A. (2002). Protective coatings for turbine blades. ASM International: Materials Park, 217 p.
5. Ignatev, P.G.S., Shatulsky, A.A. (2025). Analysis and development of methods for eliminating production defects of thermal barrier coatings formed by electron beam physical vapor deposition in the vacuum. *Proceedings of the southwest state university. Series: engineering and technologies*, vol. 15, no. 2, pp. 45–61. DOI: 10.21869/2223-1528-2025-15-2-45-61 (in Russian)
6. Schulz, U., Schmucker, M. (2000). Microstructure of ZrO₂ thermal barrier coatings applied by EB-PVD. *Material Science and Engineering: A*, vol. 276, issue 1-2, pp. 1–8. DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00576-6
7. Movchan, B.A., Tutov, N.D. (2009). Elektron-beam evaporation and deposition of materials from vapour phase in the vacuum. *Izvestiya Kurskogo Gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, no. 1 (26), pp. 12–18. (in Russian)
8. Borodin, S.O., Emelyanov, A.L., Avashin, D.D., Rubtsov, V.P. (2007). Principles of control of the coating application process in an electron beam installation. *Vakuumnaya tekhnika i tekhnologiya*, vol. 17, no. 3, pp. 163–165. (in Russian)
9. Ivashin, A.D. (2008). Adaptive control system for covering drawing process in electron beam installation. *Vestnik moskovskogo energeticheskogo instituta*, no. 5, pp. 147–151. (in Russian)
10. Yushkov, Yu.G., Zolotukhin, D.B., Oks, E.M., Tyunkov, A.V. (2020). Different stages of electron-beam evaporation of ceramic target in medium vacuum. *Journal of Applied Physics*, vol. 127, issue 11. ID: 113303. DOI: 10.1063/1.5142420 (accessed: 30.10.2025).
11. Neal, J.W. (2013). Electron beam vapor deposition apparatus and method of coating. Patent no. 8419857 US: publ. April 16, 9 p.
12. Wu, L.T., Wu, R.T., Zhao, X., Xiao, P. (2013). Microstructure parameters affecting interfacial adhesion of thermal barrier coatings by the EB-PVD method. *Material Science and Engineering: A*, vol. 594, pp. 193–202. DOI: 10.1016/j.msea.2013.11.054
13. Kadam, N.R., Karthikeyan, G., Kul-karni, Dh.M. (2020). Effect of substrate rotation on the microstructure of 8YSZ thermal barrier coatings by EB-PVD. *In: Materials Today:*

Proceeding, vol. 28, part 2, pp. 678–683. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.276

14. Movchan, B.A., Malashenko, I.S. (1983). Heat-resistant coatings deposited in vacuum. Kyiv: Naukova dumka, 232 p. (in Russian)

15. Zhigachev, A.O., Golovin, Yu.I., Umrikhin, A.V. et al. (2018). The world of materials and technologies. Ceramic materials based on zirconium dioxide, in Yu.I. Golovin (Ed.). Moscow: TEKHNOSEFERA, 358 p. (in Russian)

16. Tamarin, Yu.A., Kachanov, E.B. (2008). Electron-beam technology for applying thermal protection coatings. *Novyye tekhnologicheskiye protsessy i nadozhnost GTD, TsIAM*, issue 7, pp. 144–158. (in Russian)

17. Abraimov, N.V., Ovchinnikov, V.V. (2023). High-temperature materials, coatings and welding in aircraft and engines. Moscow: Nauka i tekhnologii, 636 p. (in Russian)

18. Antsiferov, V.N., Gorchakov, A.I., Krivonosova, E.A., Matygullina, E.V., Khanov, A.M. (2006). Theory and technology of coatings. Vacuum condensation sputtering of coatings: Tutorial. Perm: Izdatelstvovo Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 73 p. (in Russian)

Список литературы

1. Самойленко В.М. Защитные покрытия для лопаток турбины III-IV поколения / В.М. Самойленко, А.Н. Аксенов, Р.Г. Равилов, В.Г. Опокин // *Электрометаллургия*. 2023. № 1. С. 21–28. DOI: 10.31044/1684-5781-2023-0-1-21-28

2. Опокин В.Г. Перспективы развития теплозащитных покрытий для лопаток турбины газотурбинных двигателей / В.Г. Опокин, Р.Г. Равилов, В.В. Шестаков, В.М. Самойленко // *Наука. Техника. Человек: исторические, мировоззренческие и методологические проблемы*. 2022. Т. 1, № 12. С. 449–454.

3. Гречанюк Н.И. Влияние технологических параметров на структуру внешнего керамического слоя в двухслойных покрытиях металл-керамика, полученных электронно-лучевым осаждением за один технологиче-

ский цикл / Н.И. Гречанюк, В.А. Осокин, П.А. Шпак, Е.Л. Пилюк // *Порошковая металлургия*. 2005. № 3. С. 41–48.

4. Tamarin Y.A. Protective coatings for turbine blades. ASM International: Materials Park, 2002. 217 p.

5. Игнатьев З.Е., Шатульский А.А. Анализ и разработка методов устранения производственных дефектов теплозащитных покрытий, получаемых электронно-лучевым испарением в вакууме // *Известия Юго-Западного государственного университета*. Серия: Техника и технологии. 2025. Т. 15, № 2. С. 45–61. DOI: 10.21869/2223-1528-2025-15-2-45-61

6. Schulz U., Schmucker M. Microstructure of ZrO₂ thermal barrier coatings applied by EB-PVD // *Material Science and Engineering: A*. 2000. Vol. 276, iss. 1-2. Pp. 1–8. DOI: 10.1016/S0921-5093(99)00576-6

7. Мовчан Б.А., Тутов Н.Д. Электронно-лучевое испарение и осаждение из паровой фазы в вакууме // *Известия Курского ГТУ*. 2009. № 1 (26). С. 12–18.

8. Бородин С.О. Принципы управления процессом нанесения покрытия в электронно-лучевой установке / С.О. Бородин, А.Л. Емельянов, Д.Д. Авашин, В.П. Рубцов // *Вакуумная техника и технология*. 2007. Т. 17, № 3. С. 163–165.

9. Ивашин А.Д. Адаптивная система управления процессом нанесения покрытия в электронно-лучевой установке // *Вестник МЭИ*. 2008. № 5. С. 23–27.

10. Yushkov Yu.G. Different stages of electron-beam evaporation of ceramic target in medium vacuum / Yu.G. Yushkov, D.B. Zolotukhin, E.M. Oks, A.V. Tyunkov [Электронный ресурс] // *Journal of Applied Physics*. 2020. Vol. 127, iss. 11. ID: 113303. DOI: 10.1063/1.5142420 (дата обращения: 30.10.2025).

11. Neal J.W. Electron beam vapor deposition apparatus and method of coating. Patent no. 8419857 US: publ. 16.04.13. 9 p.

12. Wu L.T. Microstructure parameters affecting interfacial adhesion of thermal barrier coatings by the EB-PVD method / L.T. Wu, R.T. Wu, X. Zhao, P. Xiao // *Material Science and*

Engineering: A. 2013. Vol. 594. Pp. 193–202. DOI: 10.1016/j.msea.2013.11.054

13. Kadam N.R., Karthikeyan G., Kul-karni Dh.M. Effect of substrate rotation on the microstructure of 8YSZ thermal barrier coatings by EB-PVD // Materials Today: Proceeding, 2020. Vol. 28, part 2. Pp. 678–683. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.276

14. Мовчан Б.А., Малащенко И.С. Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. Киев: Наукова думка, 1983. 232 с.

15. Жигачев А.О., Головин Ю.И., Умрихин А.В. и др. Мир материалов и технологий. Керамические материалы на основе диоксида циркония / Под общ. ред. Ю.И. Головина. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2018. 358 с.

16. Тамарин Ю.А., Качанов Е.Б. Электроннолучевая технология нанесения теплозащитных покрытий // Новые технологические процессы и надежность ГТД, ЦИАМ. 2008. Выпуск 7. С. 144–158.

17. Абраимов Н.В., Овчинников В.В. Высокотемпературные материалы, покрытия и сварка в летательных аппаратах и двигателях. М.: Наука и технологии, 2023. 636 с.

18. Анциферов В.Н. Теория и технология покрытий. Вакуумное конденсационное напыление покрытий: учеб. пособие / В.Н. Анциферов, А.И. Горчаков, Е.А. Кривоносова, Е.В. Матыгуллина, А.М. Ханов. Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. 73 с.

Information about the authors

Vasily M. Samoylenko, Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Head of the Aviation Fuel Supply Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, v.samoilenko@mstuca.ru.

Vladimir G. Opokin, Candidate of Engineering Sciences, Lead Engineer, Lytkarino Machine-Building Plant, a branch of PJSC UEC-UMPO, opokin_vg@lmz.umpo.ru.

Rinat G. Ravilov, Candidate of Engineering Sciences, Chief Metallurgist, Lytkarino Machine-Building Plant, a branch of PJSC UEC-UMPO, rinat.ravilov@lmz.umpo.ru.

Mikhail D. Petrov, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, Central Institute of Aviation Engine Engineering named after Baranova, rvh@list.ru.

Сведения об авторах

Самойленко Василий Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой авиатопливообеспечения МГТУ ГА, v.samoilenko@mstuca.ru.

Опокин Владимир Геннадьевич, кандидат технических наук, ведущий инженер, Лыткаринский машиностроительный завод – филиал ПАО «ОДК-УМПО» opokin_vg@lmz.umpo.ru.

Равилов Ринат Галимчанович, кандидат технических наук, главный металлург, Лыткаринский машиностроительный завод – филиал ПАО «ОДК-УМПО», rinat.ravilov@lmz.umpo.ru.

Петров Михаил Дмитриевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Центральный институт авиационного моторостроения им. Баранова, rvh@list.ru.

Поступила в редакцию
Одобрена после рецензирования
Принята в печать

18.12.2025
23.01.2026
23.07.2026

Received
Approved after reviewing
Accepted for publication

18.12.2025
23.01.2026
23.07.2026

УДК. 656.7.08

DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-73-84

Перспективы и проблемы применения беспилотных воздушных судов для обнаружения мест авиационных катастроф

Ван Синьюй¹, М.А. Киселев^{1,2}, В.В. Воробьев¹, С.Ф. Бородин¹

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

²Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем,
г. Москва, Россия

Аннотация: Статистика авиационных катастроф указывает на то, что достаточно часто для обнаружения мест крушения воздушных судов (ВС) требуются длительные сроки. Отдельные места катастроф так и остаются неустановленными. Причем далеко не все катастрофы с большим сроком обнаружения мест крушения происходят над водной поверхностью. Многие такие катастрофы происходят над земной поверхностью. Сложность поиска мест падения ВС и их обломков в этом случае обусловлена большой площадью вероятных мест падения ВС, невозможностью обследования всей площади пешими группами людей, относительно большой скоростью и высотой полета поисковых ВС, малыми размерами обломков ВС, сокрытием мест катастроф растительностью или осадками. В качестве одного из перспективных в последние годы рассматривается радиолокационный метод поиска обломков ВС. Однако габариты радиолокационной станции (РЛС), способной обнаруживать радиоконтрастные обломки ВС с тех высот, на которых сейчас происходит полет поисковых пилотируемых ВС, при сегодняшнем уровне развития технологий не являются приемлемыми для постановки такой станции на борт ВС. Допустимые габариты такой РЛС достигаются при снижении высоты полета, что невозможно для пилотируемых ВС в силу трудности обеспечения необходимого уровня безопасности полета на малых высотах. В то же время достаточно бурное развитие беспилотных воздушных судов (БВС), появление компактной целевой нагрузки в виде камер оптического и теплового диапазонов, малых РЛС открывает возможности по созданию специализированных поисковых БВС, способных, по мнению авторов, кардинально сократить время обнаружения мест крушения ВС. В представленной обзорной статье проанализирована статистика авиационных происшествий за последние десять лет. Произошедшие авиационные катастрофы разделены по типу местности, а также по длительности поисковых мероприятий по установлению мест крушения. Выделены факторы, затрудняющие поиск мест падения ВС и их обломков. Проанализированы перспективы и проблемы использования БВС в поисковых операциях. Показана перспективность и возможность создания мобильных поисковых беспилотных авиационных систем (БАС) на базе разнородных БВС и мобильных дронопортов. В качестве одной из проблем, требующих решения на пути создания указанных поисковых БАС, обозначена проблема синтеза управления группой БВС, обеспечивающая обследование заданного района поиска с обходом препятствий на пути полета БВС.

Ключевые слова: авиационная катастрофа, поиск места падения воздушного судна, беспилотное воздушное судно, управление группой беспилотных воздушных судов.

Для цитирования: Синьюй В. Перспективы и проблемы применения беспилотных воздушных судов для обнаружения мест авиационных катастроф / В. Синьюй, М.А. Киселев, В.В. Воробьев, С.Ф. Бородин // Научный вестник МГТУ ГА. 2026. Т. 29, № 4. С. 73–84. DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-73-84

Prospects and problems of using unmanned aircraft to locate aircraft accident sites

Wang Xinyu¹, M.A. Kiselev^{1,2}, V.V. Vorobyev¹, S.F. Borodkin¹

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

²State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, Russia

Abstract: Aviation disaster statistics indicate that it often takes a long time to locate aircraft crash sites. Individual disaster sites remain unidentified. Moreover, not all disasters with a long time to detect crash sites occur above the water surface. Many such

disasters occur above the earth's surface. The difficulty of searching for aircraft crash sites and aircraft debris in this case is due to the large area of probable aircraft crash sites, the impossibility of examining the entire area by walking groups of people, the relatively high speed and altitude of the search aircraft, the small size of aircraft debris, and the concealment of disaster sites by vegetation or precipitation. In recent years, the radar method of searching for aircraft debris has been considered as one of the promising methods. However, the dimensions of a radar station capable of detecting high-contrast aircraft debris from the heights at which manned search aircraft are currently flying are not acceptable for putting such a station on board an aircraft at the current level of technology development. Acceptable dimensions of such a radar are achieved by lowering the flight altitude, which is impossible for manned aircraft due to the difficulty of ensuring an acceptable level of flight safety at low altitudes. At the same time, the rapid development of unmanned aerial vehicles (UAVs), the emergence of a compact target load in the form of optical and thermal range cameras, and small radars opens up opportunities to create specialized search UAVs that, according to the authors, can dramatically reduce the time it takes to detect aircraft crash sites. The presented review article analyzes the statistics of aviation accidents over the past ten years. The aviation disasters that have occurred are divided by type of terrain, as well as by the duration of search activities to identify crash sites. The factors that make it difficult to find crash sites and aircraft debris are highlighted. The prospects and problems of using UAVs in search operations are analyzed. The prospects and the possibility of creating mobile search unmanned aircraft systems based on heterogeneous UAVs and mobile drone ports are shown. As one of the problems that need to be solved on the way to creating these search UAS, the problem of synthesizing the control of a group of UAVs is identified, providing a survey of a given search area while avoiding obstacles in the path of the UAV flight.

Keywords: aviation accident, search for aircraft crash site, unmanned aircraft, unmanned aircraft group control.

For citation: Xinyu, W., Kiselev, M.A., Vorobyev, V.V., Borodkin, S.F. (2026). Prospects and problems of using unmanned aircraft to locate aircraft accident sites. Civil Aviation High Technologies, vol. 29, no. 4, pp. 73–84. DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-73-84

Анализ статистики авиационных происшествий

Анализ статистики авиационных происшествий за последние 12 лет (с 1 января 2011 года по 31 декабря 2022 года)^{1,2,3,4} пока-

¹ Accident Archives [Электронный ресурс] // Bureau of Aircraft Accidents Archives. URL: https://www.baaa-acro.com/index.php/crash-archives?created=2011-01-01&created_1=2022-12-31&field_crash_region_target_id=All&field_crash_country_target_id=&field_crash_registration_target_id=&field_crash_aircraft_target_id=&field_crash_operator_target_id=&field_crash_cause_target_id=All&field_crash_zone_target_id=&field_crash_site_type_target_id=All&field_crash_phase_type_target_id=All&field_crash_flight_type_target_id=All&field_crash_survivors_value=All&field_crash_city_target_id (дата обращения: 14.08.2025).

² Авиационные происшествия [Электронный ресурс] // National Transportation Safety Board. URL: <https://www.nts.gov/Pages/search.aspx#k=air%20crash> (дата обращения: 14.08.2025).

³ Авиакатастрофы 01.01.2011-31.12.2022 [Электронный ресурс] // ФАВТ. URL: <https://famt.gov.ru/search/?query=%D0%B0%D0%B2%D0%B8%D0%B0%D0%BA%D0%B0%D1%82%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%84%D0%B0&type=&tag=&date=01.01.2011+-+31.12.2022&sort=date> (дата обращения: 14.08.2025).

⁴ Авиакатастрофы 01.01.2011-31.12.2022 [Электронный ресурс] // МАК. URL: https://mak-iac.org/search/?q=%D0%B0%D0%B2%D0%B8%D0%B0%D0%BA%D0%B0%D1%82%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%84%D0%B0&where=iblock_rassledovaniya&how=r&from=01.01.2011&to=31.12.2022 (дата обращения: 14.08.2025).

зал, что за это время в мире произошло 1 756 авиационных катастроф. Указанные авиационные катастрофы по местам крушения воздушных судов (ВС) делятся так:

- 1) 1 003 – в районе аэропорта (в радиусе 10 км);
- 2) 323 – в равнинной местности (не включая пустыни);
- 3) 177 – над водной поверхностью;
- 4) 158 – в горной местности;
- 5) 85 – в районе населенных пунктов;
- 6) 10 – в пустынях.

Исключая авиационные катастрофы в районе аэропортов и населенных пунктов, то есть там, где места крушений обнаруживаются достаточно оперативно, а также случаи, по которым нет точных данных о продолжительности поисковых мероприятий, дальнейший анализ будем проводить по следующей выборке (рис. 1):

- 1) 184 авиационные катастрофы, произошедшие в равнинной местности (49 %);
- 2) 108 авиационных катастроф, произошедших в горной местности (29 %);

[B0%D0%BA%D0%B0%D1%82%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%84%D0%B0&where=iblock_rassledovaniya&how=r&from=01.01.2011&to=31.12.2022](https://mak-iac.org/search/?q=%D0%B0%D0%B2%D0%B8%D0%B0%D0%BA%D0%B0%D1%82%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%84%D0%B0&where=iblock_rassledovaniya&how=r&from=01.01.2011&to=31.12.2022) (дата обращения: 14.08.2025).

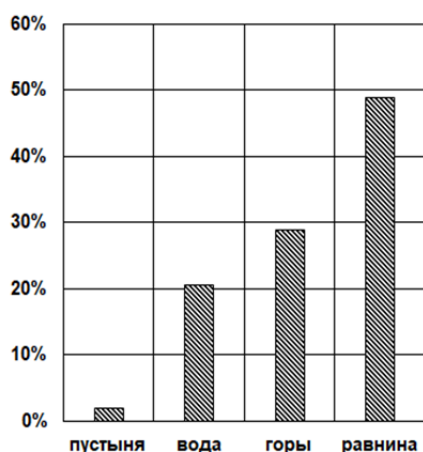


Рис. 1. Соотношение мест авиационных катастроф с 2012 по 2022 год

Fig. 1. The ratio of aviation disaster sites from 2012 to 2022

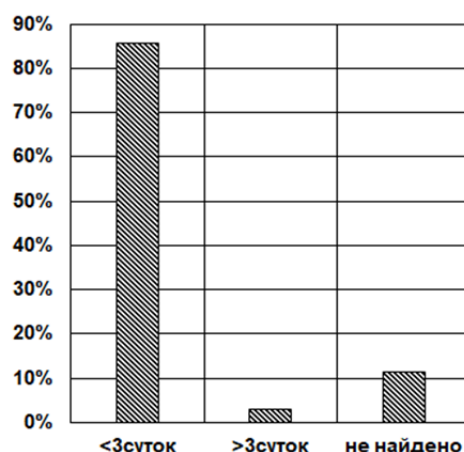


Рис. 2. Распределение катастроф по длительности поиска мест падений ВС с 2012 по 2022 год

Fig. 2. Distribution of disasters by the duration of the search for aircraft crash sites from 2012 to 2022

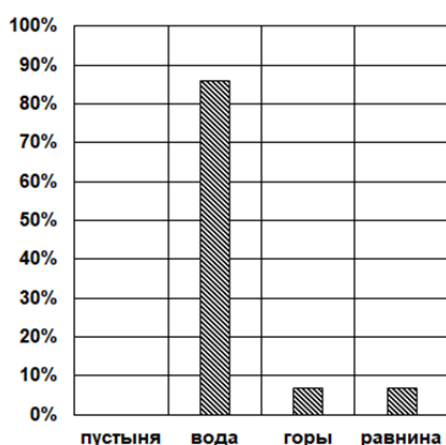


Рис. 3. Соотношение необнаруженных мест катастроф по типу местности, 2012–2022 годы

Fig. 3. Proportion of undetected aviation disaster sites by terrain type, 2012–2022

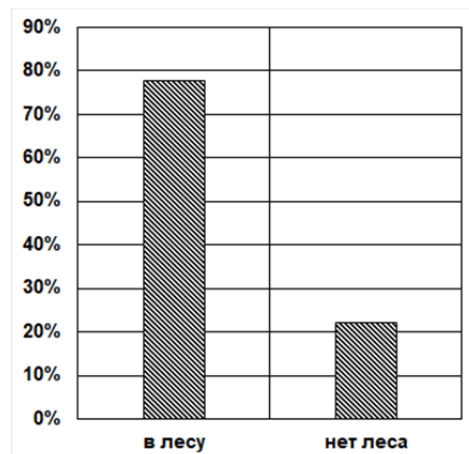


Рис. 4. Соотношение катастроф по типу местности с длительностью поиска более трех суток, 2012–2022 годы

Fig. 4. Proportion of disasters by type of terrain with search duration of more than 3 days, 2012–2022

3) 77 авиационных катастроф, произошедших над водной поверхностью (21 %);

4) 7 авиационных катастроф, произошедших в пустынях (1 %).

На рис. 2 представлено распределение указанных авиационных катастроф по длительности поиска мест падений ВС. Видно, что подавляющая часть мест падений ВС (85 %) обнаруживается в течение первых трех суток. Однако в достаточно весомой части (11 %) авиационных катастроф места падения ВС так и остаются найденными. Распределение не-

обнаруженных мест катастроф по типу местности представлено на рис. 3. Видно, что подавляющая часть указанных катастроф (86 %) произошли над водной поверхностью, где трудности определения мест катастроф и поиска обломков ВС связаны с большими глубинами, а также течениями, изменяющими первоначальное расположение обломков ВС. В то же время весомая часть авиационных катастроф с необнаруженным местом падения ВС (14 %) произошли над сушей – 7 % в горной местности и 7 % в равнинной. Заметим

Таблица1
Table 1

Факторы, затруднившие поиск мест авиационных катастроф в лесных районах
Factors complicating the search of aircraft accidents in forested areas

№	Авиационное происшествие	Факторы, затруднившие обнаружение мест авиационных происшествий	Время поиска
1	Катастрофа Ан-32, штат Аруначал-Прадеш, Индия, 2019 год	Дожди. Гористая местность, поросшая высокими деревьями	7 дней
2	Катастрофа Ан-2, Республика Бурятия, 2020 год	Значительное удаление места крушения от предполагаемого маршрута полета. Скалистая горная местность. Несрабатывание бортового аварийного радиомаяка	5 дней
3	Катастрофа БН-2А, Западная провинция Папуа – Новой Гвинеи, 2017 год	Неблагоприятные погодные условия, облачность. Горная местность, поросшая лесом	4 дня
4	Катастрофа Ил-76, Иркутская область, 2016 год	Плотное задымление от лесного пожара. Значительное удаление места крушения от предполагаемого	2 дня
5	Катастрофа Ан-2, район Серова, 2012 год	Местность, покрытая лесом, скрывшим обломки ВС	10 месяцев

также, что из катастроф, в которых время поиска мест крушений ВС заняло более трех суток, большая часть (78 %) произошла в местности, покрытой лесом (рис. 4).

Факторы, затрудняющие обнаружение мест авиационных катастроф

В табл. 1 представлена информация о факторах, затруднивших обнаружение мест авиационных катастроф, произошедших в местности, покрытой лесом^{5,6,7,8,9}.

Как следует из данных табл. 1, а также из анализа информации о поисковых операциях указанных выше катастроф, к факторам, затруднившим обнаружение мест авиационных катастроф, следует отнести:

- 1) отсутствие эффективных средств автоматизированного поиска обломков ВС, доминирование визуального метода поиска;
- 2) сложный горный рельеф, который:
 - затрудняет использование техники, в том числе поискового оборудования, установленного на ВС, участвующих в спасательной операции;
 - существенно увеличивает площадь возможного падения ВС;
 - значительно сокращает световой день, приводит к отсутствию сумерек;

⁵ Antonov An-32. Accident. Indian Air Force - IAF [Электронный ресурс] // AviationSafetyNetwork. URL: <https://aviation-safety.net/wikibase/319426> (дата обращения: 14.08.2025).

⁶ Antonov An-2R. Accident [Электронный ресурс] // AviationSafetyNetwork. URL: <https://asn.flightsafety.org/wikibase/319149> (дата обращения: 14.08.2025).

⁷ Britten-Norman BN-2A Islander. Accident [Электронный ресурс] // AviationSafetyNetwork. URL: <https://asn.flightsafety.org/wikibase/319751> (дата обращения: 14.08.2025).

⁸ Ilyushin Il-76TD. Accident [Электронный ресурс] // AviationSafetyNetwork. URL: <https://asn.flightsafety.org/wikibase/320052> (дата обращения: 14.08.2025).

⁹ Самолет Ан-2. Катастрофа [Электронный ресурс] // Окончательный отчет о катастрофе Ан-2. URL: https://mak-iac.org/upload/iblock/0f7/report_ra-40312.pdf (дата обращения: 14.08.2025).

Таблица 2
Table 2

Возможности по визуальному обнаружению различных объектов в полете
Capabilities for visual detection of various objects in flight

Объект наблюдения	Время года, суток	Высота полета, м	Дальность обнаружения, км
Один человек (группа людей)	зима	200	1,6–1,8
	лето	200	1,0–1,4
Самолет (вертолет)	зима и лето	200	2–4
Костер	ночь	300	8–12
Мигающий карманный фонарь	ночь	300	2–4

3) густая растительность в виде леса или кустарника, затрудняющая обнаружение обломков ВС с воздуха и посадку поисковых вертолетов в местах предполагаемого крушения ВС;

4) неблагоприятные погодные условия, в том числе низкая облачность, осадки в виде проливных дождей, способные изменить местоположение обломков ВС, туман, затрудняющие обнаружение обломков ВС с воздуха.

Указанные факторы можно объединить в три группы:

1. Поверхность и растительность, ее покрывающая.
2. Метеорологические факторы.
3. Технические факторы, связанные с наличием специализированного поискового оборудования и средств доставки его в район предполагаемого крушения ВС.

Специализированное поисковое оборудование обеспечивает возможности поиска обломков ВС посредством:

- обнаружения (пеленгации) аварийных радиомаяков ВС;
- обнаружения обломков ВС оптическими и инфракрасными камерами, а также радиолокационными станциями (РЛС).

Оптические средства значительно повышают эффективность визуального поиска. Так, например, камеры, установленные на спутниках, в настоящее время способны оперативно получать

изображение с разрешением до 25 см. В то же время оптические средства не работают в случае сокрытия обломков ВС туманом, снегом или растительностью. К оптическим следует отнести и визуальный метод поиска, выполняемый с поисковых ВС, эффективность которого отражают данные, представленные в табл. 2¹⁰.

Инфракрасные средства работают только в короткий период после крушения до момента выравнивания температуры обломков ВС с температурой окружающей среды.

Эффективность РЛС существенно зависит от высоты полета [1, 2]. Так, при полете на высоте 1 000 м разрешающая способность авиационной антенны обычных размеров и достаточно узкой ширины диаграммы направленности 2° составляет порядка 35 м, что очевидно недостаточно для поиска мест падения ВС. При уменьшении же высоты полета разрешающая способность РЛС линейно увеличивается и, например, на высоте полета

¹⁰ Руководство по поисковому и аварийно-спасательному обеспечению полетов гражданской авиации СССР (утв. приказом МГА СССР от 28.03.1991 № 65) [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. URL: <https://avam-avia.ru/wp-content/uploads/2018/01/RPASOP-GA-91.-Rukovodstvo-po-poiskovomu-i-avariyno-spatelnomu-obespecheniyu-poletov-grazhdanskoy-aviatsii-SSSR.pdf> (дата обращения: 14.08.2025).

10 м разрешающая способность РЛС шириной диаграммы направленности 6° составляет уже порядка 1 м. Кроме того, перспективным представляется использование РЛС с синтезированной апертурой, обеспечивающей достаточное для обнаружения разрешение на малых высотах полета (далее будут подробнее рассмотрены характеристики портативных РЛС).

Таким образом, исходя из анализа статистики авиационных катастроф, факторов, затрудняющих обнаружение мест авиационных катастроф, актуальным представляется разработка мероприятий по повышению эффективности обнаружения мест авиационных катастроф в равнинной и горной местности, покрытой лесами. Очевидным шагом в этом направлении может быть приближение средств обнаружения обломков (оптических, радиолокационных, инфракрасных) к местам расположения обломков, то есть снижение высоты полета носителей такого оборудования вплоть до захода под кроны деревьев, быстрое (в идеале в режиме реального времени) автоматическое определение возможных мест нахождения обломков ВС на основе анализа изображений указанных мест с последующей проверкой операторами и дополнительным обследованием пешими группами. Реализация указанных выше мероприятий возможна на основе создания специализированных поисковых систем на базе групп разнородных беспилотных воздушных судов (БВС).

Анализ возможности создания поисковых систем на базе беспилотных воздушных судов

БВС уже сейчас используются для обнаружения мест авиационных катастроф. Так, например, при расследовании авиационной катастрофы Boeing 737 авиакомпании Eastern Airlines MU5735 в китайском районе Вучжоу в марте 2022 года БВС использовались для фотографирования местности с целью создания ее карты, а также для обнаружения места катастрофы с помощью инфракрасных камер.

Управление БВС осуществлялось в ручном режиме. Тепловизионная камера имела разрешение 640×512 . Из-за сильного дождя температура обломков самолета быстро снизилась, что не позволило обнаружить их с помощью БВС.

Представленный пример хорошо иллюстрирует необходимость использования разнородных средств для обнаружения обломков ВС, в частности средств, которые в меньшей степени подвержены влиянию таких факторов, как осадки и растительность. К таким средствам очевидно относятся РЛС. Важно отметить появление компактных РЛС, которые по своим массогабаритным характеристикам и энергоемкости допускают установку на небольших БВС. Примерами таких РЛС являются радары с частотной линейной модуляцией (FMCW) [3, 4], радары с несколькими входами и несколькими выходами (MIMO) [5], георадары [6]. К важным эксплуатационным свойствам РЛС, помимо «всепогодности», следует отнести следующие возможности:

- обнаружения препятствия (цели);
- определения конфигурации препятствия;
- измерения координат препятствия (расстояние и направление).

Указанные свойства обеспечивают потенциальную возможность создания системы управления БВС для полета среди препятствий, например в лесу.

Отдельно следует отметить так называемые георадары, которые позволяют заглянуть под поверхность грунта, снежный покров с целью обнаружения скрытых объектов [7]. Отметим исследование [8], направленное на разработку методов и алгоритмов дистанционного обнаружения мест авиационных катастроф и идентификации объектов для использования в составе специализированной РЛС для поиска обломков ВС. К сожалению, в указанной работе не представлена оценка массогабаритных характеристик указанной РЛС и ее энергопотребления.

Приведем несколько технических решений, доступных к установке на БВС.



Рис. 5. Камера для БВС ZW-05
Fig. 5. Camera for UAV ZW-05



Рис. 6. Камера для БВС ZWR-02
Fig. 6. Camera for UAV ZWR-02



Рис. 7. Радиолокационный модуль Pulson P410 UWB
Fig. 7. Radar module Pulson P410 UWB



Рис. 8. Окткоптер Spreading Wings S1000 с Pulson P410 UWB на борту
Fig. 8. Octocopter Spreading Wings S1000 with Pulson P410 UWB on board



Рис. 9. Сверхширокополосный (UWB) радиоприемопередатчик, работающий на модуле PulsON 440 (P440)
Fig. 9. Ultra Wideband (UWB) radio transceiver operating PulsON 440 (P440) module

Камера для БВС ZW-05 (рис. 5) массой всего 90 г¹¹. Устанавливается на одноосевой платформе. Поддерживает функцию отслеживания и идентификации объектов. Оснащена камерой видимого диапазона с фиксированным фокусным расстоянием 7,2 мм.

¹¹ Камера для БПЛА ZW-05 [Электронный ресурс] // НПК Фотоника. URL: <https://www.npk-photonica.ru/product/24695/> (дата обращения: 14.08.2025).

Камера для БВС ZWR-02 (рис. 6) массой до 480 г¹². Устанавливается на двухосевой или трехосевой платформе. Обеспечивает отслеживание и идентификацию объектов, а также измерение расстояния до объекта до 3 000 м с помощью встроенного дальномера. В составе камеры два модуля видимого диапазона с фиксированным фокусным расстоянием 7,2 мм.

¹² Камера для БПЛА ZWR-02 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.npk-photonica.ru/product/24696/?ysclid=mgdsd117dm3203543695> (дата обращения: 14.08.2025).

сированным фокусным расстоянием 7,2 и 25 мм и модуль дальнего инфракрасного диапазона с фиксированным расстоянием 24 мм. Последний обеспечивает передачу качественного изображения днем, ночью и в условиях ограниченной освещенности.

РЛС Pulson P410 UWB (рис. 7) массой не более 300 г¹³. Диапазон используемых частот 3,1–5,3 ГГц. Разрешение по дальности около 10 см. В составе РЛС две антенны: первая используется для передачи в правосторонней круговой поляризации, вторая – для приема в левосторонней круговой поляризации. На рис. 8 представлен пример БВС типа октокоптер Spreading Wings S1000 с установленной РЛС Pulson P410 UWB.

Таким образом, можно отметить наличие научно-технического задела и технических возможностей для создания специализированной беспилотной авиационной системы (БАС) для обнаружения мест авиационных катастроф, в том числе скрытых лесом, грунтом или снежным покровом.

Концепция обнаружения мест авиационных катастроф на базе групп разнородных беспилотных воздушных судов

Как было показано ранее, успех поисковой операции по обнаружению мест авиационных катастроф во многом определяется наличием средств, обеспечивающих следующие возможности:

- 1) поиск на большой территории, что обусловлено низкой точностью прогноза мест падения ВС;
- 2) использование разнородных средств поиска (оптических, радиолокационных, тепловизионных);
- 3) максимальное приближение средств поиска к месту катастрофы.

Обеспечить реализацию указанных возможностей на базе одного ВС затруднительно.

Так, оперативный обзорный поиск места падения ВС и его обломков в первые часы после катастрофы с охватом большой площади могут обеспечить БВС самолетного типа с силовой установкой на базе поршневого двигателя с тепловизионными и оптическими камерами, изображение от которых должно передаваться в центр обработки данных в режиме реального времени с последующим автоматическим оперативным анализом специализированными программными средствами. Высота полета таких БВС должна быть максимально возможной исходя из характеристик установленного целевого оборудования с целью увеличения обследуемой в единицу времени площади земной поверхности. Очевидно, что для установления каналов связи между БВС и центром управления и обработки данных с необходимой пропускной способностью может потребоваться ретрансляция сигналов от поисковых БВС, которая может быть обеспечена в том числе и на базе БВС с соответствующим оборудованием. Пример такого оборудования представлен, например, в этом источнике¹⁴. Следовательно, можно утверждать, что создание устойчивых каналов связи между группировкой поисковых БВС и центром обработки данных на сегодняшний день не является технической проблемой.

Детализированный поиск под кронами деревьев, как было показано выше, может быть обеспечен БВС с установленными специализированными РЛС, летающими на минимальной высоте над деревьями, исходя из возможности реализации максимальной разрешающей способности РЛС и обеспечения безопасности полета.

Поиск непосредственно в районе катастрофы под кронами деревьев возможен с

¹³ Time Domain PulsON P410 UWB [Электронный ресурс] // TimeDomain. 2015. 4 p. URL: <https://redecomposition.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/02/timedomain-pulson.pdf> (дата обращения: 14.08.2025).

¹⁴ Геоскан и «Гонец» провели успешное тестирование купольной связи на беспилотнике [Электронный ресурс] // GEOSCAN. URL: <https://www.geoscan.ru/ru/press-releases/geoskan-i-gonec-proveli-uspeshnoe-testirovanie-kupolnoy-svyazi-na-bespilotnike> (дата обращения: 14.08.2025).

помощью небольших БВС с установленными оптическими камерами или РЛС для поиска обломков под грунтом или снежным покровом.

Таким образом, состав группировки БАС для поисковой операции по обнаружению мест авиационных происшествий может включать 4 типа БВС с существенно разными летно-техническими характеристиками. И если БВС самолетного типа с силовой установкой на базе поршневого двигателя можно использовать с площадок, значительно удаленных от предполагаемого района поиска (так, например, дальность полета БВС самолетного типа с поршневым двигателем «Геоскан 701»¹⁵ составляет до 1 000 км, время полета до 10 ч, площадь съемки до 250 км²), то небольшие БВС, способные маневрировать среди деревьев, должны запускаться непосредственно в районе поиска в силу небольших радиуса действия и продолжительности полета. Очевидно также, что необходимо обеспечить возможность многократного запуска таких БВС и возможность изменения района поиска в пределах района возможного падения ВС. Указанные требования по мобильности можно обеспечить посредством мобильных дронопортов с автономной системой питания. В настоящее время дронопорты серийно производятся как в Российской Федерации¹⁶, так и за ее пределами, в частности в Китайской Народной Республике¹⁷. Поэтому задачу создания мобильных дронопортов с автономной системой электропитания, доступных к перемещению, например, вертолетом типа Ми-8 (грузоподъемность на внешней подвеске 3 000 кг), мож-

но считать задачей, технически реализуемой в настоящее время.

К числу задач, которые необходимо решить для создания поисковой системы на базе разнородных БАС, следует отнести задачу управления группой БВС, обеспечивающей:

- 1) полет БВС с обходом препятствий в виде деревьев;
- 2) гарантированное обследование заданного района поиска.

Отметим при этом наличие работ, направленных на формирование траекторий полета одиночного ВС [9–15], группы БВС [16] с облетом препятствий на пути следования.

Заключение

Проведенный анализ показал наличие проблемы обнаружения мест авиационных катастроф в местности, покрытой лесом, – 78 % авиационных катастроф с необнаруженным местом падения ВС, которые составляют 14 % от всего количества авиационных катастроф в мире за последние 10 лет, произошли в местности, покрытой лесом. Одним из перспективных способов повышения эффективности поиска в указанной местности может стать использование специализированных поисковых БАС на базе разнородных БВС и мобильных дронопортов с автономной системой питания. Создание таких БАС технически возможно исходя из уровня развития технологий на сегодняшний день. Однако существует ряд нерешенных задач, одной из которых является задача синтеза управления группой БВС при обследовании заданного района поиска с обходом препятствий на пути полета БВС.

Список литературы

1. Su S.Y.M., Fang J.C. Analysis of synthetic aperture radar imaging and signal processing [Электронный ресурс] // Advanced Materials Research. 2012. Vol. 433–440. Pp. 2004–2010. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.433-440.2004 (дата обращения: 14.09.2025).

¹⁵ Геоскан 701-комплекс для аэрофотосъемки максимальной производительности [Электронный ресурс] // GEOSCAN. URL: <https://www.geoscan.ru/ru/products/geoscan701?ysclid=mgq8g6ezm9804713513> (дата обращения: 14.08.2025).

¹⁶ Управление полетами [Электронный ресурс] // droneports. URL: <https://droneports.ru/#rec618974274> (дата обращения: 14.08.2025).

¹⁷ DJI DOCK для неисследованных дорог [Электронный ресурс] // DJI ENTERPRISE. URL: <https://enterprise.dji.com/ru/mobile/dock> (дата обращения: 14.08.2025).

2. Бердышев В.П., Гарин Е.Н., Фомин А.Н. и др. Радиолокационные системы: учебник / Под общ. ред. В.П. Бердышева. Красноярск: СФУ, 2011. 400 с.

3. Antoniou M., Saini R., Chernyakov M. Results of a space-surface bistatic SAR image formation algorithm // Transactions on Geoscience & Remote Sensing. 2007. Vol. 45, no. 11. Pp. 3359–3371.

4. Krieger G., Moreira A. Spaceborne Bi- and multistatic SAR: Potential and challenges // IEEE Proceedings – Radar Sonar and Navigation. 2006. Vol. 153, iss. 3. Pp. 184–198. DOI: 10.1049/ip-rsn:20045111

5. Астахов Н.В. Применение ММО-радаров для точного обнаружения целей и оценки их параметров / Н.В. Астахов, А.С. Бадаев, О.Ю. Макаров, А.С. Демикова, В.М. Питолин // Радиотехника. 2021. Т. 85, № 6. С. 23–26. DOI: 10.18127/j00338486-202106-04

6. García-Fernández M., Alvarez Y., Arbolea A. и др. Synthetic aperture radar imaging system for landmine detection using a ground penetrating radar on board a unmanned aerial vehicle [Электронный ресурс] // Access. 2018. Vol. 20, no. 50. DOI: 10.1109/access.2018.2863572 (дата обращения: 14.09.2025).

7. Буренок В.М. Формирование новых взглядов на применение беспилотных летательных аппаратов на основе анализа опыта специальной военной операции // Вооружение и экономика. 2024. № 1 (67). С. 5–8.

8. Трушин А.В. Методы и алгоритмы дистанционного обнаружения мест авиационных происшествий и идентификации объектов их последствий: автореф. дисс. ... канд. тех. наук. М., 2021. 24 с.

9. Киселев М.А. Анализ существующих подходов к перестроению маршрута полета воздушного судна в процессе его выполнения / М.А. Киселев, Ю.С. Калюжный, А.В. Карпов, С.Ф. Бородкин // Научный вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 3. С. 53–65. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-53-65

10. Киселев М.А. Методика перестроения маршрута полета воздушного судна в процессе его выполнения / М.А. Киселев, Ю.С. Калюжный, А.В. Карпов, С.Ф. Бородкин // Научный вестник МГТУ ГА. 2023.

Т. 26, № 6. С. 33–46. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-33-46

11. Киселев М.А. Исследования по перестроению маршрута в процессе полета воздушного судна / М.А. Киселев, Ю.С. Калюжный, А.В. Карпов, С.Ф. Бородкин // Научный вестник МГТУ ГА. 2024. Т. 27, № 3. С. 35–49. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-35-49

12. Арапов О.Л., Зуев Ю.С. Формирование опорной траектории, обеспечивающей преодоление опасной зоны // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2015. № 3 (102). С. 14–22.

13. Казаков К.А., Семенов В.А. Обзор современных методов планирования движения // Труды Института системного программирования РАН. 2016. Т. 28, № 4. С. 241–293. DOI: 10.15514/ISPRAS-2016-28(4)-14

14. Ананьев А.В. Способ совместного применения беспилотных летательных аппаратов малого класса и многофункциональных бомбардировщиков при поражении средств противовоздушной обороны на маршруте полета / А.В. Ананьев, А.Г. Рыбалко, С.П. Петренко, Е.В. Ильинов // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2021. № 19. С. 10–28. DOI: 10.24412/2500-4352-2021-19-10-28

15. Воробьев В.В., Мозоляко Е.В. Проблемы предотвращения столкновения гражданских воздушных судов в управляемом полете // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. Т. 183. С. 109–113.

16. Zhou X. EGO-Swarm: A fully autonomous and decentralized quadrotor swarm system in cluttered environments / X. Zhou, J. Zhu, H. Zhou, C. Xu, F. Gao [Электронный ресурс] // Robotics. DOI: 10.48550/arXiv.2011.04183 (дата обращения: 14.09.2025).

References

1. Su, S.Y.M., Fang, J.C. (2012). Analysis of synthetic aperture radar imaging and signal processing. *Advanced Materials Research*, vol. 433-440, pp. 2004–2010. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.433-440.2004 (accessed: 14.09.2025).

2. Berdyshev, V.P., Garin, E.N., Fomin, A.N. et al. (2011). Radar systems: Text-book, in Berdyshev V.P. (Ed.). Krasnoyarsk: SFU, 400 p. (in Russian)
3. Antoniou, M., Saini, R., Chernyakov, M. (2007). Results of a space-surface bistatic SAR image formation algorithm. *Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, vol. 45, no. 11, pp. 3359–3371.
4. Krieger, G., Moreira, A. (2006). Spaceborne Bi- and multistatic SAR: Potential and challenges. In: *IEEE Proceedings - Radar Sonar and Navigation*, vol. 153, issue 3, pp. 184–198. DOI: 10.1049/ip-rsn:20045111
5. Astakhov, N.V., Badaev, A.S., Bashkirov, A.V., Churakov, P.P., Demikhova, A.S. (2021). Application of MIMO radars for precise detection of objectives and evaluation of their parameters. *Radioengineering*, vol. 85, no. 6, pp. 23–26. DOI: 10.18127/j00338486-202106-04 (in Russian)
6. García-Fernández, M., Alvarez, Y., Arboleya, A. et al. (2018). Synthetic aperture radar imaging system for landmine detection using a ground penetrating radar on board a unmanned aerial vehicle. *Access*, vol. 20, no. 50. DOI: 10.1109/access.2018.2863572 (accessed: 14.09.2025).
7. Burenok, V.M. (2024). Formation of new views on the use of unmanned aerial vehicles based on the analysis of the experience of a special military operation. *Armament and Economics*, no. 1 (67), pp. 5–8. (in Russian)
8. Trushin, A.V. (2021). Methods and algorithms for remote detection of aviation accident sites and identification of objects of their consequences: Abstract of Cand. Tech. Sc. dissertation. Moscow, 24 p. (in Russian)
9. Kiselev, M.A., Kalyuzhny, Yu.S., Karpov, A.V., Petrov, Yu.V. (2023). Analysis of the existing approaches to in-flight aircraft rerouting. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 26, no. 3, pp. 53–65. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-53-65 (in Russian)
10. Kiselev, M.A., Kalyuzhny, Yu.S., Karpov, A.V., Petrov, Yu.V. (2023). Methodology for plotting the flight planned route change of the aircraft in flight. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 26, no. 6, pp. 33–46. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-33-46
11. Kiselev, M.A., Kalyuzhny, Yu.S., Karpov, A.V., Petrov, Yu.V. (2024). Studies on in-flight aircraft rerouting. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 27, no. 3, pp. 35–49. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-3-35-49 (in Russian)
12. Arapov, O.L., Zuyev, Yu.S. (2015). Reference trajectory design for overcoming dangerous zone. *Herald of the Bauman Moscow state technical university. Series instrument engineering*, no. 3 (102), pp. 14–22. (in Russian)
13. Kazakov, K.A., Semenov, V.A. (2016). An overview of modern methods for motion planning. *Proceedings of the institute for system programming of the RAS*, vol. 28, no. 4, pp. 241–293. DOI: 10.15514/ISPRAS-2016-28(4)-14 (in Russian)
14. Ananov, A.V., Rybalko, A.G., Petrenko, S.P., Ilinov, E.V. (2021). The small-class unmanned aerial vehicles and multifunctional bombers joint usage method when hitting air defense systems on the flight route. *Vozdushno-kosmicheskiye sily. Teoriya i praktika*, no. 19, pp. 10–28. DOI: 10.24412/2500-4352-2021-19-10-28 (in Russian)
15. Vorobyev, V.V., Mozolyaco, E.V. (2012). Problems preventing conflicts in civil aircraft controlled flight. *Nauchnyy vestnik MGTU GA*, no. 183, pp. 109–113. (in Russian)
16. Zhou, X., Zhu, J., Zhou, H., Xu, C., Gao, F. (2021). EGO-Swarm: A fully autonomous and decentralized quadrotor swarm system in cluttered environments. *Robotics*. DOI: 10.48550/arXiv.2011.04183 (accessed: 14.09.2025).

Сведения об авторах

Ван Синьюй, аспирант кафедры аэродинамики, конструкций и прочности летательных аппаратов МГТУ ГА, 1057967632@qq.com.

Киселев Михаил Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой аэродинамики, конструкций и прочности летательных аппаратов МГТУ ГА, m.kiselev@mstuca.ru.

Воробьев Вадим Вадимович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой безопасности полетов и жизнедеятельности МГТУ ГА, v.vorobjev@mstuca.ru.

Бородин Сергей Филиппович, кандидат технических наук, доцент кафедры аэродинамики, конструкций и прочности летательных аппаратов МГТУ ГА, s.borodkin@mstuca.ru.

Information about the authors

Wang Xinyu, Postgraduate Student of the Aerodynamics, Design and Strength of Aircraft Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, 1057967632@qq.com.

Mikhail A. Kiselev, Doctor of Technical Sciences, Professor, the Head of the Aerodynamics, Design and Strength of Aircraft Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, m.kiselev@mstuca.ru.

Vadim V. Vorobyev, Doctor of Technical Sciences, Professor, the Head of the Flight and Life Safety Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, v.vorobjev@mstuca.ru.

Sergey F. Borodkin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aerodynamics, Design and Strength of Aircraft Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, s.borodkin@mstuca.ru.

Поступила в редакцию	29.10.2025	Received	29.10.2025
Одобрена после рецензирования	02.12.2025	Approved after reviewing	02.12.2025
Принята в печать	23.07.2026	Accepted for publication	23.07.2026

УДК:656.025.6
DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-85-101

Регулирование региональных авиатранспортных систем как основа кластерного подхода

А.С. Степаненко¹, А.В. Сафонова¹

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

Аннотация: В статье проведен анализ структуры и эффективности государственного регулирования на воздушном транспорте в области развития региональных авиатранспортных систем Российской Федерации. Предложено определение системы с точки зрения процессного подхода, позволяющее рассматривать региональную авиатранспортную систему как взаимосвязанные процессы авиатранспортных предприятий, обеспечивающие реализацию комплекса стратегических и тактических задач региона в сферах логистики и экономики. Так как стратегическое развитие региона требует государственного участия, с учетом международного опыта представлен обзор инструментов и методов государственного регулирования авиатранспортных систем. В России необходима выработка государственной политики по поддержанию и развитию транспортной отрасли, способствующей в том числе стимулированию подвижности населения регионов. Выявлены основные полномочия, инструменты субъектов государственного регулирования авиационной деятельности. Изучено распространение законодательной базы на сегменты авиатранспортной системы. Проведено комплексное исследование проблемных вопросов регулирования авиационной деятельности в рамках региональных авиатранспортных систем. Разработана схема механизма государственного регулирования комплексной функциональной территории авиатранспортной системы. Показаны возможные направления развития инструментов регулирования с учетом динамики внешней среды. На основании факта отсутствия комплексной законодательной базы и общих подходов к формированию авиатранспортных кластеров предлагается концепция формирования эффективного взаимодействия региональных отраслевых предприятий, в качестве основы которой лежит законодательно установленное взаимодействие аэропортов, авиакомпаний и авиаремонтных предприятий в рамках обслуживания технологических процессов авиаперевозок. Представлена формула расчета эффективности применения механизма формирования комплексных функциональных зон через авиационную подвижность для оценки предложенной кластерной системы размещения предприятий.

Ключевые слова: региональная авиатранспортная система, аэропорт, авиапредприятие, перевозчики, нормативный правовой акт, комплексное развитие территорий.

Для цитирования: Степаненко А.С., Сафонова А.В. Регулирование региональных авиатранспортных систем как основа кластерного подхода // Научный вестник МГТУ ГА. 2026. Т. 29, № 4. С. 85–101. DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-85-101

Regulation of regional air transport systems as the basis of the cluster approach

A.S. Stepanenko¹, A.V. Saphonova¹

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

Abstract: The article analyzes the structure and effectiveness of state regulation in air transport concerning the development of regional air transport systems in the Russian Federation. The definition of the system is proposed from the standpoint of the process approach, which allows considering the regional air transport system as interconnected processes of air transport enterprises that ensure the implementation of a set of strategic and tactical tasks of the region in logistics and economics. Since the strategic

development of a region requires state involvement, and drawing on international experience, the article provides an overview of the tools and methods of state regulation of air transport systems. In Russia, it is essential to develop the state policy for maintaining and advancing the transport industry, which would also stimulate the mobility of the regional population. The study identifies the primary powers and instruments of state regulatory entities in aviation activities and examines the extension of the legislative framework to the segments of the air transport system. A comprehensive analysis of problematic issues in regulating aviation activities within regional air transport systems is conducted. A scheme of the mechanism for state regulation of the integrated functional territory of the air transport system is developed. Possible directions for the development of regulatory instruments, considering the dynamics of the external environment, are outlined. Given the lack of a comprehensive legislative framework and unified approaches to the formation of air transport clusters, the paper proposes a concept for establishing effective interaction between regional industry enterprises, based on legally established cooperation between airports, airlines, and aircraft repair enterprises in servicing air transportation technological processes. Finally, a formula for calculating the effectiveness of applying the mechanism for forming integrated functional zones through aviation mobility is presented to evaluate the proposed cluster system for enterprise placement.

Keywords: regional air transport system, airport, airline, carriers, regulatory legal act, integrated development of territories.

For citation: Stepanenko, A.S., Saphonova, A.V. (2026). Regulation of regional air transport systems as the basis of the cluster approach. Civil Aviation High Technologies, vol. 29, no. 4, pp. 85–101. DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-85-101

Введение

Макроэкономическая ситуация в стране оказывает влияние на качество жизни каждого ее жителя. Для быстрого и безопасного движения грузов и населения необходимо иметь соответствующую инфраструктуру, средства передвижения (как индивидуальные, так и общественные), а также определенную маршрутную сеть и перевозчиков, готовых организовать и осуществить эти процессы, характеризующие подвижность. С учетом этого одним из ключевых направлений государственной политики является развитие транспортной системы, что обуславливает актуальность исследования.

Необходимость связанности регионов, межрегиональных и международных связей обуславливает стратегическое значение транспорта, а в частности и гражданской авиации. В климатических и географических условиях России нередко в отдаленных регионах Арктики и Дальнего Востока авиация является безальтернативным видом транспорта, способным обеспечить транспортную доступность небольших населенных пунктов [1]. Новизна представленного исследования заключается в формировании универсальной схемы механизма государственного регулирования региональной авиатранспортной системы путем применения нормативной

документации, контролирующей ключевые технологические процессы.

Транспортный комплекс имеет свою специфику деятельности. Для регулирования данной сферы деятельности необходимо иметь опору в виде нормативной правовой базы, которая будет отвечать таким важным параметрам отрасли, как обеспечение безопасного передвижения грузов и пассажиров и возможность развития отрасли.

Методы и исследование

В рамках исследования использованы аналитические подходы, системный анализ, математическое моделирование эффективности применения механизма формирования комплексных функциональных зон через авиационную подвижность. Рассматривая научные подходы к проблеме создания и регулирования авиатранспортных систем, можно отметить общность в вопросе необходимости государственного участия. В.С. Шапкин отмечает, что под авиатранспортной системой понимается совокупность совместно действующих воздушных судов, комплекса наземных средств по подготовке и обеспечению полетов, личного состава, занятого эксплуатацией и ремонтом воздушных судов (ВС) и наземных средств, а также системы управления процессом эксплуатации [2]. Также показаны различные подходы

к авиатранспортной системе как к инструменту формирования требований к перспективной авиационной технике и инновационных программных решений [3]. А.О. Власенко рассматривает авиатранспортную систему с точки зрения математической модели, основанной на определении времени, стоимости и расстояния, определяя качество системы измеримыми параметрами [4]. Авиатранспортная система в широком смысле может рассматриваться с точки зрения процессов взаимодействия авиатранспортных предприятий, объединенных комплексов задач по развитию региона в области транспортной доступности и экономики [5]. В.А. Романенко и А.С. Ефимов подходят к решению задачи по синтезу обслуживающих систем авиатранспортной отрасли с учетом перспективного синергетического подхода к деятельности региональных авиатранспортных предприятий [6, 7], реализующегося в качестве концессионных соглашений. Следует определить необходимость единства процессов и системы их управления в рамках региональной авиатранспортной системы.

В рамках исследования следует рассмотреть международный опыт государственного регулирования воздушного транспорта [8]. Так, в США единоличным регулятором авиации выступает Федеральное авиационное управление (ФАУ)¹, осуществляющее свою деятельность путем издания нормативных циркуляров, направленных на установление норм и требований к отдельным конкретным параметрам проведения процедур. Данная организация распространяет свои полномочия на такие области, как контроль организации воздушного пространства, обеспечение требований безопасности в аэровокзальном комплексе, а также утверждает нормативы финансирования частных проектов развития аэропортовой инфраструктуры.

В Европе применяется аналогичная структура государственного регулирования. Необходимо отметить, что отдельные страны не

имеют собственных (национальных) органов власти, создан единый орган регулирования (европейский) на все страны, входящие в Европейский союз.

По результатам Чикагской конвенции в 1944 году была учреждена Международная организация гражданской авиации (ИКАО), создание которой продиктовала необходимость организации международных воздушных перевозок по единым стандартам и правилам. В 1970 году СССР, преемником которого является Российская Федерация, официально вступил в ИКАО, ратифицировав документы конвенции.

При этом необходимо отметить, что резолюции ИКАО, по сути своей схожие с нормативными циркулярами, носят рекомендательный характер и необязательны к соблюдению при выполнении внутренних авиаперевозок. Соблюдение всех норм ИКАО в России для местных и региональных аэропортов и посадочных площадок часто не представляется возможным ввиду отсутствия технических возможностей или недостаточности финансирования.

Приоритет национального права над международным, установленный поправками к Конституции Российской Федерации, внесенными в 2020 году, обязывает к обеспечению надлежащего уровня регулирования транспортной отрасли в стране за счет собственных сил государства.

В соответствии с пунктом 1 статьи 27 Конституции Российской Федерации каждый, кто законно находится на территории Российской Федерации, имеет свободу передвижения по ее территории.

Транспортная деятельность, как и любой вид предпринимательской деятельности, основывается на коммерческих целях, в частности получении прибыли. При этом климатические особенности страны, обширность территории Российской Федерации и неоднородность расселения на ней создают «узкие места», в которых себестоимость организации и осуществления перевозок воздушным транспортом превышает финансовые возможности населения. Так возникают риски

¹Federal Aviation Administration. Mission [Электронный ресурс] // Официальный сайт Федерального авиационного управления США. URL: <https://www.faa.gov/about/mission> (дата обращения: 19.08.2025).

снижения транспортной подвижности грузов и населения. Вследствие этого экономика региона может испытывать замедление темпов роста или вовсе стагнацию [1, 9].

Государственные структуры, регулирующие отрасль, ставят перед собой задачу по созданию концепции приоритетов, на фундаменте которых формируется стратегия развития транспорта, которые обладают полномочиями по нормативно-правовому регулированию (формированию правил деятельности и порядка ее осуществления), выполняют функции разработки нормативной базы и надзора (контроля) за ее соблюдением.

Таким образом, исходя из установленной правовой системы в России, основными задачами государственного регулирования в области транспорта, особенно авиационного, представляются:

- 1) предоставление специальных прав участникам отношений (пассажиры, владельцы грузов, перевозчики) в целях стимулирования авиационной подвижности населения;
- 2) введение ограничений в целях регулирования отношений в области транспорта;
- 3) установление правил и надзор за их соблюдением.

Выработкой государственной политики в России в области транспорта уполномочено заниматься Министерство транспорта Российской Федерации².

Структура Минтранса России включает в себя не только профильные департаменты, но и подведомственные федеральные агентства и службы, а также подведомственные учреждения, выступающие от лица Российской Федерации в целях оперативного управления и хозяйственного ведения объектов транспортной инфраструктуры и других основных фондов отраслевых предприятий.

Государственная политика в области транспорта в России включает следующие направления: нормативно-правовое регулирование; государственную поддержку в области видов транспорта; развитие транспортной инфраструктуры; обеспечение безопасности населения в области транспорта; содержание и обеспечение потребностей государственного имущества в области транспорта.

При этом функции обеспечения уровня безопасности разделяются Министерством транспорта России с Транспортной прокуратурой Российской Федерации, Генеральной прокуратурой Российской Федерации, а также с другими отраслевыми подразделениями ведомств и служб так называемого силового блока (ФСБ России, МВД России, ФСО России, МЧС России, а также МИД России).

Структура взаимосвязи полномочий органов государственного регулирования транспортной деятельности приведена на рис. 1.

На рис. 1 показаны подразделения и структурные элементы государственной системы, отвечающие за развитие региональных авиатранспортных систем: Департамент государственной политики в области гражданской авиации Минтранса России, Росавиация, Ространснадзор, а также отраслевые подразделения ведомств и служб силового блока. Кроме того, необходимо отметить, что деятельность производственных и авиаремонтных мощностей авиатранспортных систем входит в сферу ведения и контроля Министерства промышленности и торговли Российской Федерации. На рисунке отражена степень вовлечения в процессы государственного регулирования органов в зависимости от полномочий и функций. Темный фон обозначает высокую степень, то есть непосредственное участие в самом процессе и ответственность за процесс и его результаты, светлый фон – низкую степень, то есть предоставление информации и ознакомление для учета в дальнейшей работе, а средний – степень, при которой принимается участие на уровне согласования, предоставления информации и содействия ответственному соисполнителю.

²Постановление Правительства РФ № 395 от 30 июля 2004 г. «Об утверждении Положения о Министерстве транспорта Российской Федерации» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. 2004. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_48722/8cdd27853edab2751599557bb61efc419fe10225/ (дата обращения: 19.08.2025).

	Нормативно-правовое регулирование	Поддержка и стимулирование	Надзор	Развитие инфраструктуры
Минтранс России	Отраслевой и правовой департаменты Разработка, инициирование, организация согласования	Отраслевой и финансовый департаменты Контроль и координация программ	Отраслевой департамент, специальный отдел Взаимодействие, участие в проверках	Региональный/инфраструктурный и финансовый департаменты Разработка, контроль и координация программ
Росавиация / Росжелдор/ Росавтодор/ Росморречфлот	Участие в разработке, проведение НИР	Участие в разработке, проведение НИР, оперативное управление	Взаимодействие с силовыми органами, участие в проверках	Ведение реестров, контроль состояния зданий и сооружений, оперативное управление имуществом
ФСБ/МВД/ МЧС/ ФСО и др.	Участие в разработке, согласование	Контроль проводимых мероприятий	Контроль организации деятельности, проведение контрольных мероприятий	Контроль проводимых мероприятий

Рис. 1. Схема взаимодействия органов государственного регулирования

Fig. 1. The scheme of interaction of state regulatory authorities

Несмотря на формально рыночный характер авиатранспортной отрасли, регулирование ее деятельности государственными органами остается сильно формализованным и требующим соблюдения большого количества правил и инструкций. Можно утверждать, что государство выступает в некой степени регулятором рынка.

Нагляднее всего регуляторную политику можно увидеть в стимулировании авиаперевозок, имеющих острый социальный характер. Например, постоянная поддержка незащищенных категорий населения (маломобильные лица, пенсионеры, многодетные семьи, семьи участников боевых действий) в районах Дальнего Востока и Крайнего Севера. Механизмы субсидирования имеют временные особенности применения, а также сложный характер утверждения.

В целях регулирования авиационной отрасли в России принят Воздушный кодекс Российской Федерации (ВзК РФ)³, имею-

щий статус федерального закона, а также закон «О государственном регулировании развития авиации»⁴. Кроме того, отношения, возникающие при осуществлении деятельности в области воздушного транспорта, регулируются Гражданским кодексом Российской Федерации, Кодексом Российской Федерации об административных правонарушениях и Уголовным кодексом Российской Федерации.

Для реализации норм законов Правительство Российской Федерации и Министерство транспорта Российской Федерации утверждают подзаконные акты. Наиболее распространенной формой утвердительных документов для норм, требований к участникам специальных процедур отрасли и правил являются постановления и приказы, которыми вводятся в действие федеральные авиационные правила (ФАП).

На данном этапе классификация полномочий должна в первую очередь произво-

³ Федеральный закон № 60-ФЗ от 19 марта 1997 г. «Воздушный кодекс Российской Федерации» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. 1997. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_13744/ (дата обращения: 19.08.2025).

⁴ Федеральный закон № 10-ФЗ от 8 января 1998 г. «О государственном регулировании развития авиации» [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. 1998. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_17410/ (дата обращения: 19.08.2025).

диться на основании критерия объектов, в отношении которых направлены меры воздействия в связи с наличием полномочий. Условно объекты воздействия делятся следующим образом:

- перевозчики (участники рынка авиаперевозок, лица, ответственные за перевозку);
- аэропорты и аэродромы (инфраструктура, позволяющая принимать и отправлять воздушные суда);
- пассажиры, собственники грузов (пользователи авиаперевозок, потребители рынка авиаперевозок).

Что касается аэропортов, здесь необходимо отметить ключевую роль Министерства транспорта и Росавиации. Согласно статье 7 ВЗК РФ объекты воздушного транспорта могут находиться в собственности Российской Федерации или субъектов Российской Федерации. По общепринятой в России практике в целях обеспечения безопасности аэропорты федерального значения, как правило, принадлежат непосредственно Российской Федерации, то есть расходы на их содержание, их структуру, проекты развития зависят от собственника. Росавиация от лица Минтранса России выполняет функции Российской Федерации как балансодержателя и собственника. Для управления учреждены казенные предприятия и государственные унитарные предприятия, осуществляющие свою деятельность на основании устава и программ деятельности, согласованных с Росавиацией. Отсюда операторы аэродромов, осуществляющие в аэропортах авиационную и неавиационную деятельность, управляют имущественным комплексом аэродрома на правах арендаторов.

Классификация инструментов государственного регулирования может проводиться исходя из критерия потребности в финансировании, в долгосрочности применения или широты сферы применения. Исходя из фактора потребности в выделении финансирования, меры можно подразделить на меры государственной поддержки, требующие выделения бюджетных средств, и меры, не

требующие дополнительного финансирования. По долгосрочности: государственное воздействие может быть разовым (однократная санкция, исполнение поручения или единовременное выделение средств), с определенным сроком действия (меры, принимаемые в связи с особыми обстоятельствами, например действующие во время пандемии коронавирусной инфекции, или меры, принимаемые в связи с противодействием внешнеэкономическому давлению со стороны недружественных стран), а также действующие безвременно с момента их вступления в юридическую силу (например, изменения и (или) дополнения действующей нормативной правовой базы).

Меры государственного регулирования выражаются юридической формой: правовыми актами (указы Президента Российской Федерации, федерально-конституционные законы, федеральные законы, постановления и распоряжения Правительства Российской Федерации, приказы министерств, приказы подведомственных агентств и специальных служб); отдельными государственными программами (комплексные меры); указаниями и резолюциями полномочных представителей исполнительных органов государственной власти.

Таким образом, федеральные авиационные правила, утверждаемые приказами ведомств или постановлениями Правительства Российской Федерации, как основа для руководства при осуществлении деятельности имеют бессрочный характер и не требуют дополнительного финансирования со стороны государственных источников местных, региональных и федерального бюджетов. Основная задача ФАП – установить порядок процедур, требования к участникам и объектам деятельности воздушного транспорта [10].

Государственные программы поддержки имеют временные ограничения действия. Их отличительным признаком является обязательное наличие специальных (государственных) источников финансирования, ограниченный период времени, а также планируемые результаты реализации.

Так, согласно Указу Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 года № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года» в период с 2018 по 2024 год был реализован федеральный проект «Развитие региональных аэропортов», в рамках которого были произведены модернизация, реконструкция и строительство тридцати трех аэропортовых объектов (взлетно-посадочные полосы, перроны, рулежные дорожки)⁵. В рамках федерального проекта «Развитие региональных аэропортов», входящего в комплексный план модернизации и расширения магистральной инфраструктуры, после реконструкции и (или) строительства, в эксплуатацию введено тридцать три объекта в тридцать одном аэропорту, в том числе девятнадцать взлетно-посадочных полос и четырнадцать вспомогательных объектов аэропортовой инфраструктуры (перроны, рулежные дорожки, служебно-пассажирские здания и др.).

К разовым мерам относятся решения о выделении субсидии, заключение соглашений, где одна из сторон – государственная структура. Наиболее яркими примерами могут являться выделение субсидии правительству Республики Татарстан для строительства мест стоянки воздушных судов в целях проведения саммита БРИКС в г. Казани в 2024 году; соглашение Министерства транспорта Российской Федерации с правительством Иркутской области в целях ликвидации последствий наводнения в 2008 году на территории действующего аэропорта г. Иркутска.

Существуют бессрочные программы субсидирования для стимулирования и развития маршрутной сети авиаперевозок, направленные на поддержку авиационной подвижности через поддержку перевозчиков [11]. Например, до 2024 года реализовывалась програм-

ма перевозок по правилам, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 2 марта 2018 года, основной целью которой являлось софинансирование перевозок по местным маршрутам, имеющих социальное значение, и необходимость обеспечения транспортной доступности удаленных регионов страны⁶.

Таким образом, существующая система государственного регулирования по факту выстраивается на основе такого источника права, как правовые нормы.

При этом система реагирует на изменение стратегических задач государства. Инструментами реагирования являются: формирование ситуационных комиссий, выпуск ситуационной нормативной документации, осуществление мер оперативного реагирования. Необходимо отметить, что само понятие «авиатранспортная система» в отечественном законодательстве отсутствует. Как требования, так и деятельность элементов авиатранспортной системы регулируются отдельно. Существуют отдельные федеральные авиационные правила, регламентирующие требования к аэродромам⁷, отдельные нормы предусмотрены для перевозчиков⁸. Касательно авиаремонтных мощностей

⁶ Постановление Правительства РФ № 215 от 2 марта 2018 г. «Об утверждении Правил предоставления субсидий из федерального бюджета организациям воздушного транспорта в целях обеспечения доступности воздушных перевозок населению и о признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации» [Электронный ресурс] // Гарант. 2018. URL: <https://base.garant.ru/71892084/> (дата обращения: 19.08.2025).

⁷ Приказ Министерства транспорта РФ № 262 от 25 августа 2015 г. «Об утверждении Федеральных авиационных правил «Требования, предъявляемые к аэродромам, предназначенным для взлета, посадки, руления и стоянки гражданских воздушных судов» [Электронный ресурс] // Гарант. 2015. URL: <https://base.garant.ru/71220192/> (дата обращения: 19.08.2025).

⁸ Приказ Министерства транспорта РФ № 10 от 12 января 2022 г. «Об утверждении Федеральных авиационных правил «Требования к юридическим лицам, индивидуальным предпринимателям, осуществляющим коммерческие воздушные перевозки. Форма и порядок выдачи документа, подтверждающего соответствие юридического лица, индивидуального

⁵ Развитие региональных аэропортов [Электронный ресурс] // Национальные проекты России. URL: https://xn--80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xn--p1ai/projects/modernizatsiya-transportnoy-infrastruktury/regionalnye_aeroporty/ (дата обращения: 19.08.2025).

отдельных нормативных требований не издано. Основой для регулирования авиаремонтных мощностей выступают нормы, применяемые к строительству зданий промышленности, включая требования к пожарной безопасности, энергетической эффективности. Авиаремонтные предприятия стремятся к соответствию требованиям, предъявляемым при эксплуатации зданий, сооружений, а также возможности выполнения ремонтных работ в отношении воздушных судов. Нормы размещения таких инфраструктурных объектов продиктованы условиями использования приаэродромных территорий⁹. Схема областей распространения государственного регулирования представлена в табл. 1.

Многие нормы и правила нередко являются трудновыполнимыми для малых субъектов транспортной деятельности.

Так, требования, предъявляемые к аэродромам гражданской авиации, одинаково распространяются как на крупные аэропорты, имеющие статус международных, так и на аэродромы местного значения, имеющие малую интенсивность по выполнению взлетно-посадочных операций [12]. Такие условия становятся причиной перевода десятков малых аэродромов в статус посадочных площадок и введения дополнительных ограничений по временным режимам работы, что в свою очередь негативно сказывается на авиацион-

ной подвижности населения и транспортной доступности в регионах. То есть в некоторой степени избыточность требований в итоге приводит к существенным ограничениям развития инфраструктуры воздушного транспорта.

Также геополитические события влияют на деятельность авиакомпаний. Так, широко распространенная практика зарубежной регистрации воздушного флота подвергла риску ареста большую долю парка авиакомпаний. Реализуемые «постфактум» регистрационные действия и огромные финансовые последствия выкупа воздушных судов нанесли значительный урон деятельности перевозчиков. Меры защиты парка воздушных судов отечественных авиакомпаний должны быть разработаны государственными органами в целях обеспечения безопасности деятельности.

В отношении авиаремонтных предприятий необходимо отметить, что отдельного нормативного регулирования здесь практически не существует. Порядок их деятельности и основные требования к ним не установлены, что не позволяет сформировать единую стандартизированную систему обслуживания воздушных судов на федеральном уровне.

Таким образом, согласно перечню объектов инфраструктуры воздушного транспорта, обозначенных в статье 7.1 Воздушного кодекса Российской Федерации, авиатранспортная система в национальном законодательстве может быть определена как комплекс объектов инфраструктуры воздушного транспорта, размещенных в рамках границ определенной территории, обеспечивающий потребности в мобильности населения и перевозке грузов. Исходя из данного определения авиатранспортной системы необходимо сформировать понятие авиатранспортного кластера как интегрированного комплекса предприятий и объектов авиатранспортной системы, обладающих единым пространством деятельности.

предпринимателя требованиям федеральных авиационных правил» [Электронный ресурс] // Гарант. 2022. URL: <https://base.garant.ru/403703518/> (дата обращения: 19.08.2025).

⁹ Постановление Правительства РФ № 1460 от 2 декабря 2017 г. «Об утверждении Положения о приаэродромной территории и Правил разрешения разногласий, возникающих между высшими исполнительными органами государственной власти субъектов Российской Федерации, уполномоченными Правительством Российской Федерации федеральными органами исполнительной власти и Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека при согласовании проекта акта об установлении приаэродромной территории и при определении границ седьмой подзоны приаэродромной территории» [Электронный ресурс] // Гарант. 2017. URL: <https://base.garant.ru/71825622/> (дата обращения: 19.08.2025).

Таблица 1
Table 1

Распространение нормативной базы на сегменты авиатранспортной системы
Extension of the regulatory framework to segments of the air transport system

Авиатранспортная система		
Аэропорт	Авиакомпания	Авиаремонтное предприятие
Основные нормативные акты		
Воздушный кодекс Российской Федерации (часть 1 статьи 5 «Воздушное законодательство Российской Федерации регулирует отношения в области использования воздушного пространства, отношения, возникающие в связи с деятельностью в области авиации на территории Российской Федерации...»)		—
Федеральный закон «О государственном регулировании развития авиации» (согласно абзацу третьему статьи 1: «авиационная деятельность – организационная, производственная, научная и иная деятельность... лиц, направленная на поддержку и развитие авиации, удовлетворение нужд экономики и населения в воздушных перевозках, авиационных работах и услугах, в том числе на создание и использование аэродромной сети и аэропортов, и решение других задач»)		
Постановления Правительства Российской Федерации (постановление Правительства Российской Федерации от 30 июля 2004 года № 395 «Об утверждении Положения о Министерстве транспорта Российской Федерации», так Правительство Российской Федерации уполномочило ведомство регулировать выработку государственной политики Минтранса России)		—
ФАП Самые распространенные к применению: 1) приказ Минтранса России от 28 июня 2007 года № 82 «Общие правила воздушных перевозок пассажиров, багажа, грузов и требования к обслуживанию пассажиров, грузоотправителей, грузополучателей» – регулирование деятельности авиакомпаний (перевозок); 2) приказ Минтранса России от 25 августа 2015 года № 262 «Об утверждении Федеральных авиационных правил “Требования, предъявляемые к аэродромам, предназначенным для взлета, посадки, руления и стоянки гражданских воздушных судов”» – регулирование требований к аэропортам		Эксплуатационная и техническая документация
Резолюции ИКАО (весь перечень документов направлен на установление регламента процедур, требований к использованию транспортных средств и объектов инфраструктуры воздушного транспорта)		
Дополнительные нормативные акты		
Градостроительный кодекс Российской Федерации (например, подпункт 2 статьи 48.1 определяет объекты инфраструктуры воздушного транспорта, предназначенные для взлета, посадки и обслуживания воздушных судов как особо опасные, технически сложные и уникальные объекты)	Гражданский кодекс Российской Федерации (глава 27 «Понятие и условия договора» регулирует взаимоотношения между авиакомпанией и пассажиром)	Градостроительный кодекс Российской Федерации (например, пункт 11 статьи 48.1 определяет опасные производственные объекты I и II классов опасности, на которых получают, используются, перерабатываются, образуются, хранятся, транспортируются, уничтожаются опасные вещества)
Земельный кодекс Российской Федерации (часть 5 статьи 90 «В		Земельный кодекс Российской Федерации (в соответствии с ча-

Авиатранспортная система		
Аэропорт	Авиакомпания	Авиаремонтное предприятие
целях обеспечения деятельности организаций и эксплуатации объектов воздушного транспорта могут предоставляться земельные участки для размещения аэропортов, аэродромов, аэровокзалов, взлетно-посадочных полос, других наземных объектов, необходимых для эксплуатации, содержания, строительства, реконструкции, ремонта наземных и подземных зданий, сооружений, устройств и других объектов воздушного транспорта»)		стью 8 статьи 105 приаэродромные территории являются зонами с особыми условиями территорий и имеют ограничения на размещение в их границах объектов)
Гражданский кодекс Российской Федерации (глава 27 «Понятие и условия договора» регулирует взаимоотношения между предприятиями)		Гражданский кодекс Российской Федерации (глава 27 «Понятие и условия договора» регулирует взаимоотношения между предприятиями)
Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях (противоправные действия, нарушающие установленные порядки, на территории Российской Федерации, включая аэропорты, воздушные суда, а также авиапроизводственные предприятия, квалифицируются как нарушения общественного правопорядка и подлежат вменению за них ответственности в порядке, установленном кодексом)		
Уголовный кодекс Российской Федерации (особо тяжкие противоправные действия, повлекшие за собой причинение материального вреда, тяжкого вреда жизни и здоровью участникам воздушного транспорта, а также летальный исход, и (или) акт незаконного вмешательства в профессиональную деятельность, совершенные на территории Российской Федерации, включая аэропорты, воздушные суда, а также авиапроизводственные предприятия, квалифицируются как уголовные преступления и подлежат вменению за них ответственности в порядке, установленном кодексом)		

Источник: составлено авторами.

С 2022 года прослеживается тенденция формирования и активного развития новой ниши, отдельной отрасли на воздушном транспорте – беспилотных авиационных технологий. Первый раз экспериментально-правовой режим был введен только в конце 2023 года в Томской области. Соответствующее нормативно-правовое регулирование вводится практически одновременно с реализацией производственных инициатив данной отрасли. Таким образом, вторым проблемным вопросом остается отсутствие проактивного подхода к разработке нормативно-правовой базы.

Проактивный подход имеет целью выявление и устранение слабых мест в решениях, соответствующих разным этапам жиз-

ненного цикла авиационно-промышленного комплекса. Примером реализации проактивного подхода на стадии формирования спецификации системных требований может служить проверка наличия у системы функциональных и нефункциональных требований свойств [13].

Проактивный подход к разработке представляет собой процесс подготовки первичных регуляторных норм и механизмов на этапе внедрения совершенствований в отрасль или внесения в ее деятельность новизны, в рамках которых формируются новые типы связей участников или процессов, связанных с объектами правового регулирования.

Так, проактивный подход к разработке нормативно-правовой базы включает:

- 1) подготовку базовых регулирующих норм, которые закрепляют концептуальные подходы к осуществлению деятельности;
- 2) установление терминологии, базовых процессов;
- 3) определение ролей участников процессов;
- 4) установление целей, основных прав и обязанностей участников.

Применение проактивного подхода может предусматриваться в программных документах органов государственной власти. Например, в рамках государственных программ могут вводиться дополнительные результаты и показатели.

Эта мера позволит повысить уровень достижения показателей государственных программ и повысить эффективность внедрения инноваций или других структурных изменений в отрасли.

Более того, проактивный подход даст возможность экспертному сообществу своевременно вносить изменения в разрабатываемую нормативную базу, что в свою очередь снизит риски принятия несоответствующих реальным условиям деятельности актов и риски необходимости реализации многоступенчатого процесса по внесению изменений в принятую базу. В итоге общая эффективность правового регулирования может быть повышена.

Также проактивный подход к государственному регулированию в целом позволяет оперативно управлять рисками и увеличивает координацию деятельности в случае возникновения экстраординарных условий. Наиболее яркими примерами применения такого подхода на государственном уровне были комплексы действий в 2019 году (объявление пандемии коронавирусной инфекции и меры, принимаемые Правительством Российской Федерации по организации санкций на въезд/выезд из страны) и в 2022 году (организация работы комиссии по противодействию внешнесанкционному давлению со стороны недружественных стран).

Таким образом, проактивный подход можно определить как перспективный принцип управления региональными авиатранспортными системами за счет его акцента на прогнозировании стратегических направлений и ключевой роли анализа факторов тенденции развития отрасли.

Результаты исследования

Относительно развития региональных авиатранспортных систем законодательство может быть распространено в рамках механизма «комплексного развития территорий» (КРТ)¹⁰.

Комплексное развитие территорий в настоящее время активно распространяется на жилищные объекты и объекты социальной инфраструктуры. Механизм реализуется путем передачи полномочий принятия решения государством (региональным или федеральным уполномоченным органом) ответственному лицу. Основание передачи – решение органа власти и заключенное соглашение с определенными общими условиями передачи (объекты, границы территории, права и обязанности сторон, сроки реализации проекта КРТ, финансовые показатели и результаты реализации проекта КРТ). Первым этапом реализации проекта КРТ служит разработка проектной документации под территорию или разработка и утверждение мастер-плана. В этом документе рассчитываются количественные показатели населения, расположение вновь строящихся объектов жилищного фонда, необходимая для жизни социальная инфраструктура, объекты улично-дорожной сети и придомовые территории. На первых этапах мастер-план рассчитывается совместно с финансовой моделью, которая представляет несколько сценариев движения финансовых ресурсов, отображающих источники финансирования, прогнозы динамики и

¹⁰ Комплексное развитие территории [Электронный ресурс] // Минстрой России. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/trades/kompleksnoe-razvitiie-territoriy/> (дата обращения: 19.08.2025).

структуры доходов и расходов в рамках проекта КРТ. Модель финансов подлежит особому вниманию при рассмотрении проекта плана. После одобрения мастер-плана наступает следующий этап реализации проекта, на котором проводятся процедуры по оформлению земельных участков (установление вида разрешенного использования, кадастрирование, межевание, регистрация прав собственности и др.). После выполнения расчетов финансовой модели начинается процесс реализации проекта.

В последнее время эффективной себя показала концепция единого застройщика. Концепция применена в Камчатском крае, где одним застройщиком выполнены такие работы, как реконструкция и строительство краевой больницы, ряда жилых объектов, а также строительство нового аэровокзального комплекса в аэропорту Петропавловск-Камчатский (Елизово).

Необходимо отметить, что для эффективного применения механизма КРТ для региональных авиатранспортных систем необходимо установление особого правового режима.

В настоящее время особым правовым режимом наделена лишь приаэродромная территория (ПАТ). В случае комплексного развития региональной авиатранспортной системы также необходимо принятие отдельного нормативного правового акта, позволяющего категоризовать объекты инфраструктуры, зонировать территории по функциональному признаку, а также рассматривать вопросы о предоставлении специальных прав участникам по подобию законодательства относительно особых экономических зон и зон с особыми условиями использования территорий. Такими зонами внутри комплексной функциональной территории могут стать как приаэродромная территория, так и зона неавиационной деятельности, а также зона авиационной деятельности.

Как известно из Положения о приаэродромной территории⁹, у приаэродромной территории существует шесть подзон с ограничениями на распространение (объекты УВД, высотные ограничения на здания, огра-

ничения по размещению радиотехнических объектов, ограничения по размещению производств с использованием взрывчатых и воспламеняющихся веществ, орнитологические ограничения [14] и связанные со скоплением твердых коммунальных отходов) и седьмая отдельная подзона с ограничениями по санитарной защите населения.

Установление отдельных комплексных функциональных зон (КФТ) потребует принятия отдельного нормативного правового акта, регулирующего деятельность предприятий, которые будут находиться в их границах, в том числе включение в них ПАТ.

В состав КФТ, помимо ПАТ, могут войти зоны распространения неавиационной деятельности и авиационной деятельности.

Для реализации данной идеи потребуется издание подзаконных актов в рамках ВЗК РФ, Градостроительного и Земельного кодексов Российской Федерации.

Пример схемы распространения такого механизма приведен на рис. 2.

На рис. 2 окружностями выделены соответственно:

1) функциональная комплексная территория, на которой устанавливаются особые порядки, единые правила деятельности и взаимодействия;

2) приаэродромная территория, имеющая особые ограничения и требования на основе земель с особыми условиями использования территорий;

3) зона авиационной деятельности, в которой регламенты, стандарты и требования к участникам могут создавать специфические условия, с помощью которых возможно устранение организационных и технологических рисков

4) зона неавиационной деятельности, имеющая особые условия безопасности, регламент деятельности коммерческого сектора. В данной зоне возможно установление правил и общих стандартов технологий пересадки пассажиров, размещения грузов и других обеспечивающих процессов перевозок, связанных с обслуживанием пассажиров и грузов.

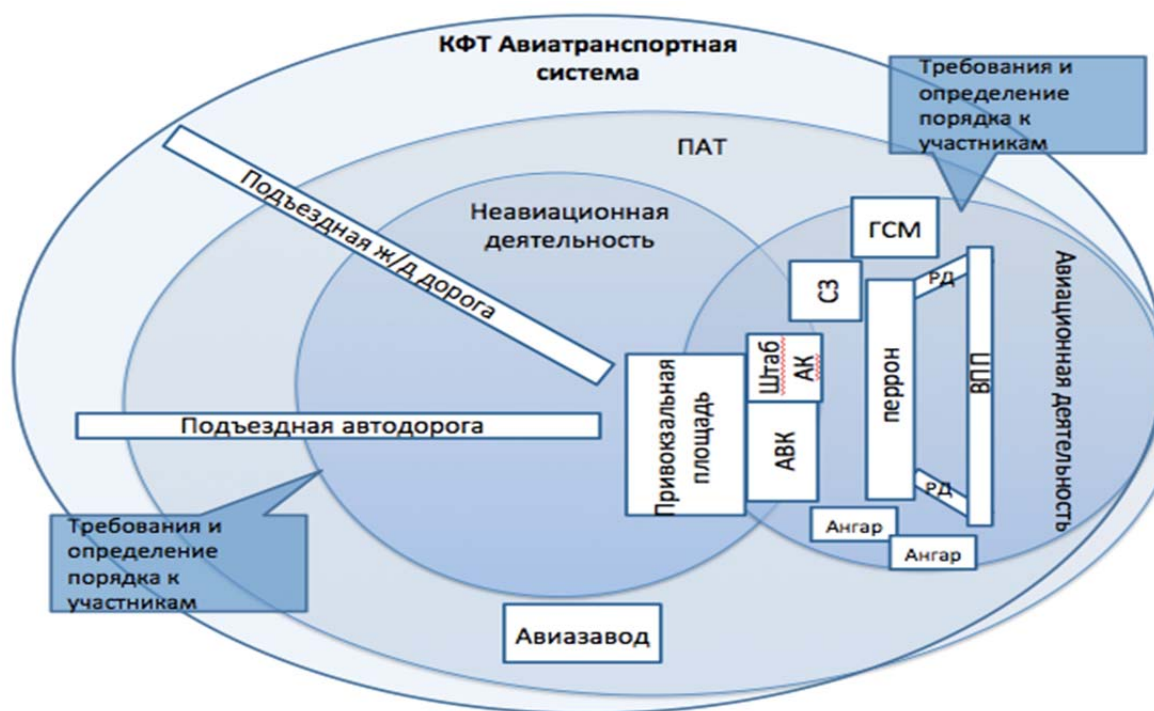


Рис. 2. Схема механизма государственного регулирования комплексной функциональной территории авиатранспортной системы

Fig. 2. Scheme of state regulation mechanism of the integrated functional territory of the air transport system

В рамках формирования такого механизма разрешаются проблемы регулирования взаимодействия участников авиатранспортной системы, единообразия формальных требований к объектам системы. В основе такого подхода к государственному регулированию будет лежать общее целеполагание к системе воздушного транспорта.

Для формирования комплексных функциональных зон необходимо использовать расчет их областей в рамках технологических процессов организации перевозок на воздушном транспорте в каждом конкретном случае, вводя показатели ограничений в систему.

Так как основным показателем эффективности государственной политики в области развития авиатранспорта является авиационная подвижность населения¹¹, которая согласно

утвержденной Министерством транспорта Российской Федерации методике рассчитывается как отношение количества перевезенных пассажиров, перевезенных воздушным транспортом, за отчетный период к общей численности населения за тот же период, то расчет эффективности применения механизма формирования комплексных функциональных зон через авиационную подвижность может быть представлен по следующей формуле:

$$АП_{тэф} = \frac{\Pi_{тф} - \Pi_{тп}}{\Pi_{тп}}, \quad (1)$$

где $АП_{тэф}$ – коэффициент авиационной подвижности;

$\Pi_{тф}$ – количество перевозок воздушным транспортом за период t на территории авиационного узла с применением комплексной функциональной зоны;

$\Pi_{тп}$ – количество перевозок воздушным транспортом за период t на территории авиа-

¹¹ Приказ Минтранса России № 388 от 1 ноября 2024 г. «Об утверждении методик расчета показателей национального проекта «Эффективная транспортная система» и входящего в него федерального проекта «Развитие опорной сети аэродромов». Приложение № 1 [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс.

2024. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_496736/ (дата обращения: 19.08.2025).

ционного узла без применения комплексной функциональной зоны;

$Ч_t$ – средняя численность населения за период t .

Разработанная авторами формула позволит определить относительный эффект от применения комплексного планирования функциональной территории, сформировать и проанализировать прогноз такого подхода к развитию региональных авиатранспортных систем на первичном уровне с ориентацией на ключевой показатель эффективности государственной политики в области гражданской авиации – авиационная подвижность населения, в том числе по региональным маршрутам минуя Москву.

Общая система показателей для авиатранспортного кластера должна включать:

- карту технологических процессов по обеспечению авиатранспортных перевозок;
- показатель оценки эффективности применения кластерного подхода (расчет эффективности применения механизма формирования комплексных функциональных зон через авиационную подвижность);
- законодательную базу регулирующих документов.

Таким образом, представленная система может быть сформирована на базе региональной авиатранспортной системы для увеличения синергии функционирования авиатранспортных предприятий. На базе предложенной концепции в качестве развития темы исследования могут быть рассмотрены вопросы обеспечения эффективности процессов авиатранспортного кластера, в частности операционная деятельность аэропортов и авиакомпаний, включающая обеспечение безопасности, построение систем для обеспечения грузопотоков и пассажиропотоков и формирования долгосрочной стратегии развития кадров и технологий.

Заключение

Учитывая изложенное, представляется возможным определить, что государственное регулирование развития региональных авиатранспортных систем является важ-

нейшим рычагом в развитии воздушного транспорта и имеет особое значение для Российской Федерации вследствие территориальных особенностей. Помимо драйвера экономического роста, транспорт обеспечивает подвижность населения, развитие отдаленных регионов страны [15]. Подходы к развитию региональных авиатранспортных систем Российской Федерации имеют четкую государственную составляющую в связи со спецификой отрасли. Отмечается отсутствие параметров оценки функционирования авиатранспортных систем с помощью государственных механизмов. Отсутствие полного комплекса подзаконных правовых актов в некоторых вопросах комплексного развития территорий.

Предложенная схема механизма государственного регулирования комплексной функциональной территории авиатранспортной системы основывается на подходе формирования функциональных зон, что позволит применить процессный подход внутри системы и оптимизировать технологические операции организации воздушных перевозок, повышая эффективность функционирования вследствие синергетического эффекта [16].

Формирование особых функциональных зон авиатранспортных систем обеспечит формирование единой сети воздушного транспорта на государственном уровне, что, несомненно, будет способствовать увеличению управляемости и создаст потенциал развития для всего авиакомплекса.

Список литературы

1. Полешкина И.О. Роль малой авиации в обеспечении транспортной доступности арктических регионов: проблемы и направления развития // Научный вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 2. С. 54–69. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-54-69
2. Шапкин В.С. Развитие авиатранспортных систем: мировые тенденции и российские перспективы // Международный конгресс по аэронавтике: сборник тезисов. Москва,

04–05 декабря 2023 г. М.: ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, 2023. С. 676–677.

3. **Дутов А.В.** Основные направления научно-исследовательской деятельности в интересах развития авиатранспортной системы Российской Федерации / А.В. Дутов, А.В. Кан, В.В. Ключков, А.В. Шакур, В.С. Шапкин // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2019. № 29. С. 9–21.

4. **Власенко А.О., Сухарев А.А., Урюпин И.В.** Оценка качества функционирования авиатранспортной системы как инструмент формирования требований к перспективной авиационной технике [Электронный ресурс] // Управление большими системами: сборник трудов. 2023. № 104. С. 73–99. DOI: 10.25728/ubs.2023.104.3 (дата обращения: 08.09.2025).

5. **Болт А.С., Болт П.С., Власова А.В.** Организация пассажирских мультимодальных перевозок в современных условиях // Транспорт: наука, техника, управление. Научный информационный сборник. 2024. № 11. С. 3–11. DOI: 10.36535/0236-1914-2024-11-1

6. **Романенко В.А.** Приближенные модели авиатранспортных систем массового обслуживания с частичной взаимопомощью между обслуживающими каналами // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21, № 4. С. 118–130. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-4-118-130

7. **Ефимов А.С.** Синергия авиатранспортной системы // Научный вестник МГТУ ГА. 2008. № 129. С. 85–89.

8. **Соловьева Т.Л.** К вопросу государственного регулирования на воздушном транспорте // Научный вестник МГТУ ГА. 2011. № 170. С. 113–116.

9. **Степаненко Е.В., Воскресенская А.С., Гречишкина В.И.** Трансформация авиалиний для внутреннего рынка Российской Федерации // Вестник транспорта Поволжья. 2024. № 2 (104). С. 61–69.

10. **Пенкина В.А.** Механизмы государственной поддержки обеспечения комплексного развития авиатранспортной системы и региональных маршрутных сетей страны // Научный

вестник МГТУ ГА. 2024. Т. 27, № 6. С. 56–71. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-6-56-71

11. **Власова А.В.** Влияние налоговых предпочтений на деятельность авиакомпаний // Налоговое администрирование в контексте глобальных вызовов: сборник трудов конференции. Нижний Новгород, 23 мая 2023 г. Нижний Новгород: Приволжский ИПК Федеральной налоговой службы, 2023. С. 30–33.

12. **Самуленков Ю.И., Бабков А.Б., Филатова Я.А.** Совершенствование инфраструктуры аэропортов гражданской авиации с учетом проектирования организаций по техническому обслуживанию воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 1. С. 35–52. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-1-35-52

13. **Гвоздев В.Е., Черняховская Л.Р., Блинова Д.В.** Проактивный и реактивный подходы к управлению дефектами аппаратно-программных комплексов // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019: сборник трудов. Москва, 17–20 июня 2019 г. М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2019. С. 2527–2532. DOI: 10.25728/vspu.2019.2527

14. **Елисеев Б.П., Власова А.В.** Обеспечение орнитологической безопасности. Проблемы аэропортов, убытки авиакомпаний и мнение судов при разрешении споров // Транспортное право. 2024. № 3. С. 4–8. DOI: 10.18572/1812-3937-2024-3-4-8

15. **Бабкина Л.Н., Отверченко Л.Ф.** Концепции стратегического развития авиатранспортной системы в регионах Российской Федерации // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2017. Т. 7, № 2 (21). С. 13–21.

16. **Степаненко А.С., Куренкова Е.О.** Перспективы реинжиниринга процессов субсидирования авиаперевозок в Российской Федерации // Финансовая экономика. 2024. № 4. С. 72–77.

References

1. **Poleshkina, I.O.** (2022). Contribution of general aviation to ensuring transport accessibility to the arctic regions: the challenges and areas of

focus. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 25, no. 2, pp. 54–69. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-54-69 (in Russian)

2. **Shapkin, V.S.** (2023). Development of air transport systems: global trends and Russian prospects. In: *Mezhdunarodnyy kongress po aeronavtike: sbornik tezisov*. Moscow: TsAGI im. prof. N.Ye. Zhukovskogo, pp. 676–677. (in Russian)

3. **Dutov, A.V., Kan, A.V., Klockov, V.V., Shakun, A.V., Shapkin, V.S.** (2019). Main directions of research activity in the interests of development of the air transport system of the Russian Federation. *Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA)*, no. 29, pp. 9–21. (in Russian)

4. **Vlasenko, A., Sukharev, A., Uryupin, I.V.** (2023). Developing the air transportation system quality assessment tools to define the main requirements for future aircraft. *Large-scale systems control*, no. 104, pp. 73–99. DOI: 10.25728/ubs.2023.104.3 (accessed: 08.09.2025). (in Russian)

5. **Bolt, A.S., Bolt, P.S., Vlasova, A.V.** (2024). Organization of multimodal passenger transportation in modern conditions. *Transport: Science, equipment, management. Scientific information collection*, no. 11, pp. 3–11. DOI: 10.36535/0236-1914-2024-11-1 (in Russian)

6. **Romanenko, V.A.** (2022). Approximate models of air transport queueing systems with partial mutual assistance between service channels. *Vestnik of Samara university. Aerospace and mechanical engineering*, vol. 21, no. 4, pp. 118–130. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-4-118-130 (in Russian)

7. **Efimov, A.S.** (2008). Synergism of transport systems. *Civil Aviation High Technologies*, no. 129, pp. 85–89. (in Russian)

8. **Solovieva, T.L.** (2011). Questions of the state regulation at air transport. *Civil Aviation High Technologies*, no. 170, pp. 113–116. (in Russian)

9. **Stepanenko, E.V., Voskresenskaya, A.S., Grechishkina, V.I.** (2024). Transformation of air routes for the domestic market of the Russian

Federation. *Vestnik Transporta Povolzhya*, no. 2 (104), pp. 61–69. (in Russian)

10. **Penkina, V.A.** (2024). The mechanisms of state support for the integrated development of the country's air transportation system and regional route networks. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 27, no. 6, pp. 56–71. DOI: 10.26467/2079-0619-2024-27-6-56-71 (in Russian)

11. **Vlasova, A.V.** (2023). Influence of tax preferences on airline activities. In: *Nalogovoye administrirovaniye v kontekste globalnykh vyzovov: sbornik trudov konferentsii*. Nizhny Novgorod: Privolzhskiy IPK Federalnoy nalogovoy sluzhby, pp. 30–33. (in Russian)

12. **Samulenkov, Yu.I., Babkov, A.B., Filatova, Ya.A.** (2022). Improving civil aviation airports infrastructure taking into account the design process of aircraft maintenance organizations. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 25, no. 1, pp. 35–52. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-1-35-52 (in Russian)

13. **Gvozdev, V.E., Chernyakhovskaya, L.R., Blinova, D.V.** (2019). Proactive and reactive approaches to defect management of hardware and software systems. In: *XIII Vserossiyskoye soveshchaniye po problemam upravleniya VSPU-2019: sbornik trudov*. Moscow: Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN, pp. 2527–2532. DOI: 10.25728/vspu.2019.2527 (in Russian)

14. **Eliseev, B.P., Vlasova, A.V.** (2024). Assurance of ornithological security. Airport problems, airline losses and judicial opinion in dispute resolution. *Transportnoye parvo*, no. 3, pp. 4–8. DOI: 10.18572/1812-3937-2024-3-4-8 (in Russian)

15. **Babkina, L.N., Otverchenko, L.F.** (2017). Concepts of strategic development of aviatriansport system in the regions of Russian Federation. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost*, vol. 7, no. 2 (21), pp. 13–21. (in Russian)

16. **Stepanenko, A.S., Kurenkova, E.O.** (2024). Prospects for reengineering the processes of subsidizing air transportation in the Russian Federation. *Finansovaya ekonomika*, no. 4, pp. 72–77. (in Russian)

Сведения об авторах

Степаненко Анастасия Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры организации перевозок на воздушном транспорте МГТУ ГА, a.stepanenko@mstuca.ru.

Сафонова Александра Викторовна, аспирант МГТУ ГА, alexandrapashetnyh@yandex.ru.

Information about the authors

Anastasia S. Stepanenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Air Transport Organization Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, a.stepanenko@mstuca.ru.

Alexandra V. Safonova, Postgraduate Student, Moscow State Technical University of Civil Aviation, alexandrapashetnyh@yandex.ru.

Поступила в редакцию 13.10.2025
Одобрена после рецензирования 08.12.2025
Принята в печать 23.07.2026

Received 13.10.2025
Approved after reviewing 08.12.2025
Accepted for publication 23.07.2026

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 629.735.5

DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-102-117

Сравнительный анализ кинематических схем конвертоплана на базе URANS-моделирования

А.С. Батраков¹, Л.И. Гарипова¹, М.А. Каучакова¹

*¹Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань, Россия*

Аннотация: В связи с ростом рынка беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), спецификой выполняемых ими задач все более актуальной становится задача проектирования преобразуемых летательных аппаратов – конвертопланов, которые обладают преимуществами вертолетной и самолетной схем: они способны совершать вертикальный взлет и посадку с неподготовленной поверхности и обладают большей крейсерской скоростью и дальностью полета, чем вертолеты. Ключевой проблемой конвертопланов являются переходные режимы, характеризующиеся сложной нестационарной аэродинамикой и резким изменением динамических свойств аппарата. В работе представлен сравнительный анализ двух кинематических схем конвертоплана: с поворотным и неподвижным крылом. Основной акцент в исследовании сделан на переходные режимы полета, когда происходит переход конвертоплана от вертикального полета по-вертолетному к горизонтальному по-самолетному. Целью работы является количественная оценка влияния этой цели была разработана 3D-модель конвертоплана, прототипом для которой послужил аппарат Bell Eagle Eye. Моделирование проводилось в программном комплексе Ansys Fluent на основе решения нестационарных уравнений Рейнольдса (URANS) с использованием модели турбулентности Спаларта – Аллмараса. Для каждой кинематической схемы был рассчитан ряд углов поворота силовой установки (0, 30, 60, 90°). Скорость полета и частота вращения винтов для каждого расчетного случая итерационным методом подбирались для обеспечения условия равномерного горизонтального полета (равенство нулю суммы сил, действующих на летательный аппарат). В результате численного моделирования получены интегральные характеристики: потребная мощность и крутящий момент на валу винта, скорость полета. Установлено, что компоновка с неподвижным крылом демонстрирует более высокую скорость полета (22 м/с против 10 м/с при угле 30°) и более выгодное отношение потребной мощности к скорости полета по сравнению с компоновкой с поворотным крылом.

Ключевые слова: конвертоплан, беспилотный летательный аппарат, кинематическая схема, переходный режим полета, численное моделирование, сравнительный анализ, интегральные аэродинамические характеристики.

Для цитирования: Батраков А.С., Гарипова Л.И., Каучакова М.А. Сравнительный анализ кинематических схем конвертоплана на базе URANS-моделирования // Научный вестник МГТУ ГА. 2026. Т. 29, № 4. С. 102–117. DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-102-117

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема № 123030100016-5, FZSU-2023-0005.

Comparative analysis of the kinematic schemes of a tiltrotor based on URANS modeling

A.S. Batrakov¹, L.I. Garipova¹, M.A. Kauchakova¹

¹Kazan National Research Technical University
named after A.N. Tupolev – KAI (KNRTU-KAI), Kazan, Russia

Abstract: Due to the growth of the unmanned aerial vehicle (UAV) market and the specific tasks they perform, the design of convertible aircraft, such as convertiplanes, is becoming increasingly relevant. These aircraft combine the advantages of helicopters and airplanes: they can take off and land vertically from unprepared surfaces and have higher cruising speeds and ranges than helicopters. The key problem of convertiplane aircraft is transient modes, characterized by complex unsteady aerodynamics and an abrupt change in the dynamic properties of the device. This paper presents a comparative analysis of two kinematic configurations of the aircraft: tilt-wing and tilt-rotor. The primary focus of the study is on the transitional flight modes, during which the aircraft transitions from vertical flight in helicopter mode to horizontal flight in airplane mode. The goal of the study is to quantify the effect of the type of kinematic scheme on the integrated aerodynamic characteristics of an aircraft. To achieve this goal, a 3D model of the aircraft was developed, based on the Bell Eagle Eye prototype. The simulation was carried out in the Ansys Fluent software package based on the solution of nonstationary Reynolds equations (URANS) using the Spalart–Allmaras turbulence model. A number of rotation angles of the power plant were calculated for each kinematic scheme. (0°, 30°, 60°, 90°). The flight speed and rotational speed of the propellers for each design case were selected iteratively to ensure a uniform horizontal flight (equal to zero the sum of the forces acting on the aircraft). The flight speed and rotor speed for each case were iteratively selected to ensure the condition of steady horizontal flight (the sum of forces acting on the aircraft equals zero). The numerical modeling characteristics resulted in obtaining the required power and torque at the rotor shaft, flight speed. It was concluded that the configuration with a fixed wing demonstrates a higher flight speed (22 m/s compared to 10 m/s at a 30° angle) and a more favorable ratio of required power to flight speed compared to the rotary-wing layout.

Keywords: convertiplane, unmanned aerial vehicle, kinematic scheme, transient flight mode, numerical modeling, comparative analysis, integral aerodynamic characteristics.

For citation: Batrakov, A.S., Garipova, L.I., Kauchakova, M.A. (2026). Comparative analysis of the kinematic schemes of a tiltrotor based on URANS modeling. Civil Aviation High Technologies, vol. 29, no. 4, pp. 102–117. DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-102-117

The research was carried out within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, theme No. 123030100016-5, FZU-2023-0005.

Введение

Рынок беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) в настоящее время является одним из самых быстрорастущих в мире [1]. Этот рост во многом обусловлен способностью БПЛА решать широкий спектр задач, который раньше выполнялся пилотируемой авиацией или вручную. Существуют сценарии применения, когда от БПЛА требуется возможность взлета с неподготовленной поверхности при обеспечении большой дальности и скорости полета. Такие задачи решаются с помощью аппаратов преобразуемого типа, способных обеспечить вертикальный взлет/посадку. Они лишены ключевых недостатков вертолетной и самолетной схем: вер-

толетные системы обладают небольшой крейсерской скоростью, а для самолетных систем необходима взлетно-посадочная полоса. Эффективность создания подъемной силы при вертикальном взлете для таких аппаратов тесно связана с нагрузкой на диск винта (рис. 1).

Существуют различные варианты технической реализации и аэродинамической компоновки БПЛА вертикального взлета/посадки [2–4]. Наиболее перспективными в этом сегменте являются аппараты с поворотными движительными системами – конвертопланы, главная особенность которых состоит в изменении аэродинамической конфигурации: от вертолетного режима (оси движителей верти-

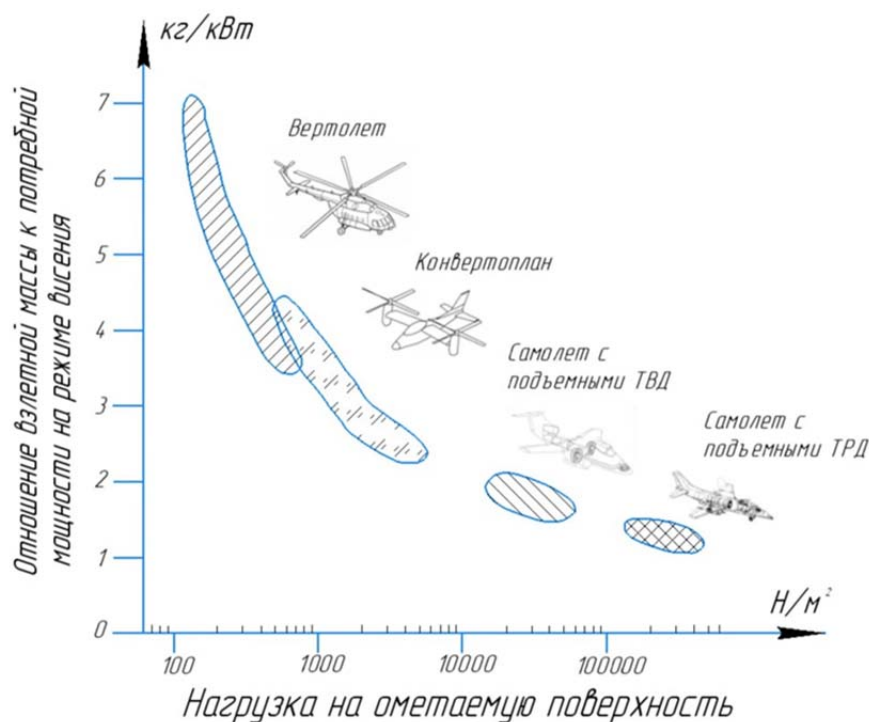


Рис. 1. Эффективность вертикальной подъемной силы при зависании от нагрузки на диск винта [2]
Fig. 1. Vertical lift efficiency during hovering due to rotor disk load [2]

кальны) для взлета, посадки и полета на малых скоростях до самолетного режима (оси движителей горизонтальны) для крейсерского полета на высоких скоростях.

В зависимости от аэродинамической компоновки и ее технической реализации выделяют несколько подтипов конвертопланов: с поворотными винтами (рис. 2, а) или мотогондолами (рис. 2, б), с поворотным крылом (рис. 2, д, 2, е), смешанный тип с поворотной частью крыла вместе с винтами (рис. 2, в, 2, з). Конвертопланы с поворотными винтами или мотогондолами предполагают изменение вектора тяги за счет поворота отдельных винтомоторных групп при фиксированном положении крыла. Конвертопланы с поворотным крылом характеризуются синхронным поворотом всего крыла вместе с закрепленными на нем двигателями. Наибольшей популярностью у авиаконструкторов пользуется первый тип конвертопланов (рис. 3) благодаря относительной простоте механизации и наследованию принципов, отработанных на пилотируемых аппаратах, таких как V-22 Osprey.

Основной сложностью при проектировании конвертопланов являются переходные режимы, поскольку на этих этапах возникает комплекс проблем, связанных с кардинальным изменением аэродинамики, балансировки и управления.

Ключевой проблемой переходного режима конвертопланов является сложная и нестационарная картина обтекания, вызванная аэродинамической интерференцией. Возникает взаимное влияние воздушных винтов и корпуса летательного аппарата, что может приводить к потере эффективности управления, резкому снижению тяги винтов и возникновению опасных вибраций [5]. Поворот плоскости винта приводит к возникновению вихревых колец, срывных явлений на лопастях и значительным колебаниям нагрузки. Численное моделирование [6] демонстрирует, что эти эффекты носят ярко выраженный нестационарный характер и требуют высокоточной CFD-модели. При повороте крыла конвертоплана, из-за больших углов атаки возможен срыв потока [6, 7]. Для парирования этого явления крыло погружают в скос

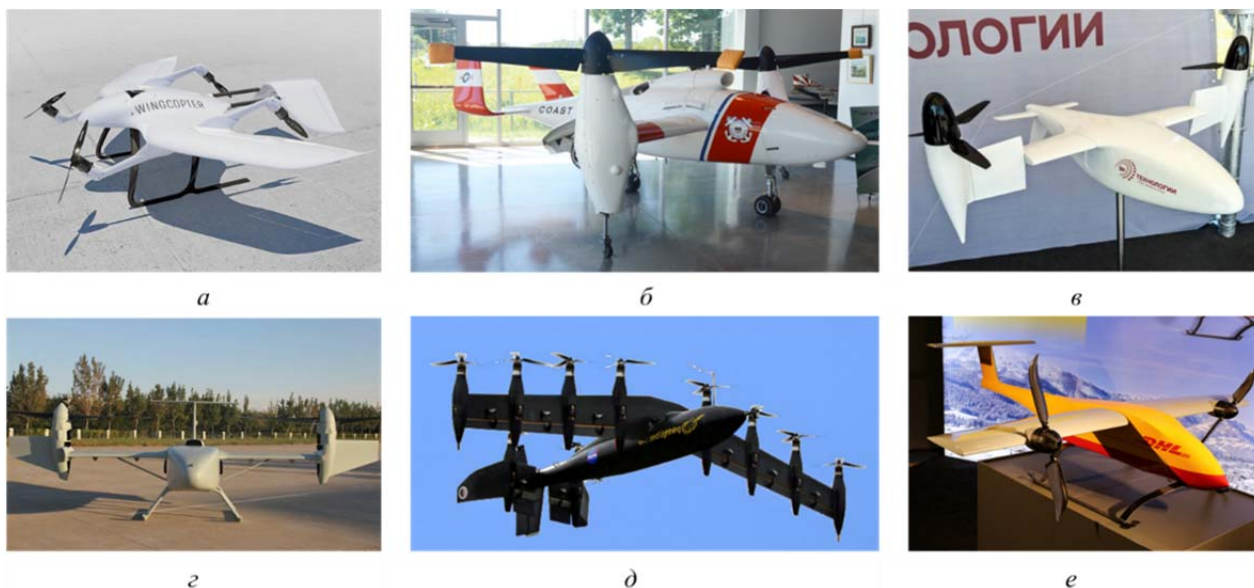


Рис. 2. БПЛА типа конвертоплан: *а* – Wingcopter¹, *б* – Bell TR911X Eagle Eye², *в* – БЛА-конвертоплан «ВР технологии»³, *г* – CH-10 Rainbow-10⁴, *д* – NASA GL-10 Greased Lightning⁵, *е* – DHL Parcelcopter⁶
Fig. 2. Convertiplane Tiltrotor UAVs: *a* – Wingcopter¹, *b* – Bell TR911X Eagle Eye², *в* – VR Technologies tiltrotor UAV³, *г* – CH-10 Rainbow-10⁴, *д* – NASA GL-10 Greased Lightning⁵, *е* – DHL Parcelcopter⁶

струи от несущих винтов при работе двигателей на повышенной мощности. Хотя этот метод эффективен для взлета, его применение на этапе захода на посадку становится контрпродуктивным и ведет к избыточному расходу энергии. Кроме того, наклоненное крыло подвергается прямому воздействию ветрового напора, что ухудшает управляемость при зависании в условиях порывистого ветра [8].

Непосредственное следствие описанных нестационарных аэродинамических явлений – трудности в обеспечении устойчивости и управляемости. В процессе трансформации летательного аппарата происходит изменение моментов инерции, появляется нелинейность динамических свойств [9, 10], наблюдается изменение статической и динамической устойчивости БПЛА [11, 12]. Поскольку переходный режим полета не является устойчивым, требуется разработка единой архитектуры системы управления, способной эффективно функционировать во всех режимах полета [13–15].

Перечисленные проблемы накладывают отпечаток и на конструкцию аппарата. Размещение тяжелых винтов на концах крыла ограничивает его удлинение, что негативно сказывается на аэродинамическом качестве. Конструктивно поворот винтов требует меньшей прочности опорных точек по сравнению с поворотом крыла, где поворотный механизм должен быть рассчитан на нагрузки от всего крыла [4]. Использование единой

¹ Wingcopter 178 HL [Электронный ресурс] // Wikipedia. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Wingcopter> (дата обращения: 11.11.2025).

² Bell Eagle Eye [Электронный ресурс] // Википедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Bell_Eagle_Eye (дата обращения: 11.11.2025).

³ «Вертолеты России» представят 3 новейших беспилотника [Электронный ресурс] // Военное обозрение. URL: <https://topwar.ru/95454-vertolyety-rossii-predstavlyat-3-noveyshih-bespilotnika.html> (дата обращения: 11.11.2025).

⁴ CH-10 Rainbow-10 Drone [Электронный ресурс] // GlobalSecurity. URL: <https://www.globalsecurity.org/military/world/china/ch-10.htm> (дата обращения: 11.11.2025).

⁵ NASA GL-10 Greased Lightning [Электронный ресурс] // Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/NASA_GL-10_Greased_Lightning (дата обращения: 11.11.2025).

⁶ DHL Parcelcopter 3 – vDrone [Электронный ресурс] // vDrone. URL: <https://blog.vdr.one/dhl-parcelcopter-3/> (дата обращения: 11.11.2025).

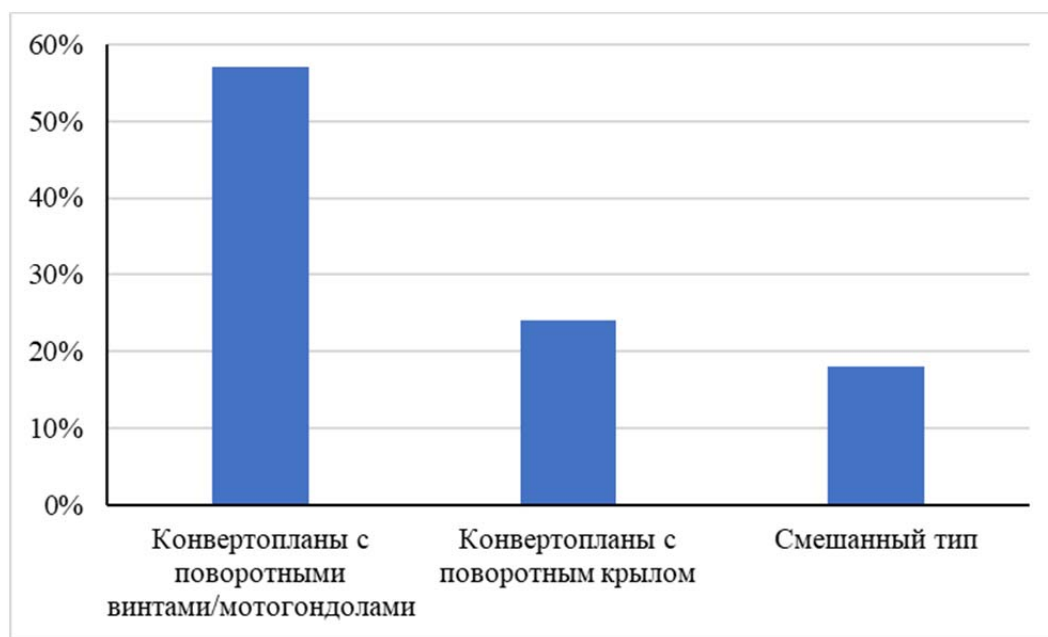


Рис. 3. Процентное соотношение БПЛА-конвертопланов различных типов [4]
Fig. 3. Percentage of convertiplane UAVs of different types [4]

силовой установки для реализации как вертолетного, так и самолетного режимов полета приводит к повышению удельного расхода топлива и снижению общей энергоэффективности аппарата [16], большие по площади винты приводят к значительным ограничениям в крейсерской скорости полета и высокому расходу топлива [17].

Таким образом, при проектировании летательного аппарата типа конвертоплан одной из актуальных задач является определение аэродинамических характеристик на переходном режиме. Целью настоящей работы

является сравнительный анализ аэродинамических характеристик двух компоновочных решений конвертоплана на переходном режиме полета с помощью средств вычислительной аэродинамики.

Объект исследования

В качестве прототипа летательного аппарата рассматривается конвертоплан Eagle Eye (рис. 4), основные геометрические параметры которого представлены в табл. 1.



Рис. 4. Беспилотный летательный аппарат Eagle Eye
Fig. 4. Eagle Eye unmanned aerial vehicle

Таблица 1
Table 1

Основные геометрические характеристики прототипа
Main geometric characteristics of the prototype

Параметр	Значения
Длина	5,182
Высота	1,737
Размах крыла	4,633
Диаметр винта	3,048
Максимальный взлетный вес, кг	1 360,7
Скорость полета, км/ч	408

Для проведения численного моделирования разработана модель (рис. 5) компоновки конвертоплана. Фюзеляж летательного аппарата выполнен в виде набора эллиптических сечений. Длина фюзеляжа составила $L = 2$ м, высота – $h = 0,4$ м (рис. 6).

Крыло конвертоплана построено на базе аэродинамического профиля GOE 434, имеет прямоугольную форму в плане. Угол установки крыла по отношению к строительной горизонтали летательного аппарата 5° . Основные геометрические параметры модели

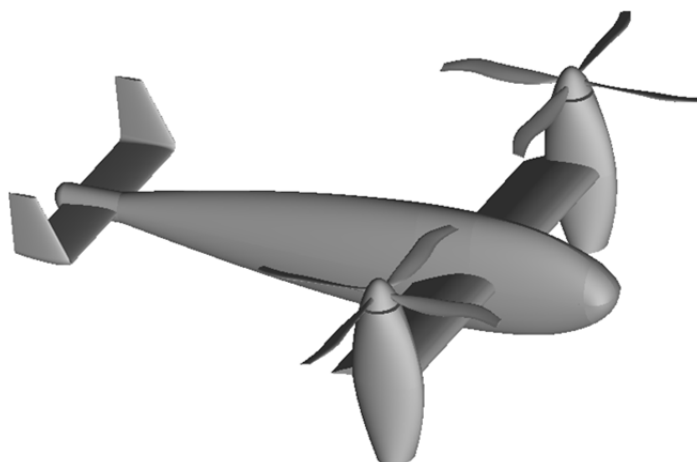


Рис. 5. Расчетная модель конвертоплана
Fig. 5. Computational model of tiltrotor

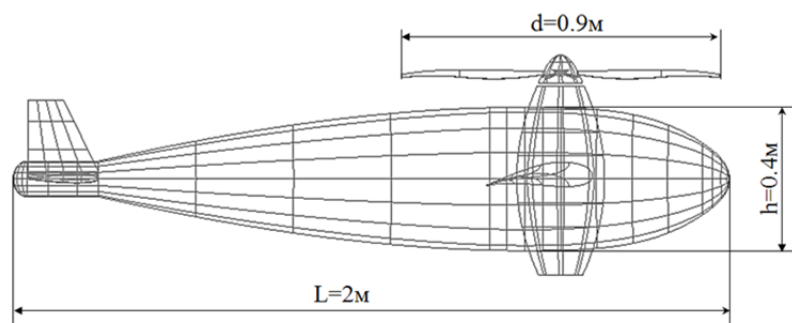


Рис. 6. Геометрические параметры фюзеляжа летательного аппарата
Fig. 6. Geometric parameters of the aircraft fuselage

представлены в табл. 2. В качестве движителей используются поворотные винты типа КП2, разработанные в научно-исследовательской лаборатории № 1 КНИТУ-КАИ. В рамках данного исследования угол установки лопастей выбран равным 16° , так как при этом наблюдается максимальный относительный коэффициент полезного действия винта.

На базе одной геометрической модели рассматривается два варианта трансформа-

ции летательного аппарата: с поворотным крылом (рис. 7–9) и с неподвижным крылом (рис. 10–12). На крейсерском режиме обе кинематические схемы имеют одинаковую конфигурацию (рис. 13). При реализации различных кинематических схем возникает разная картина аэродинамической интерференции. Оценка аэродинамической интерференции выполнена с помощью численного моделирования для ряда углов поворота винта: $\alpha_{\text{винта}}$ 0, 30, 60, 90° .

Таблица 2
Table 2

Геометрические характеристики модели
Geometric characteristics of the model

Параметр	Значения
Диаметр винта D, м	0,9
Количество лопастей	4
Размах крыла L, м	1,35
Удлинение крыла λ	4,5
Хорда крыла, м	0,3
Площадь крыла, м^2	0,405

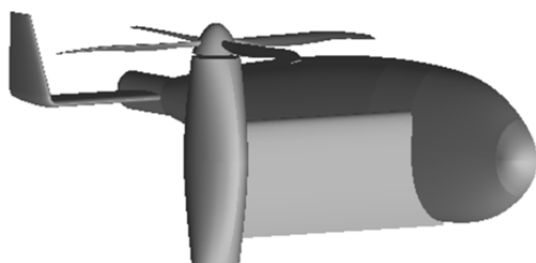


Рис. 7. Конвертоплан с поворотным крылом
($\alpha_{\text{винта}} = 0^\circ$)
Fig. 7. Tilt-wing ($\alpha_{\text{wing}} = 0^\circ$)

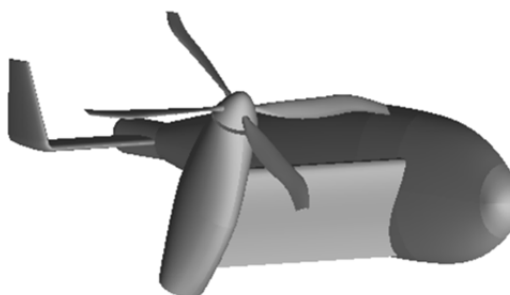


Рис. 8. Конвертоплан с поворотным крылом ($\alpha_{\text{винта}} = 30^\circ$)
Fig. 8. Tilt-wing ($\alpha_{\text{wing}} = 30^\circ$)

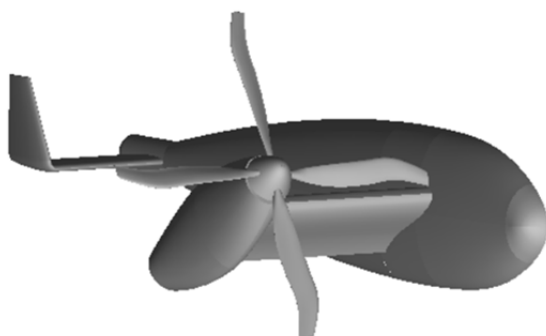


Рис. 9. Конвертоплан с поворотным крылом
($\alpha_{\text{винта}} = 60^\circ$)
Fig. 9. Tilt-wing ($\alpha_{\text{wing}} = 60^\circ$)

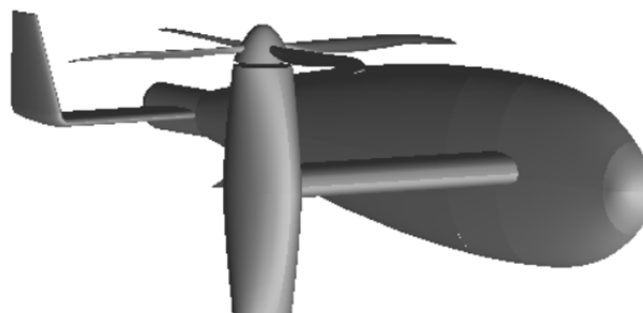


Рис. 10. Конвертоплан с неподвижным крылом
($\alpha_{\text{винта}} = 0^\circ$)
Fig. 10. Fixed wing convertiplane ($\alpha_{\text{wing}} = 0^\circ$)

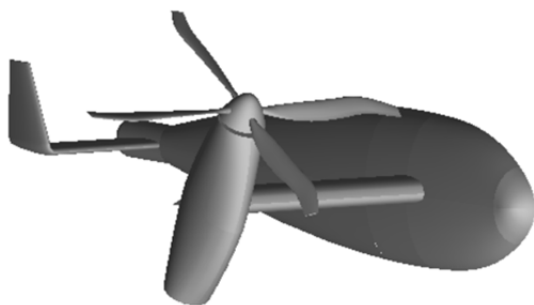


Рис. 11. Конвертоплан с неподвижным крылом
($\alpha_{\text{винта}} = 30^\circ$)
Fig. 11. Fixed wing convertiplane ($\alpha_{\text{wing}} = 30^\circ$)

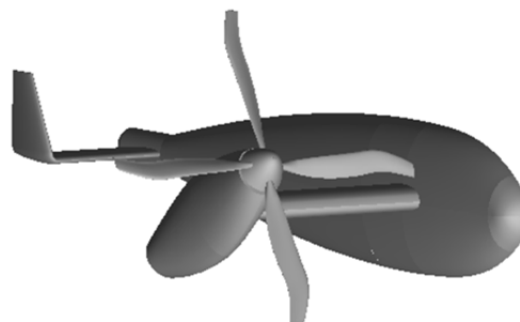


Рис. 12. Конвертоплан с неподвижным крылом
($\alpha_{\text{винта}} = 60^\circ$)
Fig. 12. Tilt-rotor ($\alpha_{\text{wing}} = 60^\circ$)

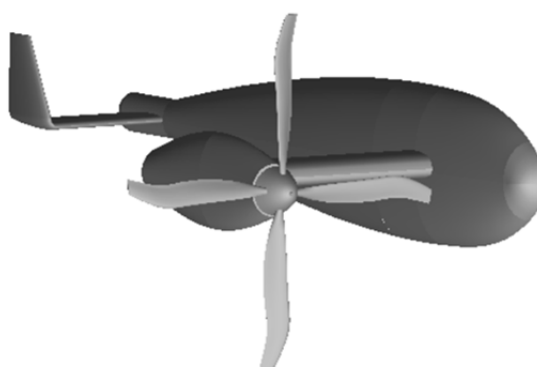


Рис. 13. Конвертоплан ($\alpha_{\text{винта}} = 90^\circ$)
Fig. 13. Airplane configuration ($\alpha_{\text{wing}} = 90^\circ$)

Математическая модель

Численное моделирование обтекания компоновки проводится на базе решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса в программном комплексе Ansys Fluent в нестационарной постановке (URANS). Для замыкания системы уравнений использовалась модель турбулентности Спаларта – Аллмараса. Модель турбулентности выбрана ввиду наименьших требований к вычислительным ресурсам. Решение уравнений строилось с использованием метода конечных объемов.

На первом этапе выполнено численное и физическое моделирование изолированного

винта на режиме осевого обтекания. Физическое моделирование проведено в аэродинамической трубе Т1-К. Экспериментальная модель винта имеет диаметр 0,9 м, частота вращения винта составляла 1 800 об/мин. Измерение тяги и крутящего момента осуществлялось тензометрическим методом. Эксперимент выполнен для ряда углов установки лопастей в диапазоне от 8 до 20° с шагом 4°. Численное моделирование выполнено в стационарной постановке для одной лопасти с применением граничного условия периодичности. Для расчетов построена многоблочная гексагональная сетка, содержащая порядка 6 млн ячеек. Результаты численного и физического моделирования представлены на рис. 14.

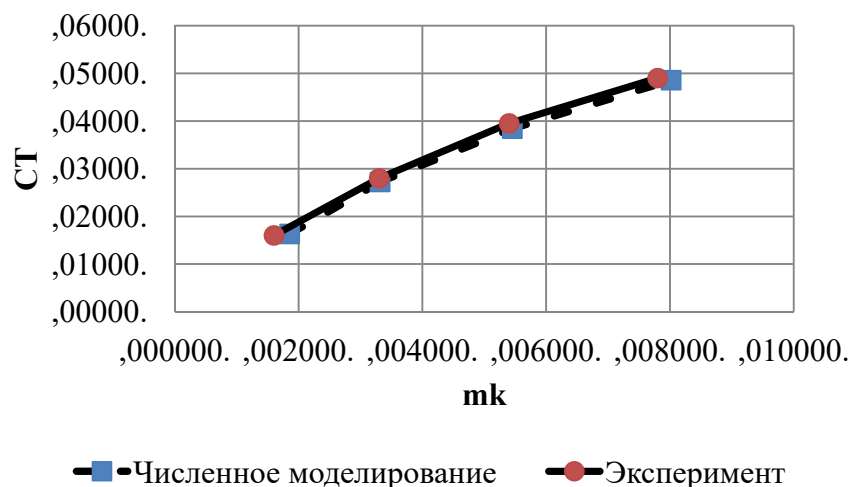


Рис. 14. Зависимость коэффициента тяги винта (C_T) от коэффициента крутящего момента (m_k)
Fig. 14. Dependence of the rotor thrust coefficient (C_T) from the torque coefficient (m_k)

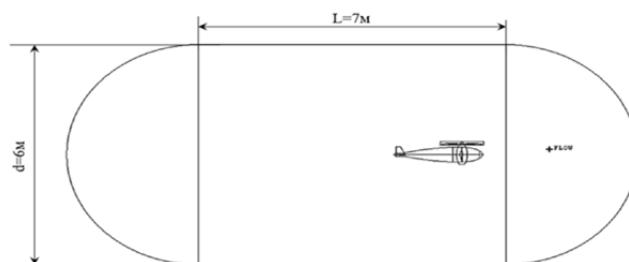


Рис. 15. Геометрические параметры расчетной области
Fig. 15. Geometric parameters of the computational domain

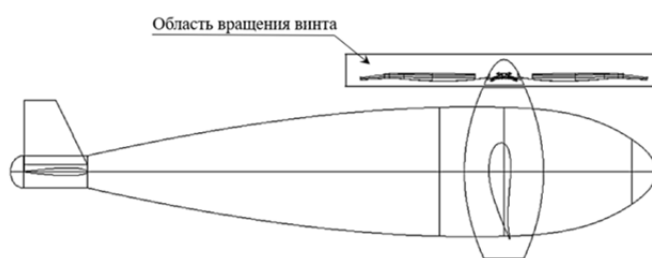


Рис. 16. Разделы расчетной области
Fig. 16. Sections of the computational domain

Из представленных данных следует, что результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментом.

Внешняя расчетная область представляет собой капсулу, состоящую из цилиндрической части длиной $L = 7$ м, диаметром $d = 6$ м и двух полусфер диаметром $d = 6$ м (рис. 15).

Для моделирования вращательного движения винта выделена цилиндрическая область (рис. 16), содержащая геометрию обтекателя и четырех лопастей.

С учетом того что расчеты выполнены без скольжения, рассматривалось обтекание полумодели с применением граничного условия симметрии.

Дискретизация пространства осуществлялась с помощью тетра-сетки. Максимальный размер ячейки во всей области не превышал 0,5 м. К поверхности летательного аппарата и к области вращения винта выполнено сгущение сетки до размера 0,01 м. В области передней кромки крыла выполнено сгущение

до величины 0,001 м, а в области задней кромки крыла сетка измельчается до величины 0,0005 м. Аналогичное сгущение применено на хвостовом оперении летательного аппарата. Распределение ячеек в плоскости симметрии летательного аппарата представлено на рис. 17.

Для подвижной области с воздушным винтом максимальный размер ячейки составляет не более 0,02 м. Вдоль границ вращающейся области размеры ячеек не более 0,01 м.

Около передней кромки каждой лопасти назначены области повышенной плотности ячеек с размером не более 0,0005 м (рис. 18). На поверхности лопасти (рис. 19) выполнено измельчение сетки в области задней кромки и в концевой части лопасти до размера 0,0005 м.

Расчетная сетка состоит из 7,9 млн элементов в области воздушного винта и 2,6 млн элементов в неподвижной области. Суммарное количество элементов составило 10,5 млн.

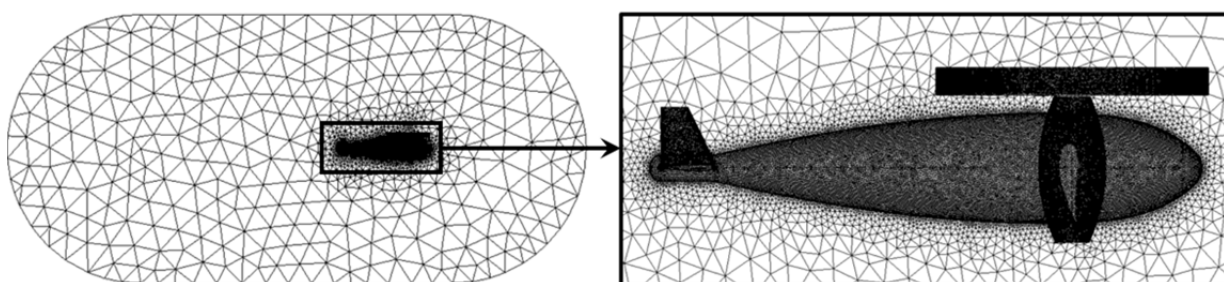


Рис. 17. Расчетная сетка в плоскости симметрии
Fig. 17. Computational grid in the plane of symmetry

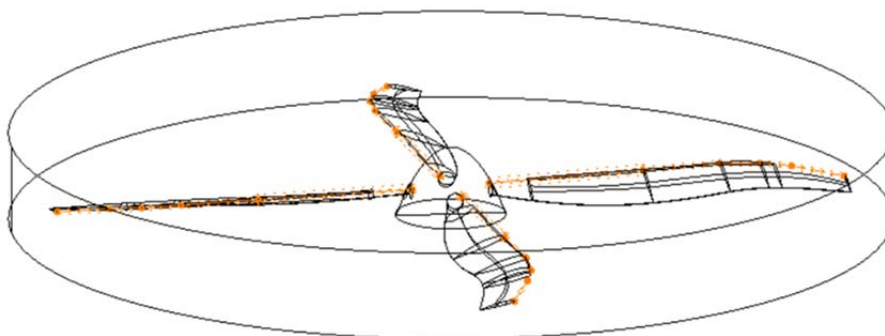


Рис. 18. Вращающаяся область
Fig. 18. Rotating area

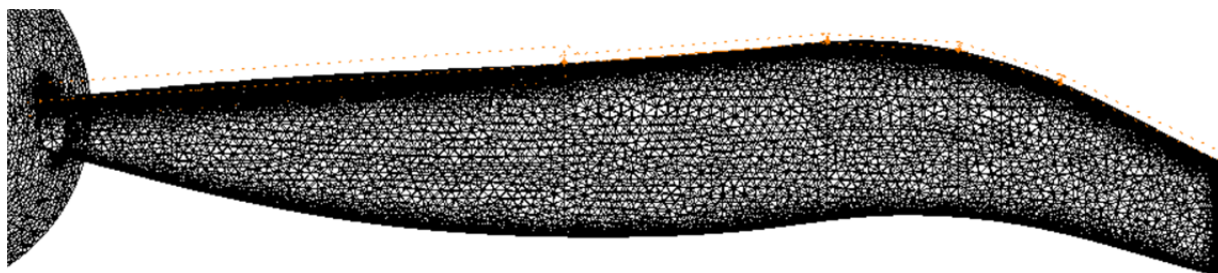


Рис. 19. Распределение ячеек вдоль лопасти
Fig. 19. Distribution of cells along the blade

На границе вращающейся области используется условие interface. На всех поверхностях модели используется граничное условие типа твердой стенки без проскальзывания. На передней полусфере и цилиндрической поверхности внешней области задается граничное условие входа скорости (Velocity inlet). На задней полусфере устанавливается давление невозмущенного потока (Pressure outlet).

Тип решателя Pressure-Based. Отношение турбулентной вязкости 10 % (Turbulent Viscosity Ratio). Метод сопряженного решения по давлению и скорости (Coupled). Используется схема аппроксимации второго порядка. Шаг по времени соответствует углу поворота винта по азимуту на $\psi = 6^\circ$. Внутри каждого шага по времени проводится 20 итераций.

Расчеты проводились до обеспечения сходимости, которое устанавливалось после 6–8 оборотов воздушного винта. После установления сходимости проводилась оценка аэродинамического сопротивления и подъемной силы летательного аппарата. На основании полученных данных выполнялась корректировка скорости полета и частоты вращения винта для каждой конфигурации для обеспечения условия равномерного горизонтального полета (равенство нулю суммы сил,

действующих на летательный аппарат). Вес летательного аппарата задан равным 200 Н. После завершения итерационного процесса выполнена оценка крутящего момента и потребляемой мощности на валу винта. Расчеты выполнены с использованием сервера Dell PowerEdge R440 с общим числом вычислительных ядер 32 типа Intel Xeon Gold.

Результаты исследования

В результате выполнения численного моделирования получены интегральные аэродинамические характеристики летательного аппарата на различных стадиях переходного режима полета. Полученные результаты для двух рассмотренных моделей конвертоплана представлены в графическом виде на рис. 20–23.

Обсуждение результатов

Из полученных данных следует, что потребляемая частота вращения винта в обеих конфигурациях приблизительно одинакова, но наблюдается отличие при угле установки винта $\alpha_{\text{винта}} = 60^\circ$ (рис. 20). На данном режиме в случае неподвижного крыла потребная частота вращения винта выше, чем для случая с поворотным крылом.

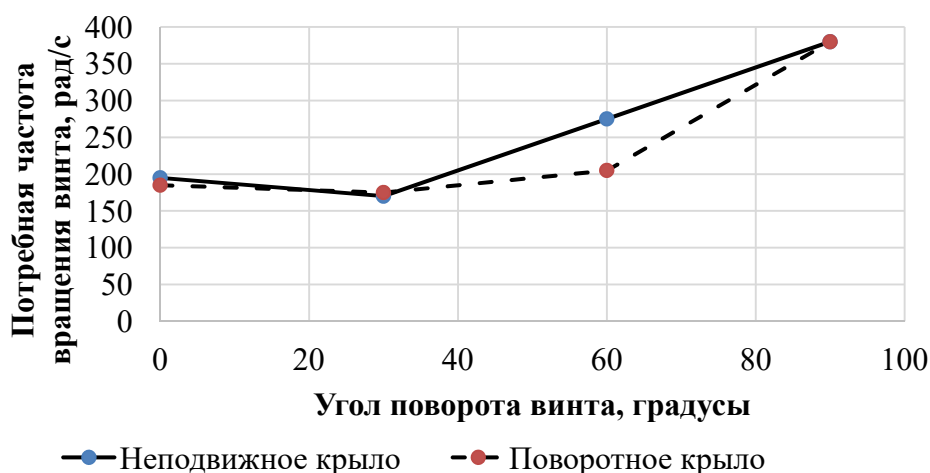


Рис. 20. Зависимость потребляемой частоты вращения винта от угла его поворота
Fig. 20. The dependence of the required propeller rotation speed from the angle of its rotation

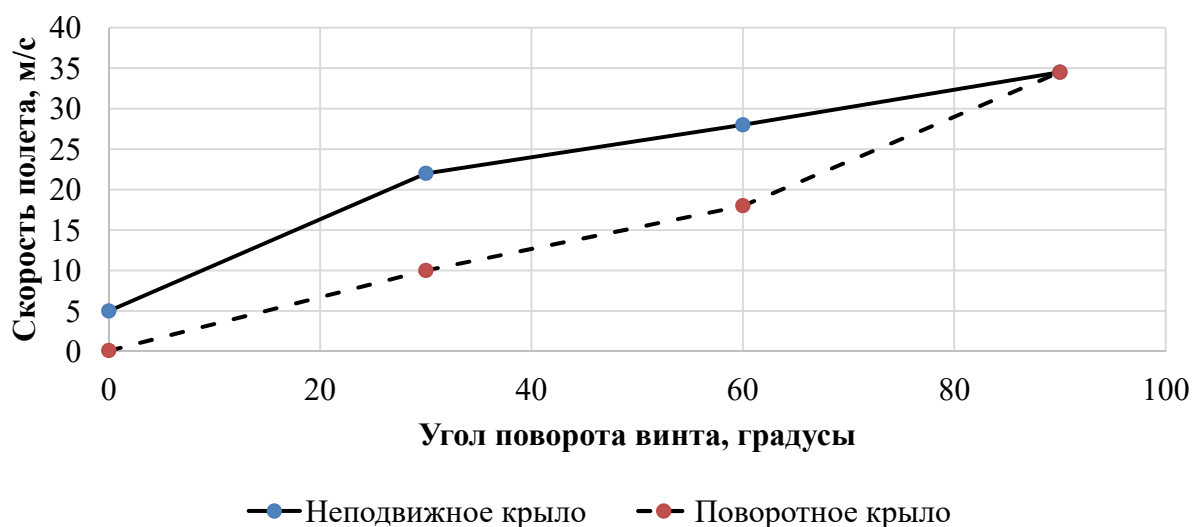


Рис. 21. Зависимость скорости полета летательного аппарата от угла поворота винта
Fig. 21. The dependence of the flight speed of an aircraft on the propeller rotation angle

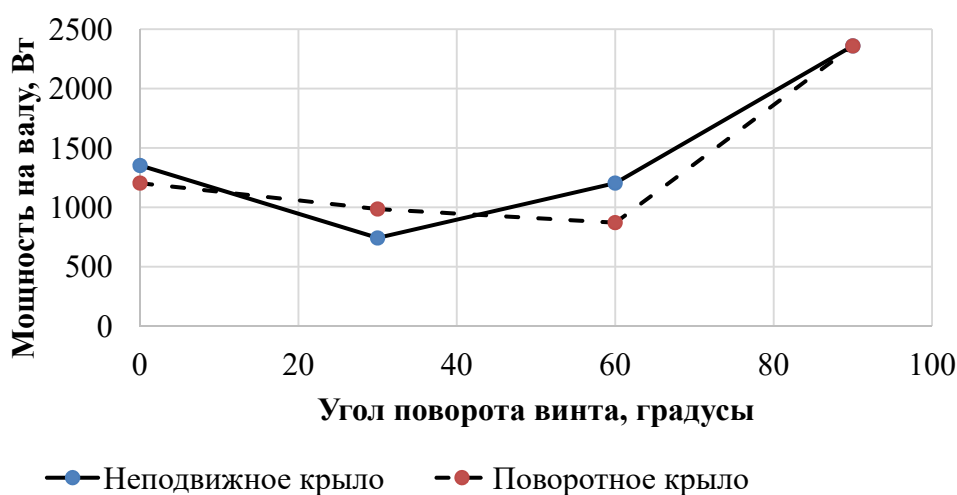


Рис. 22. Зависимость потребной мощности на валу от угла поворота винта
Fig. 22. Dependence of the required shaft power from the propeller rotation angle

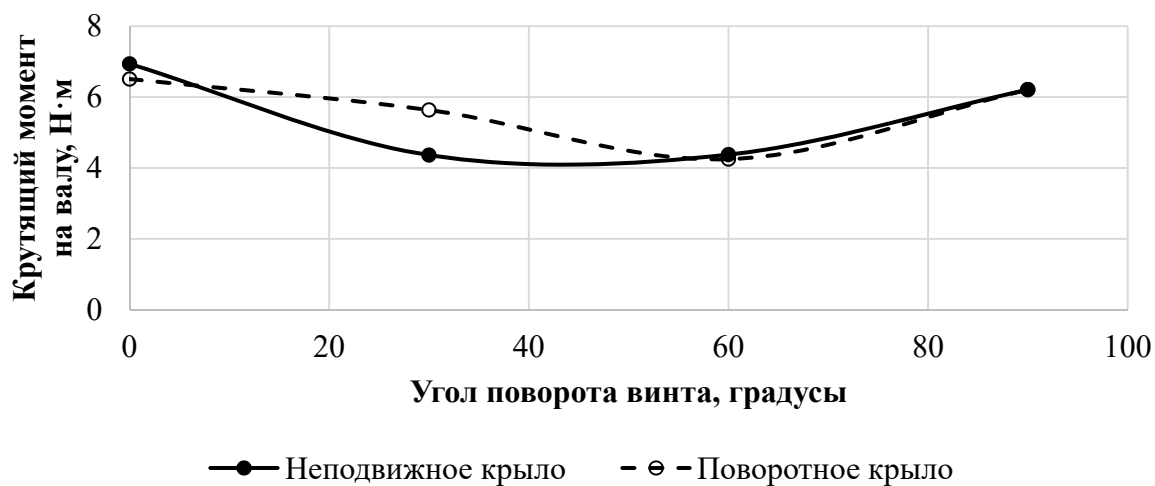


Рис. 23. Зависимость потребного крутящего момента на валу от угла поворота винта
Fig. 23. The dependence of the required torque on the shaft from the angle of rotation of the screw

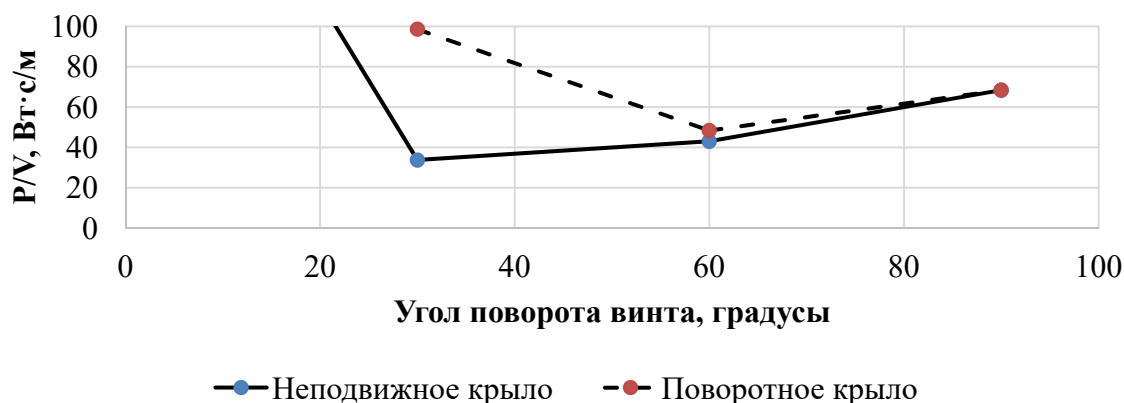


Рис. 24. Отношение потребляемой мощности на валу к скорости полета в зависимости от угла поворота винта
Fig. 24. The ratio of required shaft power to flight speed depending on the propeller rotation angle

Скорость полета летательного аппарата с неподвижным крылом значительно выше на всем переходном диапазоне изменения углов атаки воздушного винта (рис. 21). Причиной такого поведения является уменьшенное аэродинамическое сопротивление корпуса летательного аппарата за счет малого угла атаки крыла.

На режиме взлета ($\alpha_{\text{винта}} = 0^\circ$) для конфигурации с поворотным крылом потребный крутящий момент и потребляемая мощность винта несколько ниже, чем для конфигурации с неподвижным крылом. Такое отличие обусловлено сопротивлением крыла. На переходных режимах крутящий момент немонотонно зависит от угла поворота крыла (рис. 22).

На рис. 23 видно, что компоновка с поворотным крылом требует большего крутящего момента при угле поворота 30° . При этом скорость полета существенно ниже (10 м/с) по сравнению с аналогичным показателем для компоновки с неподвижным крылом (22 м/с).

Из анализа данных, представленных на рис. 24, следует, что компоновка с неподвижным крылом обладает лучшим отношением потребляемой мощности к скорости полета летательного аппарата по сравнению с конфигурацией с подвижным крылом на переходном режиме полета.

Таким образом, в настоящей работе рассмотрено обтекание компоновки конвертоплана в двух конфигурациях: с поворотным и

неподвижным крылом. При выходе на режим горизонтального полета по-самолетному обе конфигурации идентичны. На режиме вертикального взлета и посадки отличия незначительны. На переходных режимах конфигурация с неподвижным крылом показала лучшие характеристики по сравнению с поворотным крылом.

В настоящей работе рассмотрена упрощенная постановка моделирования без учета циклического шага винта, отклонения руля высоты, динамики переходного процесса. Полученные данные следует рассматривать с точки зрения качественного сопоставления компоновочных решений.

Список литературы

1. Кузина Е.Ю. Перспективы развития российского рынка беспилотных аппаратов // Российский внешнеэкономический вестник. 2024. № 10. С. 96–108. DOI: 10.24412/2072-8042-2024-10-96-108
2. Maisel M.D., Giulianetti D.J., Dugan D.C. The history of the XV-15 tilt rotor research aircraft: from concept to flight. Washington, D.C: National Aeronautics and Space Administration, 2000. 222 p.
3. Набиев Р.Н.О., Абдуллаев А.А.О. Беспилотные летательные аппараты конвертопланового типа: текущее состояние и перспективы // Естественные и технические

науки. 2021. № 3. (154). С. 146–162. DOI: 10.25633/ETN.2021.03.13

4. **Seyed A.B., Farzad J., Hamed M.K.** Flight mechanics and control of tilt rotor/tilt wing unmanned aerial vehicles: A review // AUT Journal of Modeling and Simulation. 2021. No. 1. Pp. 49–66. DOI: 10.22060/miscj.-2021.19117.5231

5. **Perez D.G.** Tiltwing transition flight analysis using high-fidelity CFD / D.G. Perez, P.V. Diaz, A. Sanguinetti, S. Yoon [Электронный ресурс] // Conference: The Vertical Flight Society's 80th Annual Forum & Technology Display, 2024. 27 p. DOI: 10.4050/F-0080-2024-1229 (дата обращения: 12.10.2025).

6. **Huan L.** Calculation and analysis of interaction flowfield over tiltrotor aircraft in conversion mode / L. Huan, W. Xiaojun, J. Hongyin, Z. Guiyu, C. Pengcheng, L. Bin [Электронный ресурс] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. No. 1081. ID: 012046. 20 p. DOI: 10.1088/1757-899X/1081/1/012046 (дата обращения: 12.10.2025).

7. **Campbell J.P.** Vertical takeoff and landing aircraft. 1st ed. N.Y.: Macmillan, 1962. 202 p.

8. **Sobiesiak L.A., Fortier-Topping H., Beaudette D. и др.** Modelling and control of transition flight of an eVTOL tandem tilt-wing aircraft [Электронный ресурс] // 8th European Conference for Aeronautics and Aerospace Sciences (EUCASS), 2019. 14 p. DOI: 10.13009/EUCASS2019-137 (дата обращения: 12.10.2025).

9. **Rohr D.** Nonlinear model predictive velocity control of a VTOL tiltwing UAV / D. Rohr, M. Studiger, T. Stastny, N.R.J. Lawrance, R. Siegwart // IEEE Robotics and Automation Letters. 2021. Vol. 6, no. 3. Pp. 5776–5783. DOI: 10.1109/LRA.2021.3084888

10. **Аполлонов Д.В.** Выбор архитектуры системы автоматического управления преобразуемого беспилотного летательного аппарата – «конвертоплана» / Д.В. Аполлонов, К.И. Бибилова, В.М. Шибеев, А.В. Гаврилова [Электронный ресурс] // Труды МАИ. 2021. № 121. DOI: 10.34759/trd-2021-121-25 (дата обращения: 12.10.2025).

11. **Lu K.** Flight dynamics modeling and dynamic stability analysis of tilt-rotor aircraft / K. Lu, L. Chunsheng, C. Li, R. Chen [Электронный ресурс] // International Journal of Aerospace Engineering. 2019. ID: 5737212. 15 p. DOI: 10.1155/2019/5737212 (дата обращения: 12.10.2025).

12. **Аполлонов Д.В.** Формирование алгоритмов системы автоматического управления преобразуемого беспилотного летательного аппарата / Д.В. Аполлонов, К.И. Бибилова, В.М. Шибеев, И.Е. Ефимова [Электронный ресурс] // Труды МАИ. 2022. № 122. DOI: 10.34759/trd2022-122-23 (дата обращения: 12.10.2025).

13. **Черноморский А.И.** Структура и законы управления тягой четырехроторного конвертоплана в переходном режиме его полета / А.И. Черноморский, Э. Курис, К.С. Лельков, В.А. Петрухин, А.А. Кругов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2021. № 10. С. 37–44. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-10-37-44

14. **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

15. **Мясников М.И., Ильин И.Р.** Математическая модель динамики полета конвертируемого винтокрылого летательного аппарата с системой автоматического управления // Вестник Московского авиационного института. 2023. Т. 30, № 3. С. 187–200.

16. **Johnson W., Silva C.** Observations from exploration of VTOL urban Air mobility designs [Электронный ресурс] // Presented at the 7th Asian/Australian Rotorcraft Forum. Korea, Jeju Island, 30 October-1 November 2018. 15 p. URL: https://rotorcraft.arc.nasa.gov/Publications/files/Johnson_Silva_ARF2018.pdf (дата обращения: 12.10.2025).

17. **Droandi G., Zanotti A., Gibertini G.** Aerodynamic interaction between rotor and tiltwing in hovering flight condition [Электронный ресурс] // Journal of the American Helicopter Society. 2015. Vol. 60, no. 4. 20 p.

DOI: 10.4050/JAHS.60.042011 (дата обращения: 12.10.2025).

References

1. Kuzina, E.Yu. (2024). Prospects for Russia's unmanned aerial vehicle market. *Russian Foreign Economic Bulletin*, no. 10, pp. 96–108. DOI: 10.24412/2072-8042-2024-10-96-108 (in Russian)
2. Maisel, M.D., Giulianetti, D.J., Dugan, D.C. (2000). The history of the XV-15 tilt rotor research aircraft: from concept to flight. Washington, D.C: National Aeronautics and Space Administration, 222 p.
3. Nabiyeu, R.N.O., Abdullayev, A.A.O. (2021). About convertiplane type unmanned aerial vehicles: current situation and perspectives. *Natural and Technical Sciences*, no. 3 (154), pp. 146–162. DOI: 10.25633/ETN.2021.03.13 (in Russian)
4. Seyed, A.B., Farzad, J., Hamed, M.K. (2021). Flight mechanics and control of tilt rotor/tilt wing unmanned aerial vehicles: A review. *AUT Journal of Modeling and Simulation*, no. 1, pp. 49–66. DOI: 10.22060/miscj.2021.-19117.5231
5. Perez, D.G., Diaz, P.V., Sanguinetti, A., Yoon, S. (2024). Tiltwing transition flight analysis using high-fidelity CFD. In: *Conference: The Vertical Flight Society's 80th Annual Forum & Technology Display*, 27 p. (accessed: 12.10.2025).
6. Huan, L., Xiaojun, W., Hongyin, J., Guiyu, Z., Pengcheng, C., Bin, L. (2021). Calculation and analysis of interaction flowfield over tiltrotor aircraft in conversion mode. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, no 1081, ID: 012046, 20 p. DOI: 10.1088/1757-899X/1081/1/012046 (accessed: 12.10.2025).
7. Campbell, J.P. (1962). Vertical takeoff and landing aircraft. 1st ed. N.Y.: Macmillan, 202 p.
8. Sobiesiak, L.A., Fortier-Topping, H., Beaudette, D. et al. (2019). Modelling and control of transition flight of an eVTOL tandem tiltwing aircraft. In: *8th European Conference for Aeronautics and Aerospace Sciences (EUCASS)*, 14 p. DOI: 10.13009/EUCASS2019-137 (accessed: 12.10.2025).
9. Rohr, D., Studiger, M., Stastny, T., Lawrance, N.R.J., Siegwart, R. (2021). Non-linear model predictive velocity control of a VTOL tiltwing UAV. *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6, no. 3, pp. 5776–5783. DOI: 10.1109/LRA.2021.3084888
10. Apollonov, D.V., Bibikova, K.I., Shibaev, V.M., Gavrilova, A.V. (2021). Choosing the architecture of the automatic control system of a convertible unmanned aerial vehicle a tiltrotor. *Trudy MAI*, no. 121. DOI: 10.34759/trd-2021-121-25 (accessed: 12.10.2025). (in Russian)
11. Lu, K., Chunsheng, L., Li, C., Chen, R. (2019). Flight dynamics modeling and dynamic stability analysis of tilt-rotor aircraft. *International Journal of Aerospace Engineering*, ID: 5737212, 15 p. DOI: 10.1155/2019/5737212 (accessed: 12.10.2025).
12. Apollonov, D.V., Bibikova, K.I., Shibaev, V.M., Efimova, I.E. (2022). Creation of algorithms for the automatic control system of the convertible unmanned aerial vehicle. *Trudy MAI*, no. 122. DOI: 10.34759/trd-2022-122-23 (accessed: 12.10.2025). (in Russian)
13. Chernomorsky, A.I., Kuris, E.D., Lelkov, K.S., Petrukhin, V.A., Krugov, A.A. (2021). The structure and thrust control laws of a four-rotor tiltrotor in the transient mode of its flight. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki*, no. 10, pp. 37–44. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-10-37-44 (in Russian)
14. 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)
15. Myasnikov, M.I., Il'in, I.R. (2023). Flight dynamics model of convertible rotary-winged aircraft with automatic control system. *Aerospace MAI Journal*, vol. 30, no. 3, pp. 187–200. (in Russian)
16. Johnson, W., Silva, C. (2018). Observations from exploration of VTOL urban air mobility designs. In: *Presented at the 7th*

Asian/Australian Rotorcraft Forum, Jeju Island, Korea October 30-November 1, 15 p. Available at: https://rotorcraft.arc.nasa.gov/Publications/files/Johnson_Silva_ARF2018.pdf (accessed: 12.10.2025).

17. **Droandi, G., Zanotti, A., Gibertini, G.** (2015). Aerodynamic interaction between rotor and tilting wing in hovering flight condition. *Journal of the American Helicopter Society*, vol. 60, no. 4, 20 p. DOI: 10.4050/JAHS.60.042011 (accessed: 12.10.2025).

Сведения об авторах

Батраков Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры аэрогидродинамики Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева – КАИ, batrakov_a.c@mail.ru.

Гарипова Ляйсан Ильдусовна, кандидат технических наук, доцент кафедры аэрогидродинамики Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева – КАИ, lyaysan_garipova@mail.ru.

Каучакова Марина Андреевна, студент Казанского национального исследовательского технического университета имени А.Н. Туполева – КАИ, alehan.orlov.45@mail.ru.

Information about the authors

Andrei S. Batrakov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Aerohydrodynamics Chair, Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev, batrakov_a.c@mail.ru.

Lyaysan I. Garipova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the of Aerohydrodynamics Chair, Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev, lyaysan_garipova@mail.ru.

Marina A. Kauchakova, Student, Kazan State Technical University named after A.N. Tupolev, alehan.orlov.45@mail.ru.

Поступила в редакцию 19.12.2025
Одобрена после рецензирования 09.02.2026
Принята в печать 23.07.2026

Received 19.12.2025
Approved after reviewing 09.02.2026
Accepted for publication 23.07.2026

УДК 623.746
DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-118-133

Научно-методический подход к формированию рационального парка беспилотных летательных аппаратов, предназначенных для решения заданного перечня задач

А.Е. Парненко^{1,2}, А.В. Сизов¹

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

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

Аннотация: В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БЛА) стремительно приобретают популярность и широко применяются в различных сферах, включая военную, гражданскую и научно-исследовательскую области. Особое внимание уделяется развитию систем и средств комплексов с БЛА, так как это является одной из ключевых составляющих для эффективного использования и интеграции БЛА в сферы воздушного транспорта при решении обширного круга задач. Важной тенденцией развития беспилотных летательных аппаратов вертолетного типа (БЛА ВТ) является подход к формированию их рационального парка. Актуальность данного подхода определяется необходимостью разработки методологии формирования парка БЛА ВТ для совместного применения с пилотируемыми вертолетами и разнородными робототехническими системами в интересах решения большого круга задач. Под парком понимается совокупность одноцелевых и многоцелевых БЛА ВТ, предназначенных для решения заданного перечня и объема задач. Методология формирования парка БЛА ВТ включает в себя постановку задачи; формализацию ее описания; определение области допустимых решений, а также разработку частных методик. Реализация частных методик сводится к сокращению исходного множества решений; формированию специальных методов и приемов комплектации парка из одноцелевых и многоцелевых БЛА ВТ; оценки сформированных парков, обеспечивающих заданный уровень эффективности решения задач при условии минимизации стоимости. Для оценки эффективности решения задач БЛА ВТ применяется метод многокритериальной оптимизации обликов каждого типа одноцелевых и многоцелевых БЛА ВТ. При определении стоимости БЛА ВТ использован метод суммирования стоимости единичного одноцелевого БЛА ВТ и дополнительной стоимости оборудования многоцелевого БЛА ВТ. С учетом большой размерности решения задач, для оценки вариантов парков разработан программно-аппаратный комплекс автоматизированного расчета вариантов парка БЛА ВТ.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат вертолетного типа, парк, одноцелевые, многоцелевые, эффективность, стоимость, облик.

Для цитирования: Парненко А.Е., Сизов А.В. Научно-методический подход к формированию рационального парка беспилотных летательных аппаратов, предназначенных для решения заданного перечня задач // Научный вестник МГТУ ГА. 2026. Т. 29, № 4. С. 118–133. DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-118-133

Scientific-methodological approach to forming a rational fleet of unmanned aerial vehicles intended to solve a specified list of tasks

A.E. Parnenkov^{1,2}, A.V. Sizov¹

¹National Helicopter Center Mil & Kamov, Tomilino, Russia

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

Abstract: Unmanned aerial vehicles (UAVs) are rapidly gaining popularity and are widely used across various fields, including military, civilian, and research domains. Special attention is paid to the development of systems and means for UAV complexes,

since these are key components for the effective use and integration of UAVs into air transport sectors when solving a wide range of tasks. An important trend in the development of helicopter-type unmanned aerial vehicles (helicopter-type UAVs) is the approach to forming their rational fleet. The relevance of this approach is determined by the need to develop a methodology for forming a fleet of helicopter-type UAVs for joint use with manned helicopters and heterogeneous robotic systems in order to solve a large number of tasks. A fleet is understood as the aggregate of single-purpose and multi-purpose helicopter-type UAVs intended to solve a specified list and volume of tasks. The methodology for forming a fleet of helicopter-type UAVs includes: problem statement; formalization of its description; determination of an area of acceptable solutions; and the development of particular methods. The implementation of particular methods involves: reducing the initial set of solutions; developing special methods and techniques for composing a fleet from single-purpose and multi-purpose helicopter-type UAVs; and evaluating the formed fleets to ensure a given level of task-solving effectiveness while minimizing cost. To assess the effectiveness of tasks execution by helicopter-type UAVs, a multicriteria optimization method is applied to the configurations of each type of single-purpose and multi-purpose helicopter-type UAV. When determining the cost of helicopter-type UAVs, the method of summing the cost of a single-unit single-purpose helicopter-type UAV and the additional cost of equipment for a multi-purpose helicopter-type UAV is used. Taking into account the large dimensionality of the problem, a hardware-software complex for automated calculation of helicopter-type UAV fleet variants has been developed to evaluate fleet options.

Keywords: helicopter-type unmanned aerial vehicle, fleet, single-purpose, multi-purpose, efficiency, cost, concept.

For citation: Parnenkov, A.E., Sizov, A.V. (2026). Scientific-methodological approach to forming a rational fleet of unmanned aerial vehicles intended to solve a specified list of tasks. Civil Aviation High Technologies, vol. 29, no. 4, pp. 118–133. DOI: 10.26467/2079-0619-2026-29-4-118-133

Введение

Ведущие эксперты в области военной науки и техники в настоящее время представляют многочисленные оценки применения беспилотных летательных аппаратов от небольших адаптированных коммерческих моделей до более сложных систем военного назначения. Основными задачами этих аппаратов являются разведка, целеуказание, корректировка огня, радиоэлектронная борьба и огневое поражение целей как в интересах сухопутных войск, так и военно-морских сил [1–3].

С точки зрения разведки беспилотные летательные аппараты (БЛА) играют ключевую роль в предоставлении разведывательных данных о передвижениях и позициях войск противника в режиме реального времени. Это позволяет планировать и проводить операции с большой эффективностью. БЛА используются также для прямых атак, в том числе в виде барражирующих боеприпасов. Эта тактика оказалась особенно эффективной при решении задач поражения танков, бронемашин, артиллерийских и ракетных систем, укрепленных пунктов и других важных целей.

Опыт ведения современных боевых действий внимательно изучают западные военные аналитики и делают определенные выводы [2, 3]. Они полагают, что роль вертолетов

в будущих военных конфликтах изменится в соответствии с новым подходом, направленным в первую очередь на совместное и согласованное применение как пилотируемой, так и беспилотной авиационной техники, а также других роботизированных систем в едином контуре управления.

Одним из важных направлений при создании смешанных группировок пилотируемых вертолетов и БЛА является разработка методик формирования состава группировок (парка) БЛА различного назначения для совместного применения с пилотируемыми вертолетами [4–6].

Методические основы формирования рационального парка

Методические основы и программные средства формирования рационального вертолетного парка, решающего заданный перечень задач, рассматривались ранее в ряде работ [7–9], относительно же беспилотных летательных аппаратов вертолетного типа (БЛА ВТ) данные направления в настоящее время только начинают свое развитие.

Учитывая большую размерность решаемой задачи и сложную иерархическую взаи-

мосвязь составляющих ее элементов, целесообразно представить вербальную постановку и провести декомпозицию исходной задачи на ряд этапов.

Вербальная постановка задачи выражается в следующем виде.

Заданы:

- описание ситуационной обстановки и перечень задач, для выполнения которых предназначается парк БЛА ВТ на заданном временном интервале $[t_0, t_k]$;
- ассигнования на создание парка разнотипных БЛА ВТ и требования к эффективности задач, которые должны быть выполнены парком БЛА ВТ.

Требуется: определить рациональную совокупность разнотипных БЛА ВТ, входящих в состав парка, отвечающую наибольшей эффективности при заданных затратах либо заданной эффективности при минимальных затратах на ее создание, а также определить требования к характеристикам БЛА ВТ, входящих в ее состав.

Общая схема декомпозиции исходной задачи на этапы 1–5 представлена на рис. 1, где обозначено следующее.

Этап 1

Заданы:

- перечень задач, для решения которых предназначен парк БЛА ВТ;
- условия и описание функционирования БЛА ВТ при решении задач [10].

Требуется: сформировать требования к БЛА ВТ при решении задач.

Этап 2

Заданы:

- число задач (m) и их краткое обозначение;
- запрещенные сочетания множеств одноцелевых (ОЦ) и многоцелевых (МЦ) БЛА ВТ.

Требуется: сформировать множество ОЦ и МЦ БЛА ВТ с учетом их разрешенных сочетаний исходя из требований и условий выполнения задач.

Этап 3

Заданы:

- множество ОЦ и МЦ БЛА ВТ;
- множества исходных данных для формирования обликов БЛА ВТ.

Требуется:

- определить основные параметры и характеристики (облики) БЛА ВТ [11–13];
- значения показателей эффективности решения каждой i -й задачи j -м ОЦ и МЦ БЛА ВТ ($U_{ij}^{MЦ}$);
- стоимость каждого отдельного ОЦ и МЦ БЛА ВТ.

Этап 4

Заданы:

- эффективность ОЦ и МЦ БЛА ВТ при решении задач.

Требуется: определить m зависимостей (по числу задач) вида $\bar{U}_i = \bar{U}_i(N_{\text{БЛА ВТ}})$, отражающих изменение эффективности решения задачи в зависимости от количества ОЦ и МЦ БЛА ВТ.

Этап 5

Заданы:

- матрица ОЦ и МЦ БЛА ВТ, из которых формируются варианты парка;
- зависимости вида $\bar{U}_i = \bar{U}_i(N_{\text{БЛА ВТ}})$ для каждой из задач;
- ожидаемые расходы на создание каждого типа БЛА ВТ;
- уровень располагаемых ассигнований.

Требуется: определить рациональный состав парка разнотипных БЛА ВТ с соответствующими тактико-техническими характеристиками, отвечающего требованию максимальной эффективности при заданных ассигнованиях.

В качестве основного критерия определено максимально возможное достижение эффективности решения совокупности задач парком БЛА ВТ в течение программного периода при заданных располагаемых ассигнованиях.

$$J = \max \int_{t_0}^{t_k} (\sum_{i=1}^m q_i U_i) dt, \\ \text{при } C_{\Sigma} \leq C_{\Sigma}^{\text{расп}}$$

где q_i – коэффициент важности задач;

U_i – эффективность i -й задачи;

$C_{\Sigma}^{\text{расп}}$ – располагаемые ресурсы.

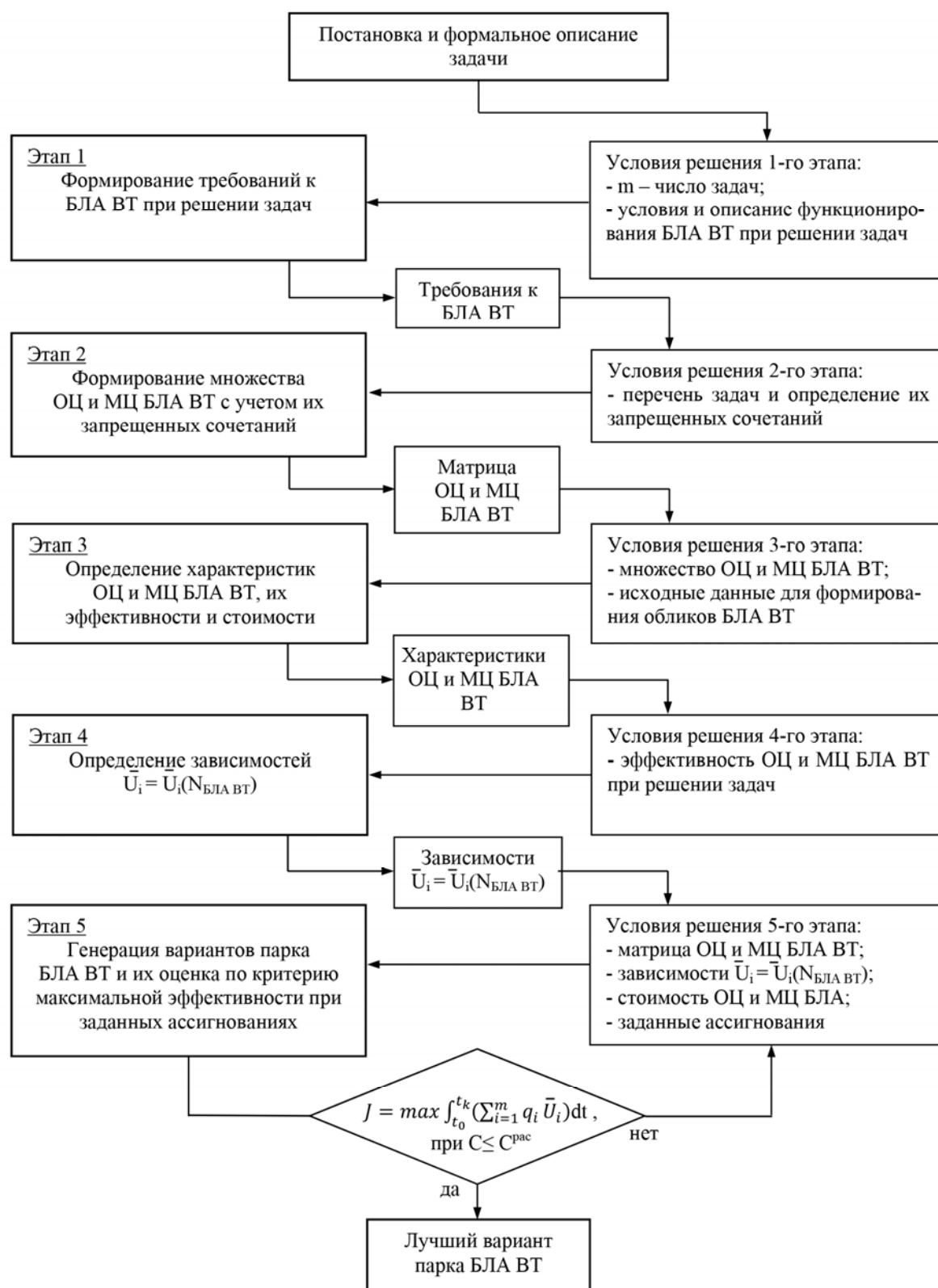


Рис. 1. Схема декомпозиции исходной задачи
Fig. 1. The decomposition scheme of the original problem

Согласно Положению о создании авиационной техники военного назначения и авиационной техники специального назначения боевая эффективность образца авиационной техники определяется как степень приспособленности к выполнению боевых и специальных задач в соответствии с его предназначением. Критерий эффективности – это правило принятия решения. Он формируется на основе показателя эффективности для каждой i -й задачи U_i . Например, для задачи поражения наземных целей критерий эффективности – математическое ожидание пораженных целей противника, для задачи разведки и целеуказания на заданном секторе – доля осмотренной площади от заданной за операцию. При этом для автоматизированного решения задачи используются относительные показатели эффективности $\bar{U}_i = \frac{U_i}{U^{\text{пр}}}$ – относительный уровень решения i -й задачи от требуемого (заданного).

Представление общей задачи в виде ряда объединенных логическими связями этапов позволяет:

- провести структурный анализ задачи в целом;
- определить последовательность выполнения этапов (в работе она соответствует их нумерации), их содержание и направления потоков данных;
- определить меру участия в работе специалистов смежных профилей (оборудование, экономика и т. д.);
- выделить основные направления работ и необходимый научно-технический задел.

В общем случае БЛА ВТ могут быть классифицированы по конструктивно-аэродинамической схеме (типам), по назначению и основным параметрам и характеристикам.

Область возможных решений при формировании парка БЛА ВТ определяют:

- 1) $M = \overline{1, m}$ – число задач, для выполнения которых предназначается парк БЛА ВТ;
- 2) $S = \overline{1, s}$ – число типов БЛА ВТ (одновинтовые, соосные, многороторные);

3) $(X, L, B)_s$ – множества параметров и характеристик, определяющих облик БЛА ВТ:

X – оптимизируемые параметры;

L – параметры и характеристики БЛА ВТ, его подсистем, численные значения которых принимаются постоянными;

B – данные, характеризующие условия применения и базирования;

4) Z – количество возможных назначений ОЦ и МЦ БЛА ВТ в составе парка (типаж БЛА ВТ в составе парка);

5) N – число вариантов комплектаций парка БЛА ВТ, состоящего из ОЦ и МЦ БЛА ВТ.

Граничными точками теоретического множества возможных вариантов комплектации парка БЛА ВТ по назначению являются:

– парк, состоящий из M разнотипных ОЦ БЛА ВТ, каждый из которых решает отдельную задачу из множества $M = \overline{1, m}$ (рис. 2);

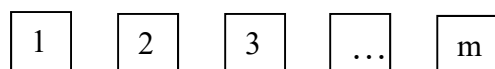


Рис. 2. Парк разнотипных ОЦ БЛА ВТ
Fig. 2. Fleet of various single-purpose helicopter-type UAVs

– парк, состоящий из однотипных МЦ БЛА ВТ, каждый из которых решает весь перечень задач $\overline{1, m}$ (рис. 3).

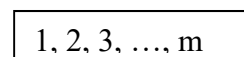


Рис. 3. Парк однотипных МЦ БЛА ВТ
Fig. 3. Fleet of similar multi-purpose helicopter-type UAVs

Промежуточными вариантами множества комплектации парка БЛА ВТ по назначению могут быть парки, состоящие из ОЦ и МЦ БЛА ВТ в различных сочетаниях (рис. 4).

Количество сочетаний $Z = \mu_m^n$ по каждому из значений $n = 1, 2, \dots, m$ (количество задач, решаемых одним БЛА ВТ) определяется из выражения для определения числа сочетаний из m по n

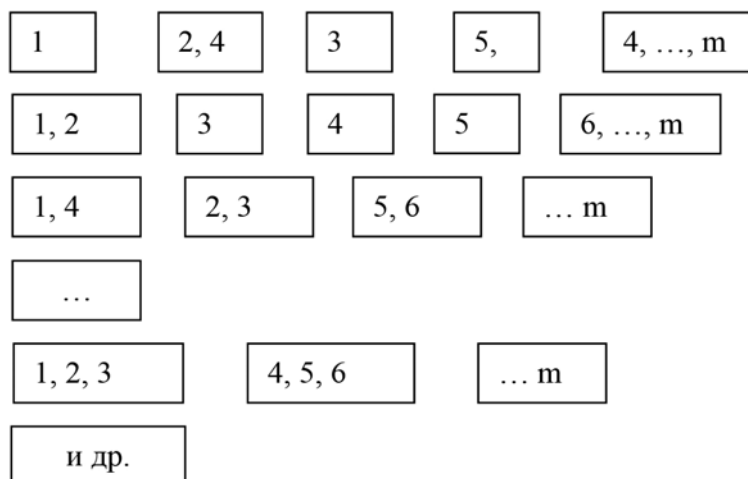


Рис. 4. Комплектация парка из ОЦ и МЦ БЛА ВТ
Fig. 4. Complete set of a fleet of single-purpose and multi-purpose helicopter-type UAVs



Рис. 5. Комплектация парка из 6 одноцелевых БЛА ВТ
Fig. 5. Complete set of a fleet of 6 single-purpose helicopter-type UAVs

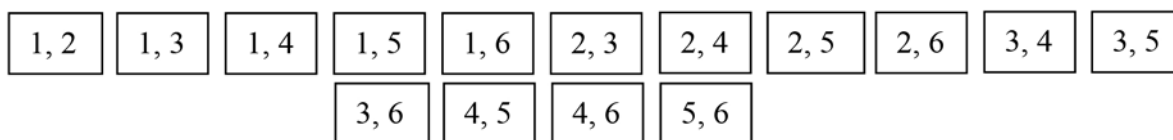


Рис. 6. Комплектация парка из 15 двухцелевых БЛА ВТ
Fig. 6. Complete set of a fleet of 15 dual-purpose helicopter-type UAVs

$$\mu_m^n = \frac{m!}{n!(m-n)!}, n = \overline{1, m}.$$

Для примера ниже приведено полное разбиение множества из $m = 6$ (для шести назначений БЛА ВТ).

При $n = 1$ в состав парка будут входить шесть одноцелевых БЛА ВТ, предназначенных для решения следующих задач (рис. 5):

- 1 – разведка и целеуказание (РЦ);
- 2 – поражение наземных целей (ПНЦ);
- 3 – радиоэлектронная борьба (РЭБ);
- 4 – поисково-спасательное обеспечение (ПСО);

- 5 – ретрансляция сигналов (РС);
- 6 – транспортировка грузов (ТГ).

$$\mu_m^n = \frac{6!}{1!(6-1)!} = \frac{720}{120} = 6.$$

При $n = 2$ в состав парка будут входить 15 двухцелевых БЛА ВТ, предназначенных для решения следующих задач (рис. 6):

$$\mu_m^n = \frac{6!}{2!(6-2)!} = \frac{720}{48} = 15.$$

При $n = 3$ в состав парка будут входить 20 трехцелевых БЛА ВТ, предназначенных для решения следующих задач (рис. 7):

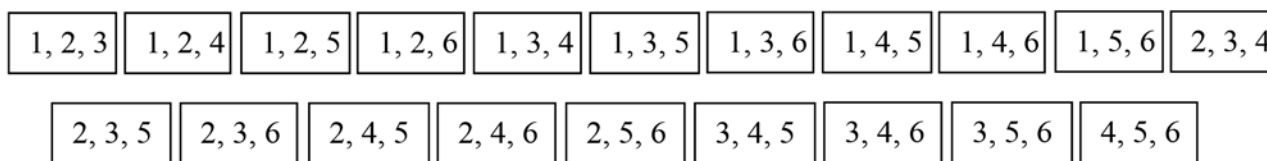


Рис. 7. Комплектация парка из 20 трехцелевых БЛА ВТ
Fig. 7. Complete set of a fleet of 20 three-purpose helicopter-type UAVs

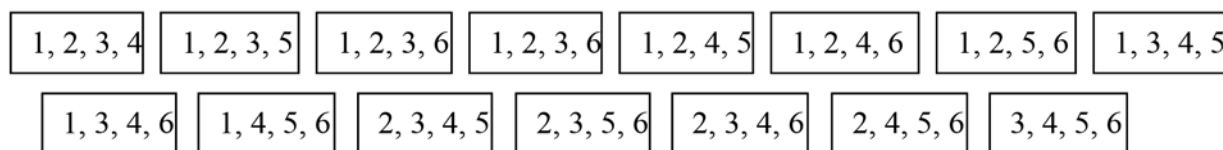


Рис. 8. Комплектация парка из 15 четырехцелевых БЛА ВТ
Fig. 8. Complete set of a fleet of 15 four-purpose helicopter-type UAVs



Рис. 9. Комплектация парка из шести пятицелевых БЛА ВТ
Fig. 9. The complete set of a fleet of 6 five-purpose helicopter-type UAVs

$$\mu_m^n = \frac{6!}{3!(6-3)!} = \frac{720}{36} = 20.$$

При $n = 4$ в состав парка будет входить 15 четырехцелевых БЛА ВТ, предназначенных для решения следующих задач (рис. 8):

$$\mu_m^n = \frac{6!}{4!(6-4)!} = \frac{720}{48} = 15.$$

При $n = 5$ в состав парка будет входить шесть пятицелевых БЛА ВТ, предназначенных для решения следующих задач (рис. 9):

$$\mu_m^n = \frac{6!}{5!(6-5)!} = \frac{720}{120} = 6.$$

При $n = 6$ в состав парка будет входить один шестицелевой БЛА ВТ, предназначенный для решения следующих задач (рис. 10):

$$\mu_m^n = \frac{6!}{6!(6-6)!} = \frac{720}{720} = 1.$$

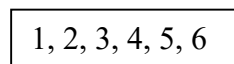


Рис. 10. Комплектация парка из одного шестицелевого БЛА ВТ
Fig. 10. The complete set of a fleet of 1 six-purpose helicopter-type UAVs

Таким образом, при $m = 6$ в состав парка может быть теоретически включено $Z = 6 + 15 + 20 + 15 + 6 + 1 = 63$ типа одноцелевых и многоцелевых БЛА ВТ, формирующих различные варианты комплектации парка.

Из этих элементов, как из деталей конструктора, можно набирать самые разные сочетания многоцелевых БЛА ВТ при соблюдении условия, что каждый вариант комплектации парка должен решать весь заданный перечень задач.

Для случая неповторения одного и того же целевого назначения в нескольких БЛА ВТ, входящих в состав парка, количество вариантов парков можно определить как

Таблица 1
Table 1

Зависимость числа вариантов парков от числа задач
The dependence of the number of fleet options on the number of tasks

Число задач, m	Число вариантов парков
2	2
4	15
6	203
8	4 140
10	115 975

Таблица 2
Table 2

Зависимость числа вариантов парков от числа задач с повторением
The dependence of the number of fleet options on the number of tasks with repetition

Число задач, m	Число вариантов парков
2	4
4	299
6	16 454
8	347 216
10	$> 5 \cdot 10^6$

число всех возможных разбиений m – элементного множества на непересекающиеся подмножества, обозначаемое B_m (числа Белла) [14].

$$B(m+1) = \sum_{n=0}^m (C(m,n) * B(n)),$$

где $B(0) = 1$;

$C(m,n)$ – биномиальный коэффициент, который представляет собой количество способов выбрать n элементов из m .

Алгоритмически процедура формирования вариантов парков сводится к комбинаторной задаче определения всех возможных разбиений множества $\{1, 2, \dots, m\}$, количество которых выражается числами Белла (B_m) для любого заданного m (табл. 1).

Еще один способ определения числа всех возможных разбиений m – вычисление через числа Стирлинга второго рода [15].

$$B(m) = \sum_{n=0}^m (S(m,n)),$$

где $S(m,n)$ – общее количество разбиений из m элементов на n множеств.

Необходимо отметить, что число возможных разбиений (вариантов парков) с увеличением числа задач m растет экспоненциально.

В случае повторения целевого назначения в различных БЛА ВТ (наиболее общий случай) число возможных вариантов комплектаций парка возрастает лавинообразно (табл. 2).

Анализ области возможных решений позволил сделать предварительную оценку размерности задачи. Сравнительная оценка таких количеств вариантов комплектации парков разнотипных БЛА ВТ требует многих часов машинного времени. В таких условиях применение методов прямого перебора без использования специальных мер сокращения области возможных решений может привести к серьезным вычислительным трудностям.

С учетом изложенного в процессе исследования были разработаны меры, позволяющие

	1	2	3	4	5	6	...
1		12	13	14	15	16	.
2			23	24	25	26	.
3				34	35	36	.
4					45	46	.
5						56	.
6							.

 – запрещенные сочетания  – разрешенные сочетания

Рис. 11. Матрица запрещенных и разрешенных сочетаний задач
Fig. 11. Matrix of prohibited and permitted task combinations

щие свести задачу к разряду практически решаемых. К ним относятся:

- ограничение числа задач, решаемых одним БЛА ВТ, исходя из реальных условий применения и возможности размещения на борту специального оборудования ($m' < 2-3$ не больше двух-, трехцелевых);

- исключение из исходного множества многоцелевых БЛА ВТ тех из них, которые не могут быть реализованы из практических или технических соображений (определение запрещенных и разрешенных сочетаний задач);

- исключение из рассмотрения БЛА ВТ, эффективность которых хотя бы по одной задаче окажется меньше заданного минимального уровня $U_{i\min}^{\text{зад}}, i = 1, m$;

- применение специальных (взамен объемных стандартных) алгоритмов для решения сложных комбинаторных задач.

Для определения запрещенных и разрешенных сочетаний задач формируется матрица сочетаний. Так, для бинарных сочетаний фрагмент этой матрицы представлен на рис. 11.

Следующее сокращение, теперь уже сортированного множества БЛА ВТ, проводится исходя из минимально допустимого уровня эффективности решения различных задач $\bar{U}_{i\min}$ одним БЛА ВТ. Здесь под $\bar{U}_{i\min}$ понимается тот расчетный относительный уровень решения возложенных на БЛА задач, кото-

рый имеет смысл учитывать в дальнейших исследованиях вариантов парков.

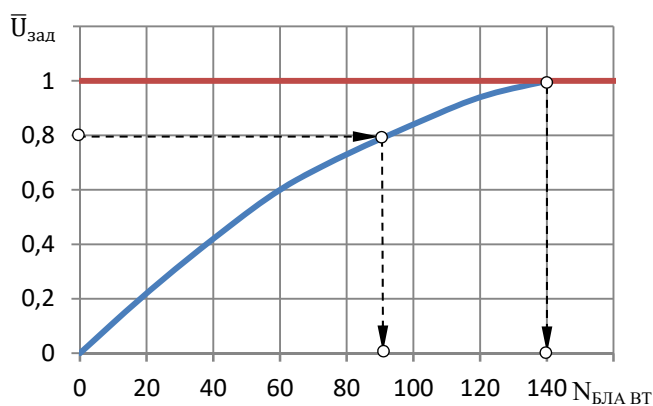
Минимальный уровень решения задач, как правило, определяется экспертным путем для каждой задачи и считается известным. Выраженный в относительной форме, он обычно заключается в диапазоне (0,2–0,3) от максимального уровня эффективности оптимального одноцелевого БЛА ($U_{i\max}^{\text{ОЦ}}$). Тогда все многоцелевые БЛА ВТ, для которых справедливо условие $U_{ij}^{\text{МЦ}} \leq 0,2 U_{i\max}^{\text{ОЦ}}$ хотя бы для одной из задач, считаются практически нереализуемыми и из дальнейшего рассмотрения исключаются.

Определение потребного количества БЛА ВТ

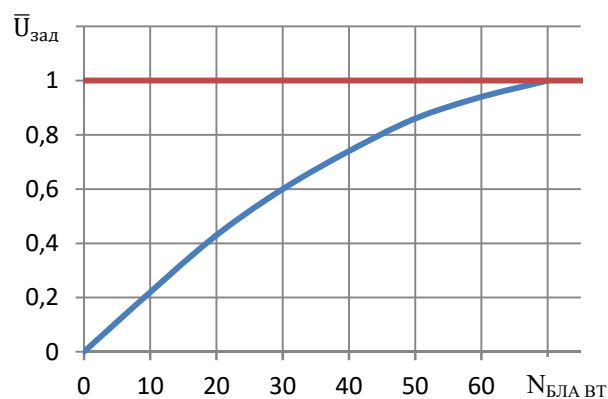
Следующей важной задачей при формировании парка БЛА ВТ является определение их потребного количества, необходимого и достаточного для эффективного решения заданного объема задач.

Для этого используются зависимости объема выполняемых задач от количества БЛА ВТ, решающих эту задачу.

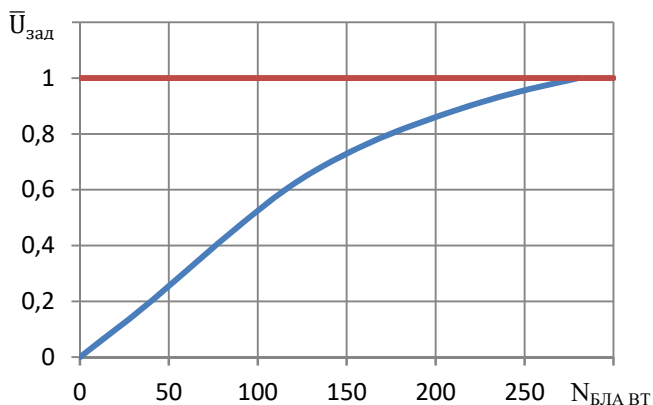
На графиках (рис. 12) представлены зависимости объема выполняемых задач $\bar{U}_{\text{зад}}$ от количества одноцелевых БЛА ВТ $N_{\text{БЛА ВТ}}$ по рассматриваемым задачам $m = 6$.



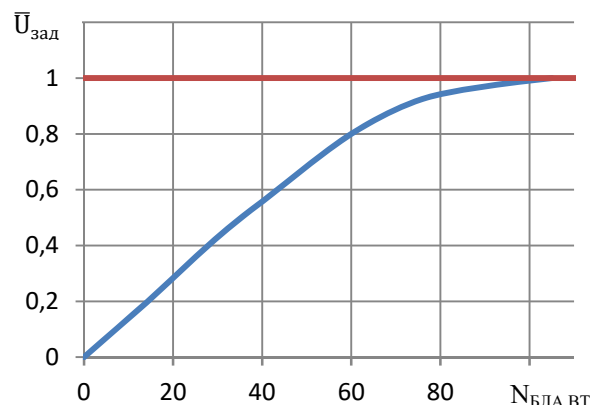
1. Разведка и целеуказание



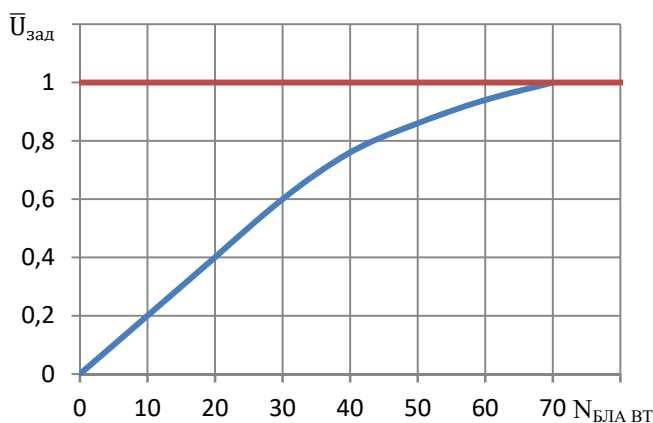
4. Поисково-спасательное обеспечение



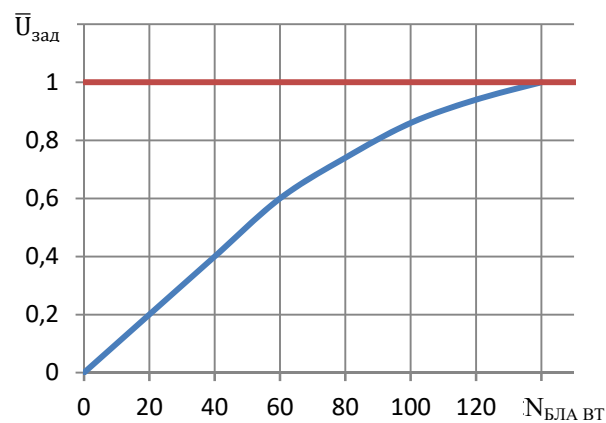
2. Поражение наземных целей



5. Ретрансляция сигналов



3. Радиоэлектронная борьба



6. Транспортировка грузов

Рис. 12. Зависимость объема выполняемых задач от количества одноцелевых БЛА ВТ

Fig. 12. The dependence of the volume of tasks performed on the number of single-purpose helicopter-type UAVs

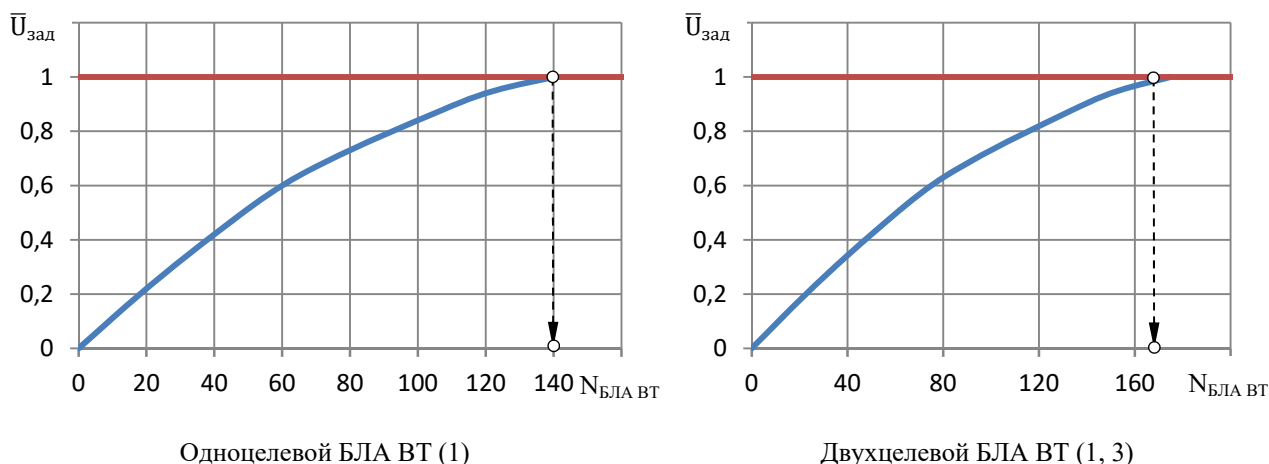


Рис. 13. Зависимость объема выполняемой задачи от количества одноцелевых и двухцелевых БЛА ВТ
Fig. 13. Dependence of the volume of the task performed on the number of single-purpose and dual-purpose helicopter-type UAVs

Необходимо отметить, что эффективность многоцелевых БЛА ВТ и их требуемое количество для выполнения заданного объема задач будет отличаться от значений одноцелевых БЛА ВТ и зависит также от принятой схемы компромисса при решении многокритериальной задачи определения оптимального многоцелевого БЛА ВТ. Пример сравнения зависимости объема выполняемых задач от количества одноцелевых и двухцелевых БЛА ВТ представлен на рис. 13.

Для оценки каждого альтернативного варианта парка необходимо знать степень «полезности» всех составляющих его элементов. Для получения таких показателей используются характеристики «стоимость – эффективность», рассчитанные для каждого элемента парка (типа БЛА ВТ). Эти характеристики используются в виде зависимостей (рис. 14)

$$C_{\Sigma}^{\text{гр мц БЛА}} = C_{\Sigma}^{\text{гр мц БЛА}}(\bar{U}_i^{\text{зад}}, N_{\text{ЛА } i}), i = \overline{1, m}.$$

Конкретизируя понятие «стоимость элемента парка» (группы БЛА ВТ в составе парка), необходимо отметить, что оно включает в себя стоимость самого БЛА ВТ, их количество и затраты на выполнение задачи (восстановление вероятных потерь, снабжение, обслуживание и т. д.):

$$C_{\Sigma}^{\text{гр мц БЛА}} = C_{\text{ЛА } ij}^1 * N_{\text{ЛА } ij} + \Delta C_{\text{доп } ij},$$

где $N_{\text{ЛА } ij}$ – количество БЛА ВТ, решающих i -ю задачу в j -й группе;

$C_{\text{ЛА } ij}^1$ – стоимость одного БЛА ВТ [16];

$\Delta C_{\text{доп } ij}$ – затраты на выполнение задачи.

Для оценки альтернативных вариантов комплектации парков БЛА ВТ для любого заданного уровня решения задач $\bar{U}_i^{\text{зад}}$ формируется база данных, представленная в виде матриц типов БЛА ВТ, стоимости отдельных БЛА ВТ, их необходимого количества и стоимости групп БЛА ВТ каждого типа $N_{\text{ЛА } ij}^{\text{гр}} = N_{\text{ЛА } ij}^{\text{гр}}(\bar{U}_i^{\text{зад}})$, $C_{ij}^{\text{гр}} = C_{ij}^{\text{гр}}(N_{\text{ЛА}})$ (табл. 3).

На этапе исследования альтернативных вариантов парков разнотипных БЛА ВТ производится их оценка с целью выбора наилучшего варианта (вариантов) по критерию наименьшей суммарной стоимости при заданной эффективности решения задач.

Формально процесс выбора сводится к процедуре прямого перебора всех возможных комплектаций парка, составленных из допустимого множества одноцелевых и многоцелевых БЛА ВТ.

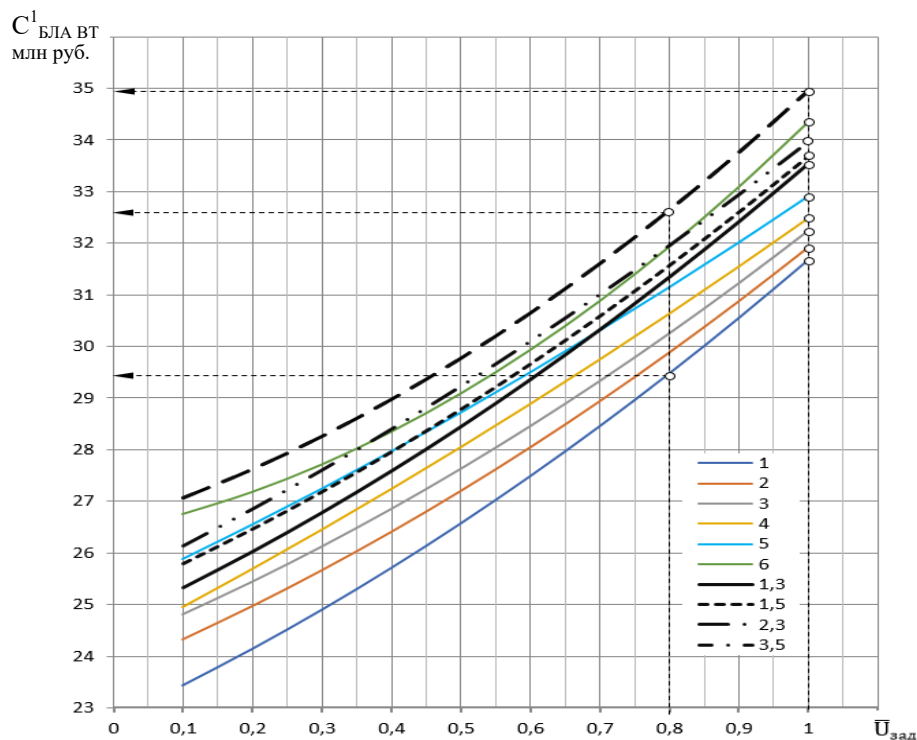


Рис. 14. Зависимость стоимости одноцелевых и многоцелевых БЛА ВТ от заданного уровня эффективности

Fig. 14. Cost dependence of single-purpose and multi-purpose helicopter-type UAVs on the specified performance level

Таблица 3
Table 3

Матрица исходных данных для оценки альтернативных вариантов комплектации парков БЛА ВТ

Initial data matrix for evaluating alternative options for complete set of helicopter-type UAVs fleets

№ п/п	Типы БЛА ВТ	Стоимость* БЛА ВТ	Количество БЛА ВТ в парке	Стоимость группы БЛА в парке
1	1	C_1	N_1	$C_1 * N_1$
2	2	C_2	N_2	$C_2 * N_2$
3	3	C_3	N_3	$C_3 * N_3$
4	4	C_4	N_4	$C_4 * N_4$
5	5	C_5	N_5	$C_5 * N_5$
6	6	C_6	N_6	$C_6 * N_6$
7	1, 3	$C_1 + \Delta C_{1,3}$	$N_{1,3}$	$(C_1 + \Delta C_{1,3}) * N_{1,3}$
8	1, 5	$C_1 + \Delta C_{1,5}$	$N_{1,5}$	$(C_1 + \Delta C_{1,5}) * N_{1,5}$
9	2, 3	$C_2 + \Delta C_{2,3}$	$N_{2,3}$	$(C_2 + \Delta C_{2,3}) * N_{2,3}$
10	3, 5	$C_3 + \Delta C_{3,5}$	$N_{3,5}$	$(C_3 + \Delta C_{3,5}) * N_{3,5}$

* Примечание:

C_1 – C_6 – стоимости одноцелевых БЛА ВТ, предназначенных для решения задач 1–6;
 $C_1 + \Delta C_{1,3}$, $C_1 + \Delta C_{1,5}$, $C_2 + \Delta C_{2,3}$, $C_3 + \Delta C_{3,5}$ – стоимости двухцелевых БЛА ВТ, которые включают в себя стоимость одноцелевого БЛА ВТ, а также стоимость дополнительного оборудования для двухцелевого БЛА ВТ.

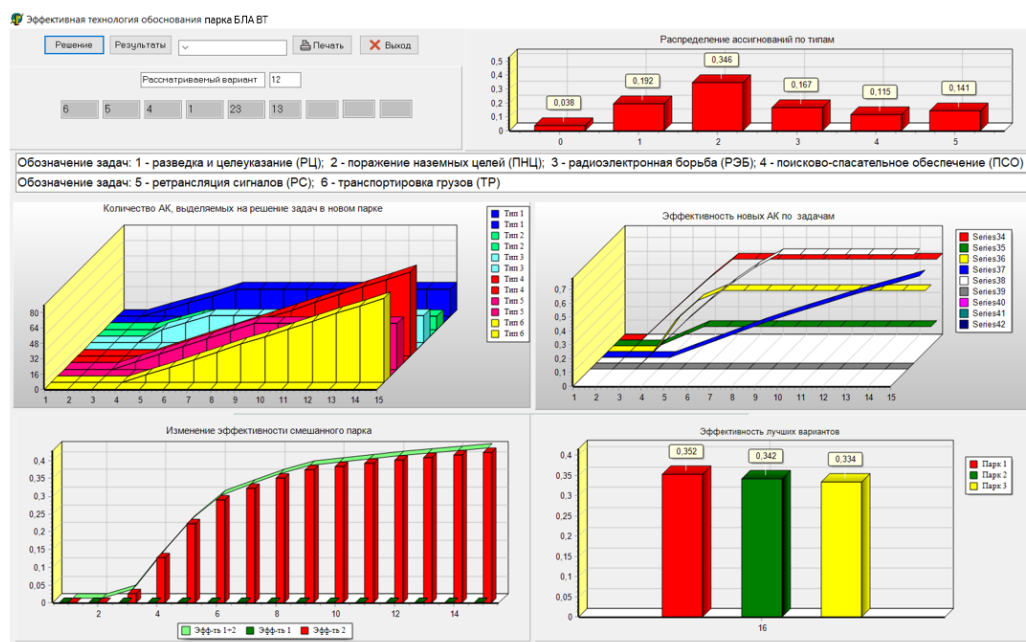


Рис. 15. Фрагмент аппаратно-программного комплекса автоматизированного формирования вариантов парков БЛА ВТ

Fig. 15. A fragment of the hardware and software complex for the automated formation of fleet options for helicopter-type UAVs

Необходимо отметить, что вся описанная выше процедура формирования парков БЛА ВТ проводится на заданный временной срез t_k либо на заданный временной интервал $[t_0, t_k]$, на котором исходные оперативно-тактические и тактико-технические условия решения задач остаются неизменными. При изменении данных условий с какого-либо момента t_n (изменение требований, совершенствование техники, наращивание или сокращение противоборствующих сил, коррекция объемов и уровней задач и т. д.) решение формируется заново на интервале $[t_n, t_k]$.

Для поддержки процессов принятия данных решений в настоящее время разрабатываются методы, модели и программные комплексы, позволяющие автоматизировать информационные технологии оперативного реагирования на изменяющиеся условия обстановки, включая этапы разработки, комплектования и применения современных сложных роботизированных систем, учитывающие в том числе новые возможности перспективных авиационных комплексов, их оборудования и вооружения.

Фрагмент аппаратно-программного комплекса автоматизированного формирования вариантов парков БЛА ВТ, предназначенных для решения заданного перечня задач, представлен на рис. 15.

Заключение

В настоящее время роль авиационных средств поддержки частей и подразделений сухопутных войск и военно-морских сил в военных конфликтах меняется в соответствии с новым подходом, направленным на совместное и согласованное применение как пилотируемой, так и беспилотной авиационной техники, а также других роботизированных систем в едином контуре управления.

Одним из важных направлений при создании группировок пилотируемых вертолетов и беспилотных летательных аппаратов является разработка методик формирования рационального состава парка летательных аппаратов различного назначения для их совместного применения в новых условиях обстановки,

в том числе с учетом опыта ведения современных конфликтов.

Комплексное решение формирования парка БЛА ВТ для их совместного применения с пилотируемыми вертолетами в составе разведывательно-ударных контуров позволяет оперативно проводить оценки по созданию смешанных подразделений ЛА различного уровня интеграции, определять потребный состав и численность ЛА, проводить оценку эффективности и стоимости решения заданного перечня задач, планировать научно-технические и производственно-экономические мероприятия реализации перспективных проектов БЛА ВТ в заданный период.

Список литературы

1. Лось А.П., Ткачев В.Р. Особенности применения беспилотных летательных аппаратов в Военно-Морском Флоте // Военная мысль. 2023. № 12. С. 29–35.
2. Полтавский А.В., Жумабаева А.С., Бикеев Р.Р. Многофункциональные комплексы беспилотных летательных аппаратов: развитие в системе вооружения // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 1 (13). С. 39–46.
3. Водзянский С.И. Многосферное сражение как результат эволюции совместных действий различных видов вооруженных сил США в XX–XXI веках // Военная мысль. 2023. № 8. С. 125–133.
4. Мухаметжанова А.О. Взаимодействие пилотируемых и беспилотных ЛА вертолетного типа // Авиационные системы. 2023. № 5. С. 53–59.
5. Бельский А.Б. Научно-методический подход к формированию смешанных группировок боевых вертолетов и БЛА для решения задач армейской авиации / А.Б. Бельский, А.А. Ефремов, А.Е. Парненков, А.В. Сизов, В.Г. Якимов // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. 2024. № 1 (131). С. 31–38. DOI: 10.53816/20753608_2024_1_31
6. Чабанов В.А. Технология взаимодействия пилотируемых и беспилотных ЛА (MUM-T) – элемент мультидоменных боевых операций Сухопутных войск США // Авиационные системы. 2022. № 3. С. 44–47.
7. Сизов А.В. Методологические основы эффективной информационной технологии обоснования системы авиационного вооружения военно-морского флота Российской Федерации: дис. ... доктор тех. наук. М.: 30 ЦНИИ МО РФ, 2001. 307 с.
8. Мышкин Л.В. Прогнозирование развития авиационной техники: теория и практика. 2-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 328 с.
9. Мышкин Л.В., Парненков А.Е., Беляев С.И. Вариационная модель прогнозирования оптимального развития комбинированной системы (парка) летательных аппаратов // Труды ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. 2006. Т. 78. С. 17–19.
10. Платунов В.С. Методология системных военно-научных исследований авиационных комплексов. М.: Дельта, 2005. 344 с.
11. Скопец Г.М. Внешнее проектирование авиационных комплексов: Методологические аспекты. М.: ЛЕНАНД, 2017. 344 с.
12. Кошкин Р.П. Беспилотные авиационные системы. М.: Стратегические приоритеты, 2016. 676 с.
13. Тищенко М.Н., Некрасов А.В., Радин А.С. Вертолеты. Выбор параметров при проектировании. М.: Машиностроение, 1976. 368 с.
14. Липский В. Комбинаторика для программистов. М.: Мир, 1998. 200 с.
15. Деза Е.И. Специальные комбинаторные числа: От чисел Стирлинга до чисел Моцкина: всё о двенадцати известных числовых множествах комбинаторной природы (история, классические свойства, примеры и задачи). М.: ЛЕНАНД, 2018. 504 с.
16. Быков В.А. Подход к формированию методики оценки стоимости жизненного цикла беспилотного воздушного судна вертолетного типа / В.А. Быков, А.А. Парненкова, А.Е. Парненков, А.В. Шариков // Радиопромышленность. 2020. Т. 30, № 4. С. 62–71. DOI: 10.21778/2413-9599-2020-30-4-62-71

References

1. **Los', A., Tkachov, V.** (2023). Peculiarities of the use of unmanned aerial vehicles in the navy. *Voennaya mysl*, no. 12, pp. 29–35. (in Russian)
2. **Poltavskiy, A.V., Zhumabayeva, A.S., Bikeev, R.R.** (2016). Multifunctional unmanned aerial vehicles complexes: development in the weapons system. *Reliability & quality of complex systems*, no. 1 (13), pp. 39–46. (in Russian)
3. **Vodzyansky, S.** (2023). Multi-domain battle as a result of the evolution of joint actions by various types of U.S. military forces in the 20th–21st centuries. *Voennaya mysl*, no. 8, pp. 125–133. (in Russian)
4. **Mukhametzhanova, A.O.** (2023). Interaction between manned and unmanned helicopter-type aircraft. *Aviatsionnyye systemy*, no. 5, pp. 53–59. (in Russian)
5. **Belsky, A.B., Efremov, A.A., Parnenkov, A.E., Sizov, A.V., Yakimov, V.G.** (2024). Scientific and methodological approach to the formation of mixed groups of combat helicopters and uavs to solve the tasks of army aviation. *Izvestiya Rossiyskoy akademii raketnykh i artileriyiskikh nauk*, no. 1 (131), pp. 31–38. DOI: 10.53816/20753608_2024_1_31 (in Russian)
6. **Chabanov, V.A.** (2022). Technology of interaction between manned and unmanned aircraft (MUM-T) as an element of multi-domain combat operations of the US Army. *Aviatsionnyye systemy*, no. 3, pp. 44–47. (in Russian)
7. **Sizov, A.V.** (2001). Methodological foundations of effective information technology for substantiating the aviation armament system of the Navy of the Russian Federation: D. Technical Sc. Thesis. Moscow: 30 TsNII MO RF, 307 p. (in Russian)
8. **Myshkin, L.V.** (2008). Forecasting the development of aviation technology: theory and practice. 2nd ed. Moscow: FIZMATLIT, 328 p. (in Russian)
9. **Myshkin, L.V., Parnenkov, A.E., Belyaev, S.I.** (2006). Variational model for predicting the optimal development of a combined system (fleet) of aircraft. *Trudy VVIA im. prof. N.Ye. Zhukovskogo*, vol. 78, pp. 17–19. (in Russian)
10. **Platunov, V.S.** (2005). Methodology of systems oriented military scientific research of aviation complexes. Moscow: Izdatelstvo “Delta”, 344 p. (in Russian)
11. **Skopets, G.M.** (2017). External design of aviation complexes: Methodological aspects. Moscow: LENAND, 344 p. (in Russian)
12. **Koshkin, R.P.** (2016). Unmanned aircraft systems. Moscow: Strategicheskkiye priority, 676 p. (in Russian)
13. **Tishchenko, M.N., Nekrasov, A.V., Radin, A.S.** (1976). Helicopters. Selection of parameters in design. Moscow: Mashinostroyeniye, 368 p. (in Russian)
14. **Lipskiy, V.** (1998). Combinatorics for programmers. Moscow: Mir, 200 p. (in Russian)
15. **Deza, E.I.** (2018). Special combinatorial numbers: From Stirling numbers to Motzkin numbers: all about twelve known numerical sets of combinatorial nature (history, classical properties, examples and problems). Moscow: LENAND, 504 p. (in Russian)
16. **Bykov, V.A., Parnenkova, A.A., Parnenkov, A.E., Sharikov, A.V.** (2020). Approach to developing the methodology for assessing the life cycle cost of unmanned aerial vehicles helicopter-type. *Radio industry*, vol. 30, no. 4, pp. 62–71. DOI: 10.21778/2413-9599-2020-30-4-62-71 (in Russian)

Сведения об авторах

Парненко Алексей Евгеньевич, кандидат технических наук, главный конструктор научно-конструкторского центра перспективного проектирования винтокрылых летательных аппаратов АО «НЦВ Миль и Камов», доцент кафедры проектирования вертолетов Московского авиационного института (национального исследовательского университета), a.parnenkov@nhcmk.ru.

Сизов Александр Владимирович, доктор технических наук, начальник НИО имитационного и функционального моделирования научно-конструкторского центра перспективного проектирования винтокрылых летательных аппаратов АО «НЦВ Миль и Камов», a.sizov@nhcmk.ru.

Information about the authors

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

Alexander V. Sizov, Doctor of Engineering Sciences, Head of the “Simulation and Functional Modeling” Research Department, Scientific and Design Center for Advanced Design of Rotary-wing Aircraft of JSC National Helicopter Center Mil and Kamov, member of Technical Committee, Helicopter Industry Association, a.sizov@nhcmk.ru.

Поступила в редакцию 06.11.2025
Одобрена после рецензирования 08.12.2025
Принята в печать 23.07.2026

Received 06.11.2025
Approved after reviewing 08.12.2025
Accepted for publication 23.07.2026

ББК 05
Н 34
Св. план 2026

Научный Вестник МГТУ ГА
Том 29, № 04, 2026
Civil Aviation High TECHNOLOGIES
Vol. 29, No. 04, 2026

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. Подписной индекс 84254.

Подписано в печать 27.08.2026.

Печать цифровая

Формат 60×90/8

12,75 усл. печ. л.

Заказ № 2097/173

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

© Московский государственный
технический университет ГА, 2026