

Том 26, № 06, 2023

ISSN 2079-0619

e-ISSN 2542-0119

Научный Вестник МГТУ ГА

Civil Aviation High TECHNOLOGIES

Vol. 26, No. 06, 2023

Издается с 1998 г.

Москва
2023

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

Главная редакция

- Главный редактор:** *Елисеев Б.П.*, заслуженный юрист РФ, проф., д. ю. н., ректор МГТУ ГА, Москва, Россия.
- Зам. главного редактора:** *Воробьев В.В.*, проф., д. т. н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия.
- Ответственные секретари главной редакции:** *Наумова Т.В.*, доцент, д. филос. н., профессор кафедры МГТУ ГА, Москва, Россия;
Полешкина И.О., доцент, к. э. н., старший научный сотрудник отдела научных исследований МГТУ ГА, Москва, Россия.

Члены главной редакции:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial Board

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

Chief Editorial Board:

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

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

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

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

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

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

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

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;

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;

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

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

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

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

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

Редакционный совет

Абрамов О.В., заслуженный деятель науки РФ, проф., д. т. н., Институт 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 президиуме РАН, Москва, Россия;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Полтавский А.В., д. т. н., с. н. с., 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 «Экспериментальная мастерская НаукаСофт», Москва, Россия;

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

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

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

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

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

Editorial Council

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

Ruslan N. Akinshin, Professor, Doctor of Sciences, 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;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Aleksey V. Samokhin, Doctor of Sciences, Leading Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Vasiliev O.V., Boyarenko E.S., Galaeva K.I. Substantiation of source data on the parametric algorithms for the classification of weather hazards	8
Грядунев К.И. Обеспечение кондиционности авиационных топлив при использовании противоводокристаллизационных жидкостей	22
Kiselev M.A., Kalyuzhny Y.S., Karpov A.V., Borodkin S.F. Methodology for plotting the flight planned route change of the aircraft in flight	33
Печенежский В.К., Чувицкая Е.К. Особенности организации планирования использования воздушного пространства в РФ на примере Московской воздушной зоны	47
Кузнецов С.В. Характеристики достоверности эксплуатационного контроля функциональных систем и комплексов бортового оборудования воздушных судов	58

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Николаев И.В., Леонтьев М.К., Попов В.В. Анализ используемых подходов расчета эвольвентных шлицевых соединений и методы учета их влияния на динамическое поведение систем.....	75
--	----

CONTENTS

TRANSPORTATION SYSTEMS

Vasiliev O.V., Boyarenko E.S., Galaeva K.I. Substantiation of source data on the parametric algorithms for the classification of weather hazards.....	8
Gryadunov K.I. Ensuring the aviation fuel quality when using anti-water crystallization fluids.....	22
Kiselev M.A., Kalyuzhny Y.S., Karpov A.V., Borodkin S.F. Methodology for plotting the flight planned route change of the aircraft in flight.....	33
Pechenezhsky V.K., Chuvikovskaya E.K. Features of the organizational concept of airspace management planning in the Russian Federation on the example of the Moscow airspace	47
Kuznetsov S.V. Characteristics of operational control reliability of aircraft functional systems and avionics suites.....	58

MECHANICAL ENGINEERING

Nikolaev I.V., Leontiev M.K., Popov V.V. Analysis of the approaches used for calculating involute splined couplings and the methods of considering their influence on the dynamic behavior of systems	75
---	----

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 551.501.81

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-8-21

Substantiation of source data on the parametric algorithms for the classification of weather hazards

O.V. Vasiliev¹, E.S. Boyarenko¹, K.I. Galaeva¹

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

The study was conducted with the financial support of the Russian Scientific Fund Grants № 23-29-00450

Abstract: The meteorological situation is one of the decisive factors determining the safety and frequency of civil aviation flights. Weather hazards (WH), associated with cumulonimbus clouds, such as a heavy shower, thunderstorm, hail, combined with high atmosphere turbulence, quite often lead to aviation events and even accidents. Currently, a domestic weather radar system of the near airfield zone (WR) “Monocle” has been developed and successfully operated. The criteria for the classification of meteorological phenomena (MP), used in the WR, have been developed individually for each phenomenon and have some heuristic character. These criteria are cumbersome and complicate the process of automating the WH classification. In this case, there is a natural desire to generalize the criteria and optimize them in accordance with the theory of distinguishing statistical hypotheses. This article discusses the application of the Bayesian approach to the WH classification. The statistical Bayesian decision theory assumes decision-making in terms of the probability theory when all significant probabilistic values, so-called sufficient statistics, are known. In order to obtain statistical descriptions of the probability distributions of reflectivity and the eddy dissipation rate (EDR), an analysis of radar signals, reflected from such MP as a rain shower, thunderstorm, hail was carried out. The article provides brief descriptions of the methods of conducting experiments to form statistical database and its analysis. Based on the above methods, the statistical parameter H(EDRmax) analysis for a rain shower, the amplitude distribution of reflectivity parameters and the EDR (Zmax, EDRmax) for thunderstorms and hail was carried out, which showed the low distinguishing ability of each individual parameter when solving the problem to classify MP within the assigned alphabet. The obvious solution is dictated by the theory of recognition. To increase the classification confidence, it is essential to share information parameters, for example, in the form of multidimensional distribution densities of the probabilities of random parameters. The article presents a parametric description of the MP “rain shower-thunderstorm-hail” classification features. An analysis to evaluate the probabilistic characteristics of the WH classification for the adopted empirical classification criteria in the WR shows that the adopted criteria are far from optimal in terms of the probabilities of the correct classification, especially in the rain shower case. It is obvious that a problem solution of the assigned classification confidence is associated with the optimization of the feature space and classification criteria. Based on the data obtained, it is necessary to build an algorithm to classify the WH “rain shower-thunderstorm-hail”.

Key words: weather radar, near-airfield zone, weather hazards, weather phenomena classification, statistical data analysis.

For citation: Vasiliev, O.V., Boyarenko, E.S., Galaeva, K.I. (2023). Substantiation of source data on the parametric algorithms for the classification of weather hazards. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 6, pp. 8–21. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-8-21

Обоснование исходных данных параметрических алгоритмов классификации опасных метеоявлений

О.В. Васильев¹, Э.С. Бояренко¹, К.И. Галаева¹

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

Статья подготовлена в рамках поддержанного грантом Российского научного фонда проекта № 23-29-00450

Аннотация: Метеорологическая обстановка является одним из решающих факторов, определяющих безопасность и регулярность полетов гражданской авиации. Опасные метеорологические явления (ОМЯ), связанные с кучево-дождевой облачностью, такие как ливень, гроза, град, в сочетании с сопровождающей их высокой турбулентностью атмосферы нередко приводят к авиационным событиям и даже авиакатастрофам воздушных судов (ВС). В настоящее время разработан и успешно эксплуатируется отечественный метеорологический радиолокационный комплекс ближней аэродромной зоны (МРЛК БАЗ) «Монокль». Критерии классификации метеоявлений, используемые в МРЛК БАЗ, разработаны для каждого явления отдельно и носят некоторый эвристический характер. Данные критерии громоздки и затрудняют процесс автоматизации классификации ОМЯ. В этом случае возникает естественное желание обобщить критерии и оптимизировать их в соответствии с теорией различения статистических гипотез. В данной статье рассматривается применение Байесовского подхода к классификации ОМЯ. Статистическая теория принятия решений, разработанная Байесом, основана на выборе решения в рамках теории вероятностей, когда известны все представляющие интерес вероятностные величины, так называемые достаточные статистики. С целью получения статистических описаний вероятностных распределений отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии был проведен анализ радиолокационных сигналов, отраженных от таких метеоявлений, как ливень, гроза, град. В статье приведены краткие описания методики проведения экспериментальных исследований для формирования базы статистических данных и ее анализа. На основании приведенных методик был проведен статистический анализ параметра $H(EDR_{max})$ для ливня, а также амплитудного распределения параметров отражаемости и удельной скорости диссипации турбулентной энергии (Z_{max} , EDR_{max}) для гроз и града, который показал невысокую различительную способность каждого отдельного параметра при решении задачи классификации метеоявлений в пределах заданного алфавита. Очевидный выход из создавшейся ситуации диктует теория распознавания. Для повышения достоверности классификации необходимо совместное использование информационных параметров, например, в виде многомерных плотностей распределения вероятностей случайных параметров. В статье приведено параметрическое описание признаков классификации метеорологических явлений «ливень – гроза – град». Анализ оценки вероятностных характеристик классификации ОМЯ для принятых эмпирических критериев классификации в МРЛК БАЗ показывает, что принятые критерии далеки от оптимальности с точки зрения вероятностей правильной классификации, особенно в случае с ливнем. Очевидно, что решение задачи заданной достоверности классификации связано с оптимизацией признакового пространства и критериев классификации. Далее, на основании полученных данных, необходимо построить алгоритм классификации опасных метеоявлений «ливень – гроза – град».

Ключевые слова: метеорологический радиолокатор, ближняя зона аэродрома, опасные метеорологические явления, классификация метеорологических явлений, статистический анализ данных.

Для цитирования: Васильев О.В., Бояренко Э.С., Галаева К.И. Обоснование исходных данных параметрических алгоритмов классификации опасных метеоявлений // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 6. С. 8–21. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-8-21

Introduction

A meteorological situation is one of the decisive factors determining safety and flight regularity of civil aviation. Weather hazards (WH) [1], more specific for the European part of Russia and associated with cumulonimbus such as a rain shower, thunderstorm, hail coupled

with high atmospheric turbulence, quite often cause aviation events and even accidents of aircraft (A/C) [2]. The phenomena are the most hazardous during takeoff-landing procedures [3].

Currently, a revolutionary domestic X-range weather radar complex of the near-airfield zone “Monocle” [4, 5] of low mass-dimension performance, which complies fully with the modern

international and domestic requirements, has been designed, tested and in-service.

The criteria of the classification of meteorological phenomena, used in the WR [6], were formulated in conformity with the regulatory documents¹ [7], in which, universally applicable parameters to define a weather event class in weather radars with various performance. Significantly, that all the legislatively adopted criteria of the weather event classification ranging from clouds to waterspout based on long-term observations, which has commanded respect, have been individually developed for each phenomenon and bear some heuristic character.

In this case, it is a natural desire to generalize the criteria and optimize them in accordance with the theory of differentiation of statistic hypotheses [8–11]. It is practical when probability distributions of information atmospheric parameters [12] are parametrically described.

In the WR “Monocle”, the WH classification is based on knowledge about the altitudinal distribution of radar reflectivity [1], atmosphere temperature (freezing level, freezing level -22°) as well as values of low and high radar echo boundary [6]. The data is cumbersome and hinders the process of automation for the WH classification.

The authors initiated to set an end to heuristics with respect to the depicted problem, and transfer to parametric methods, expand an alphabet of classes to enhance the WH classification confidence. The basic ways of criteria optimization of the CB-related WH classification have been found:

- the use of information about altitude distribution not merely of reflectivity but also of atmosphere turbulence in the WH classification criteria;
- the formation of parametric descriptions of maximum reflectivity distribution densities and turbulence by values and altitude;
- the development of WH classification algorithms (of decision-making threshold for-

mation) in compliance with the single chosen criterion to differentiate statistic hypotheses.

This paper is a logic continuation.

Bayesian approach to the classification of meteorological phenomena

The Bayesian decision theory constitutes the foundation of a statistic approach to the problem of natural phenomena, image, signal classification [8]. The problem statement of identifying MP in the case under consideration assumes the solution of the following integrated tasks:

- forming the class alphabet, i.e., a combination of classified phenomena, in our case, a rain shower-thunderstorm-hail-another phenomenon (the term “another phenomenon” is used in a rigorous problem statement, as the alphabet should form a complete group of events);
- selecting feature space, i.e., information parameters which are emitted from a reflected radar signal and allow the phenomena classification with the assigned reliability;
- defining the sufficient statistics, i.e., the probabilistic description of features and phenomena, which will be used while identifying (the substantiation of the loss matrix, availability of a priori information, density of distribution of information parameter probabilities, extent of feature correlation, etc.);
- selecting the identification criterion (Bayesian, maximum of likelihood function, Neyman-Pearson, etc.) and the confidence requirements, which determine a value of decision-making threshold.

In the general case, the given sequence of problems is iterative and assumes the correction of alphabet, features, and criteria to achieve the required validity to identify under limitations on various type-resources.

Thus, the classification problem essentially poses the partition problem of the feature space into domains for each class. The partition in terms of forming decision-making thresholds should cause the maximization of right decisions and/or the minimization of erroneous ones.

Let us denote a weather event by a symbol ω , whereby $\omega = \text{SHRA}$ for the rain shower, $\omega = \text{TS}$

¹ The Guide to make observations and apply information from not automated weather radars WR-1, WR-2, WR-5. RD 52.04.320-91. (1993). St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 342 p. (in Russian)

for the thunderstorm, $\omega = GR$ for the hail. The value ω is regarded as a random value in the sense that nature state is unknown. In our case, let us assume that a priori probabilities of events are not known as well. In order to simplify a problem without losing the quality of its solution, let us assign an obvious assumption: conditional distribution density of a factor x while observing a weather event ω_i : $p(x/\omega_i)$, where $i \in \{SHRA, TS, GR\}$ is the sufficient statistics in the case under consideration. The statistics allows us to solve based on the method of the maximum likelihood: the solution $\omega = i$ is chosen for which

$$p(x/\omega_i) > p(x/\omega_k) \text{ for all } k \neq i. \quad (1)$$

Sufficient statistics, formed without using data, which are contained in a priori distribution and the loss function, determine the structure of an optimal decision and an optimal method of data processing [13]. It is indicative of their versatility and adequacy while solving a diversity of applied information system synthesis problems within the conditions of expected uncertainty [10].

The conducted experimental analysis of radar signals showed that for the assigned class alphabet, it is feasible to search for probabilistic descriptions of the maximum reflexivity distribution density Z_{max} and EDR which reflects turbulence by values and altitude in the form of $p(Z_{max}/\omega_i)$, $p(EDR_{max}/\omega_i)$, $p(H(Z_{max})/\omega_i)$, $p(H(EDR_{max})/\omega_i)$, where $i \in \{SHRA, TS, GR\}$.

The degree of the expected uncertainty can be different. At the first stage, the authors considered the problem with the complete expected uncertainty, when neither types nor parameters of laws of information parameters probability distribution are known. It should seem that under the complete expected uncertainty, the statistic synthesis is not practical because we cannot either formulate or compute the optimality criterion. However, instead of unknown distributions, empiric data, which are referred to as learning samples, can be used.

The [10] demonstrates the problem of overcoming the complete expected uncertainty can be solved by means of three stages:

- at the first stage, the class of possible probability distributions, limited by some aggregate with arbitrary parameter values (in our case, a distribution aggregate close to Gauss one), is determined stemming from the physical existence of the problem solved;
- based on the distribution-free test of fit (of Kolmogorov, Smirnov, χ^2 Pearson, etc.), adopted in the statistic theory, hypotheses about the compliance of observation data with one of the aggregate-assigned theoretical information parameter probability distributions are being checked [14];
- at the third stage, already parametric uncertainty is eliminated using, as true values, the parameters of their optimal evaluations (in our case, sampling mathematical expectations (ME) and mean square deviations (MSD).

The materials, describing as the methodology itself to conduct a full-scale experimental investigation for the purpose of obtaining learning samples as the results of their statistical analysis to form probabilistic descriptions of information parameters in order to solve the CB-related WH classification problem, are presented below.

Statistical analysis of experimental weather hazards data “rain shower-thunderstorm-hail”

With the aim of obtaining statistic description of the probabilistic reflectivity distributions and EDR, an analysis of radar signals, reflected from such weather events as the rain shower, thunderstorm, hail, was carried out. The studies were carried out in the Upper Volga Region over a warm period of 2021, 2022. As a tool of obtaining source data, radar data, derived at the output of WR “Monocle”, using signals of the horizontal polarization within X-wave-length range, was used.

The methods of conducting experimental studies to form statistic database were formulated as follows (fig. 1). The validation of derived data about the classified weather events in the WR was carried out by correlating with the reliable meteorological sources: ground meteorological stations, located in the towns of Staritsa,

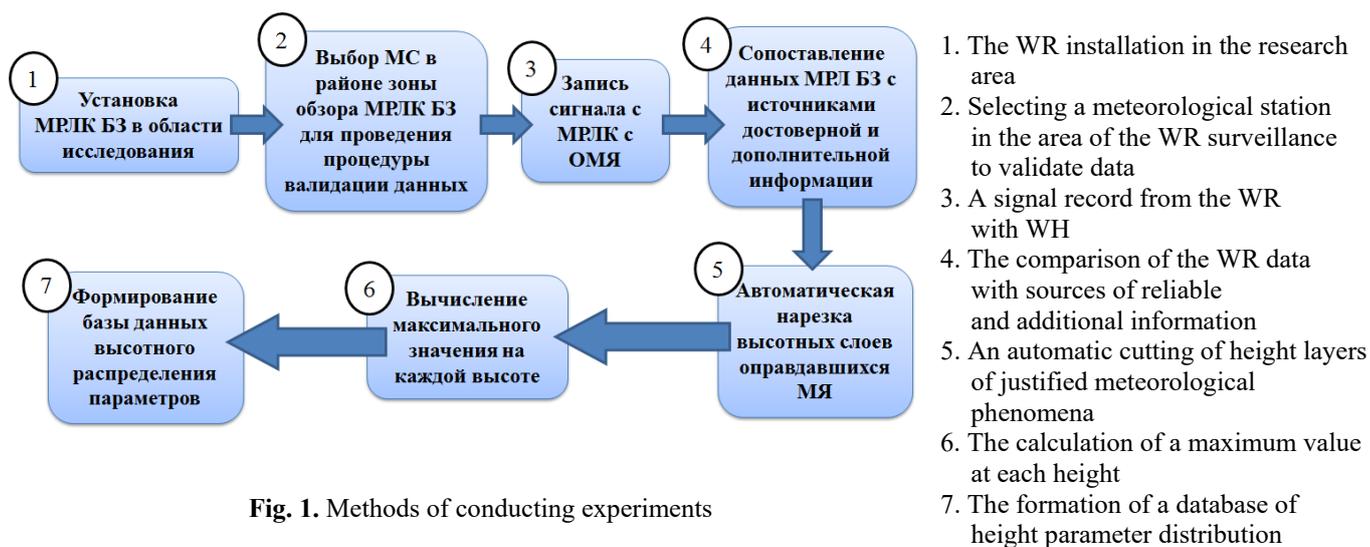


Fig. 1. Methods of conducting experiments

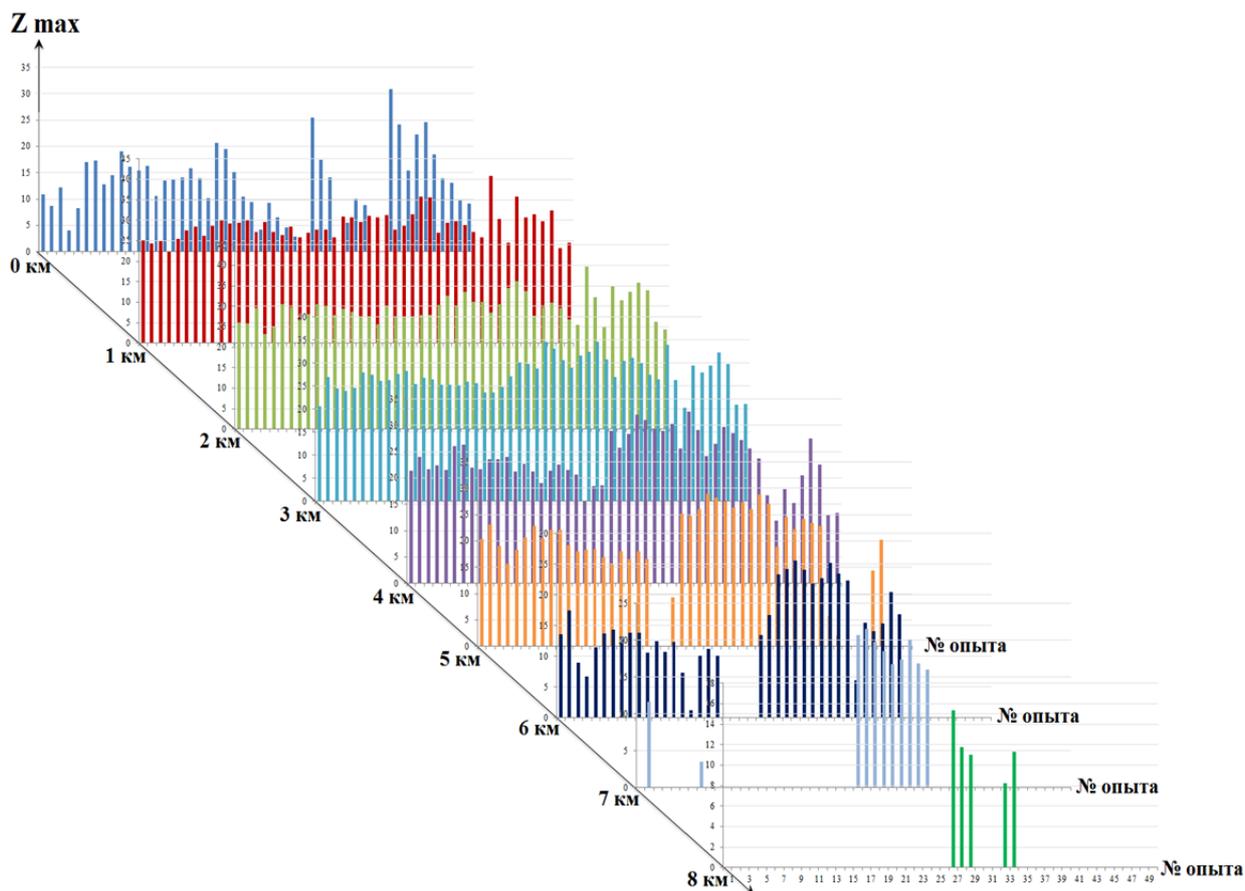


Fig. 2. Example of experimental data on the distribution of the maximum reflectivity by height for a heavy shower

Volokolamsk, Mozhaisk and Gagarin, and the certified DMRL-C type radars of the Rosgidromet network. In the event of observing a phenomenon on the WR and the MRLS maps over the

given span of time, the phenomenon is considered confirmed in accordance with the WR map if it coincides in space with the phenomenon on the MRLS map, to the contrary, the phenomenon



Fig. 3. Methods of the experimental data statistical analysis

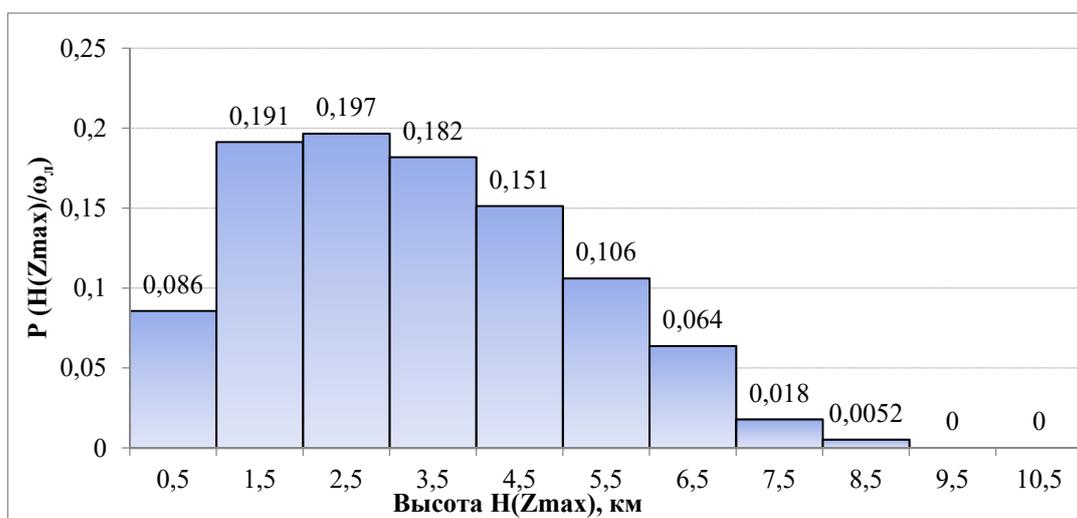


Fig. 4. Histogram of relative frequencies of the maximum reflectivity height

is considered not confirmed. On the whole, 50 confirmed experiments were conducted for each WH.

In order to derive the atmospheric parameters of distribution at each altitude with the discrete of 1 km, the following values: the maximum reflectivity in the cloud of Zmax as well as the maximum EDR value in the cloud of (EDRmax), were evaluated. An example of the maximum reflectivity distribution for the series of experiments for a rain shower is presented in Figure 2.

The methods of statistical processing experimental data are presented in Figure 3 [15].

A histogram of relative H(Zmax) value frequencies is presented in Figure 4, as an example.

The check of various hypotheses concerning the type of distributions by the Pearson criterion of χ^2 for the level of significance 0.01 showed the maximum compliance of experimental rela-

tive frequencies with the generalized Rayleigh-Rice distribution

$$f(x|\mu, \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2 + \mu^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{x \cdot \mu}{\sigma^2}\right), \quad (2)$$

where $I_0(z)$ – the modified zero-order Bessel function of the first kind,

$\mu = 2$ – ME and $\sigma = 2.5$ – MSD. The histogram approximation result by the theoretical law is presented in Figure 5. The parameters μ and σ in the strict sense are not ME and MSD, however, they appropriately reflect the shape of distribution² [16, 17].

² Approximation based on the type distribution. *Approximation of experimental data law*. Available at: <https://poznayka.org/s97706t1.html> (accessed: 12.05.2023). (in Russian)

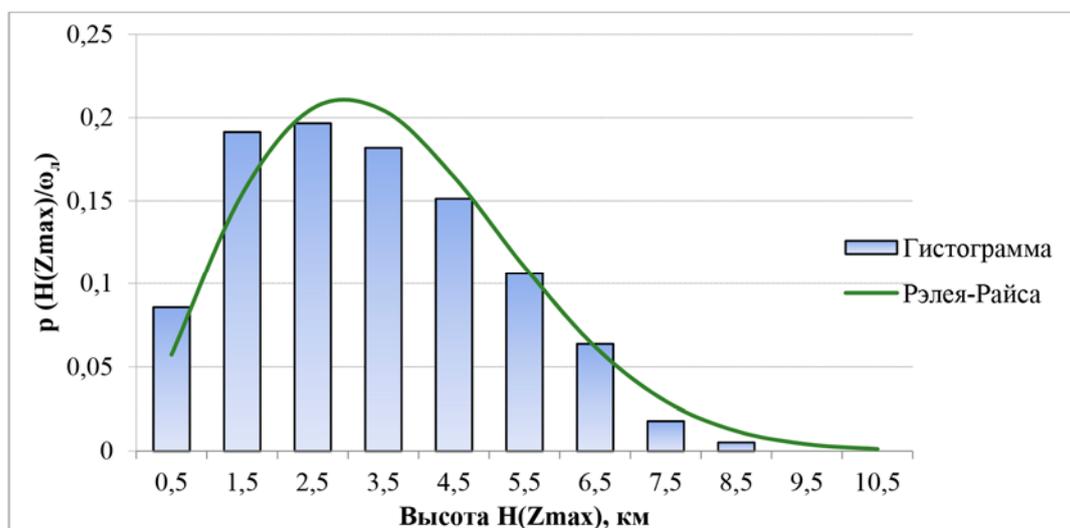


Fig. 5. Approximations of the histogram by the theoretical Rice law

To be based on the developed methods, the statistical parameter $H(EDR_{max})$ analysis for a rain shower was conducted as well as of the amplitude distribution of reflectivity parameters and EDR (Z_{max} , EDR_{max}) for thunderstorms and hail. Rice distributions for the parameters $H(Z_{max})$, $H(EDR_{max})$, Z_{max} and EDR_{max} of meteorological phenomena under consideration are shown in Figures 6 and 7.

The practical identity of distribution densities of $p(H(Z_{max}))$, $p(H(EDR_{max}))$ is observed in Figure 6. It points out to the high height correlation of reflectivity and turbulence in CB [18]. In the event of the maximum values distribution, the difference is obvious. However, in all the cases, distributions are quite severely overlapped. It points out to the insignificant distinctive ability of each individual parameter while solving the problem of the meteorological phenomena classification within the assigned alpha-

bet. The theory of recognition prompts an obvious alternative. A combined use of information parameters, for example, in the form of multidimensional probabilities distribution densities of random parameters [17] is essential to enhance confidence of the classification, as Figures 8 and 9 show.

The derived Rice distributions parameters μ , σ_x , based on the computational results of height distribution of the reflectivity parameters and EDR for a rain shower, thunderstorms and hail, are indicated in Table 1. In fact, the table presents a parametric description of the classification factors for the MP “rain shower-thunderstorm-hail”.

Thus, the statistical analysis of full-scale experiment data showed that the distribution densities of the maximum reflectivity and turbulence by values and altitude possess the unique character described by a generalized Rice law.

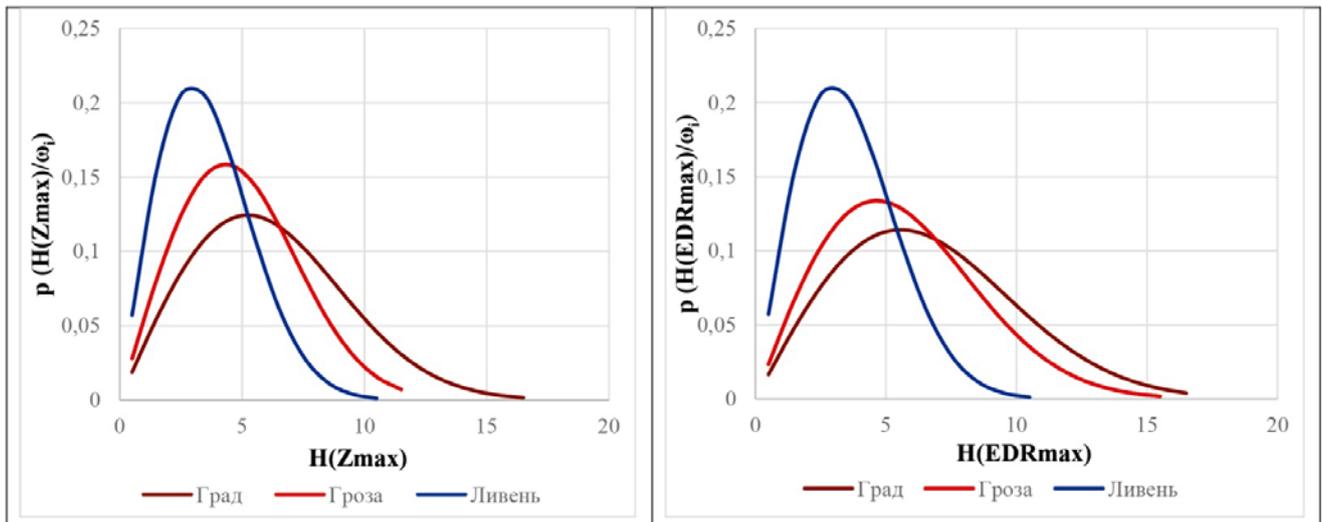


Fig. 6. Density of the probability distribution Z_{max} and EDR_{max} by height for the meteorological phenomena under consideration

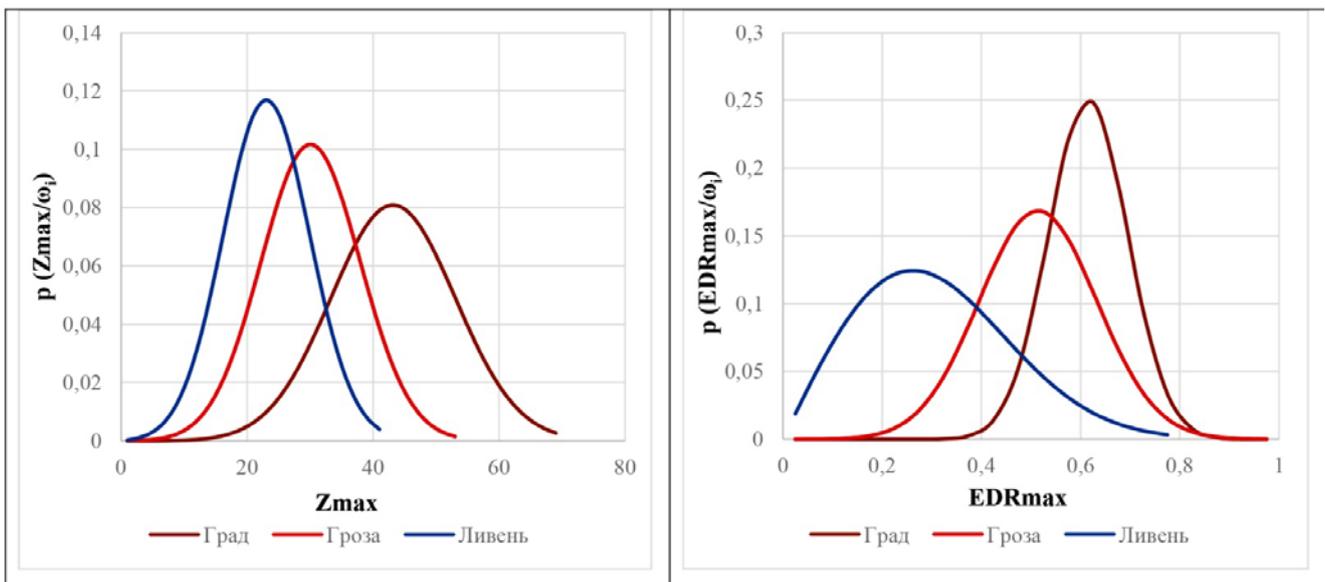


Fig. 7. Probability distribution density of Z_{max} and EDR_{max} by values for the meteorological phenomena under consideration

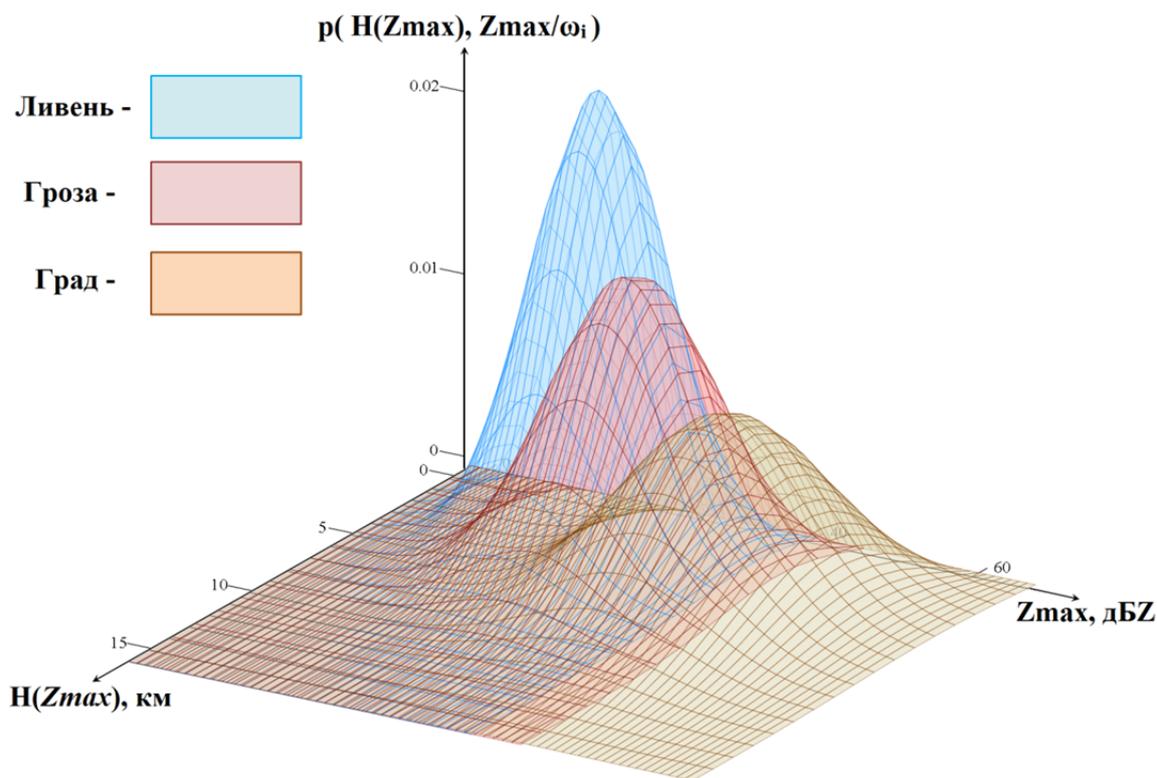


Fig. 8. Surface of the two-dimensional probability density of the radar reflectivity

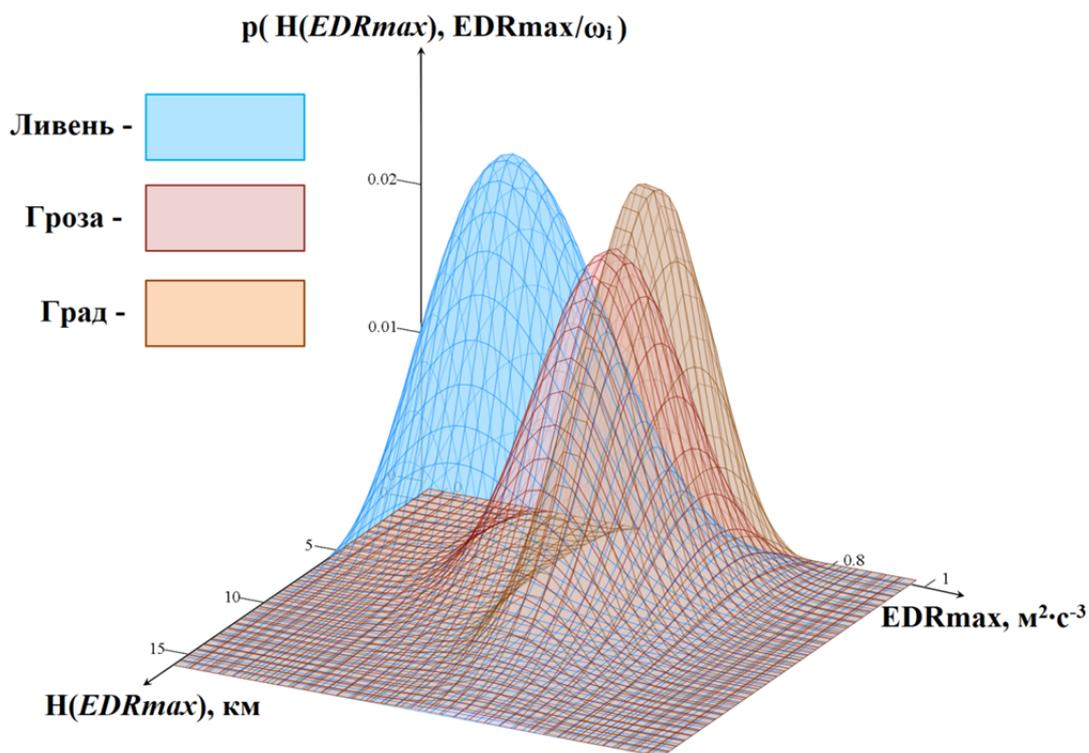


Fig. 9. Surface of the two-dimensional EDR probability density

Table 1

Rice distribution parameters for a rain shower, thunderstorm and hail

Parameter	Rain shower	Thunderstorm	Hail
	H(Zmax)		
ME	$\mu = 2$	$\mu = 3.5$	$\mu = 4$
MSD	$\sigma_x = 2.5$	$\sigma_x = 3$	$\sigma_x = 4$
H(EDRmax)			
ME	$\mu = 2$	$\mu = 3$	$\mu = 4$
MSD	$\sigma_x = 2.5$	$\sigma_x = 4$	$\sigma_x = 4.5$
Zmax			
ME	$\mu = 22$	$\mu = 29$	$\mu = 42$
MSD	$\sigma_x = 7$	$\sigma_x = 8$	$\sigma_x = 10$
EDRmax			
ME	$\mu = 0.2$	$\mu = 0.5$	$\mu = 0.61$
MSD	$\sigma_x = 0.2$	$\sigma_x = 0.12$	$\sigma_x = 0.08$

Evaluation of the probabilistic characteristics of the weather hazard classification for the specified empirical criteria of the classification in the WR

Let us define decision-making confidence for specified criteria considering newly obtained statistical data to determine some reference point.

As we mentioned before, the criteria for the MP classification: a rain shower-thunderstorm-hail are adopted by the entire arrays of the range of reflectivity distribution by height. Subsequently, in order to specify in conformity with cumulative statistics over a span of time which determines decision-making confidence at the level of 0.9, the classification criteria were determined in the software WR “Monocle” as follows³:

- 1) the threshold value of radar reflectivity at the height of 0–2 km for the (MP) – Rain Shower **Z_{пор} = 27 dBZ**;
- 2) the threshold value of radar reflectivity at the level of $H_3 = H_0 + 2500 \text{ m} = 5.2 \text{ km}$ for the MP – Thunderstorm **Z_{пор} = 26 dBZ**;
- 3) the threshold value of maximum radar reflectivity over the entire cloud volume for the MP – Hail **Z_{пор} = 45 dBZ**.

In case of a rain shower, in accordance with the adopted criterion, a value of height does not influence decision-making. Therefore, let us restrict ourselves by considering the reflectivity value **Z_{пор} = 27 dBZ** (fig. 10), as a threshold.

The expression for the probability calculation of the correct rain shower classification [19] takes the form

$$P_{\Pi} = \int_{Z_{\text{пор}}}^{\infty} \frac{x}{\sigma^2} e^{-\frac{x^2 + \mu^2}{2\sigma^2}} I_0\left(\frac{x\mu}{\sigma^2}\right) dx. \quad (2)$$

For the values $\mu = 22$ and $\sigma = 7$, the probability amounts to the value of 0.29, but the probability of a rain shower missing – 0.71. The similar approach is applicable for the case with hail, setting a threshold at the level of **Z_{пор} = 45 dBZ**. As a result, for the values of $\mu = 42$ and $\sigma = 10$, we will obtain a value of probability of the correct classification of hail – 0.42, of missing – 0.58. In the case of thunderstorm, a threshold value of **Z_{пор} = 26 dBZ** reflectivity is additionally determined by the value of a minimum height of its availability – 2.5 km above a freezing level. Let us calculate the correct classification probability of thunderstorm, similar to the first two cases, as an additional condition will result in its decreasing in the case under consideration. For the values of $\mu = 29$ and $\sigma = 8$, we will obtain a probability value of the correct classification of thunderstorm – 0.70, of missing – 0.30.

³ Maintenance Manual. Weather radar system of nearair-field WR. (2016). Moscow: Standartinform, 19 p. (in Russian)

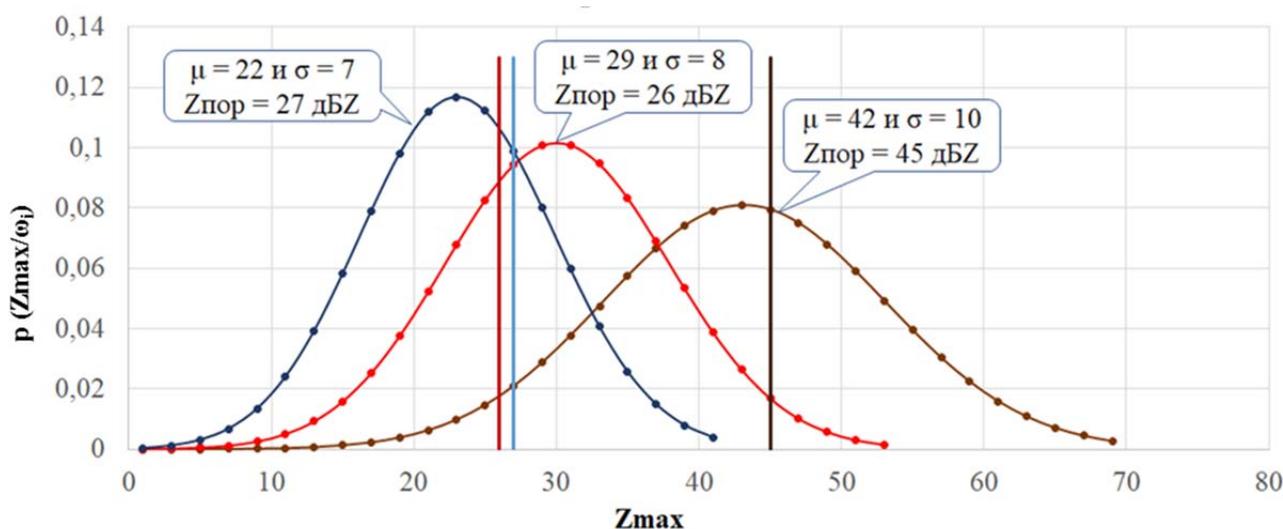


Fig. 10. Example of setting decision-making thresholds for the existing classification criteria

Even such a simple analysis shows that the adopted criteria are far from optimality in terms of the probabilities of the correct classification, specifically in the case of a rain shower. According to the authors, thresholds must ensure the correct classification probabilities not worse than 0.8. It is quite obtainable for the parametric criteria. MP data probabilities of the correct classification of 0.81, 0.82, 0.82 appropriately ensure the correction of $Z_{пор}$ thresholds for the level of 17, 23, 34 dBZ for a rain shower, thunderstorm and hail.

It is obvious that the problem solution of the assigned classification confidence is associated with the optimization of the feature space and classification criteria.

Conclusion

In the WR “Monocle”, the WH classification is based on knowledge about the height distribution of radar reflectivity, atmosphere temperature (height of zero-degree isotherm, isotherm -22°), as well as about values of lower and upper boundaries of radio echo. The criteria are far from optimal, cumbersome and make the process of the WH classification automation difficult.

The basic ways of the WH classification criteria optimization associated with CB: the use of information about the height distribution of not only reflectivity but also of the atmosphere tur-

bulence, forming parametric descriptions of classification features in the WH classification criteria.

The WH classification must be based on Bayesian approach under which a problem of choosing a decision is formulated in terms of the probability theory and all the significant probabilistic values, so-called sufficient statistics, are known. Whereby, for the assigned alphabet of classes, it is necessary to seek probabilistic distribution density descriptions of maximum reflectivity and EDR by values and height.

The basic ways of overcoming the complete expected uncertainty of probabilistic classification features description, based on the use of the learning sample, are shown.

For the purpose of obtaining statistical descriptions of probabilistic reflectivity distributions and specific velocity of turbulent energy dissipation, the analysis of radar signals reflected from such MP as a rain shower, thunderstorm, hail was conducted. As a tool of deriving learning samples, radar data, obtained at the output of the WR “Monocle”, was utilized. The methods of conducting experiments and the statistical analysis of their results were developed.

The statistical data analysis of a full-scale experiment showed that distribution densities of maximum reflectivity and turbulence by values and height have the unique parametric character described by a generalized Rice law. The para-

metric feature descriptions of the MP classification “rain shower-thunderstorm-hail” have been obtained.

The following step is the substantiation of a single probabilistic criterion of the CB-related WH classification and the development of decision functions, decision-making thresholds determined by the assigned classification confidence.

References

1. **Doviak, R.J., Zrnic, D.S.** (1984). Doppler radar and weather observation. Academic Press, INC., 458 p.
2. **Rasputikov, A.S.** (1990). Investigation of aviation accidents and incidents related to meteorological conditions and deficiencies in the meteorological supply of flights. Moscow: Vozdushnyy transport, 140 p. (in Russian)
3. **Bogatkin, O.G.** (2009). Fundamentals of aviation meteorology: Textbook. St. Petersburg: RGGMU, 339 p. (in Russian)
4. **Vasiliev, O., Bolelov, E., Galaeva, K., Gevak, N., Zيابкин, S., Kolesnikov, E., Peshko, A., Sinitsyn, I.** (2021). The design and operation features of the near-airfield zone weather radar complex “Monocle”. In: *2021 XVIII Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky (TSCZh)*, pp. 64–72. DOI: 10.1109/TSCZh53346.2021.9628352
5. **Galaeva, K.I.** (2020). Results analysis of the tests and certification of near-airfield meteorological radar complex. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 23, no. 1, pp. 28–40. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-1-28-40 (in Russian)
6. **Vasiliev, O.V., Korotkov, S.S., Galaeva, K.I., Boyarenko, E.S.** (2023). Decision criteria for the classification of meteorological phenomena in the weather radar complex of the near-airfield zone. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 26, no. 2, pp. 49–60. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-2-49-60 (in Russian)
7. **Basov, I.A., Dmitrieva, O.A., Dorofeev, E.V. et al.** (2013). Methodological guidelines for the production of meteorological radar observations on the DMRL-S on the Roshydromet network for storm warning and aviation meteorological support purposes. St. Petersburg: FGBU «GGO im. A.I. Voyeykova», 137 p. (in Russian)
8. **Duda, R.O., Hart, P.E.** (1973). Pattern classification and scene analysis. New York: Jon Wiley & Sons, 512 p.
9. **Gorelik, A.L., Skripkin, V.A.** (1989). Recognition methods: Textbook for universities. 3rd ed., pererab. i dop. Moscow: Vyshaya shkola, 232 p. (in Russian)
10. **Repin, V.G., Tartakovskiy, G.P.** (1977). Statistical synthesis with a priori uncertainty and adaptation of information systems. Moscow: Sovetskoye radio, 432 p. (in Russian)
11. **Fomin, Ya.A., Tarlovskii, G.R.** (1986). Statistical theory of pattern recognition. Moscow: Radio i svyaz, 264 p. (in Russian)
12. **Degtyarev, A.S., Drabenko, V.A., Drabenko, V.A.** (2015). Statistical methods of processing meteorological information: Textbook. St. Petersburg: Andreevskiy izdatelskiy dom, 225 p. (in Russian)
13. **Khandozhko, L.A.** (2005). Economic meteorology: Textbook. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 490 p. (in Russian)
14. **Tikhonov, V.I., Bakaev, Yu.N.** (1978). Statistical theory of radio engineering devices: a Monography. Moscow: VVIA im. prof. N.Ye. Zhukovskogo, 420 p. (in Russian)
15. **Bekryayev, V.I.** (2001). Fundamentals of experimental theory: Tutorial. St. Petersburg: RGGMU, 266 p. (in Russian)
16. **Kremer, N.Sh.** (2004). Probability theory and Mathematical statistics. 2nd ed., pererab. i dop. Moscow: UNITY, 573 p. (in Russian)
17. **Ayvazyan, S.A., Enyukov, I.S., Meshalkin, L.D.** (1983). Applied statistics: fundamentals of modeling and primary data processing. Moscow: Finansy i statistika, 471 p. (in Russian)
18. **Yanovskiy, F.I.** (2008). Meteorological support of aviation. In book: *The encyclopedia of aviation safety*, in Kulik N.S. (ed.). Kiev: Tekhnika, 1000 p. (in Russian)
19. **Maksimov, M.V., Bobnev, M.P., Krivitskiy, B.X.** (1976). Protection against radio interference, in Maksimov M.V. (ed.). Moscow: Sovetskoye Radio, 496 p. (in Russian)

Список литературы

1. **Довиак Р., Зрнич Д.** Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения / Пер. с англ. В.М. Востренкова, В.С. Новикова, М.Н. Хайкина, под ред. А.А. Черникова. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 512 с.
2. **Распутиков А.С.** Расследование авиационных происшествий и инцидентов, связанных с влиянием метеоусловий и недостатков в метеообеспечении полетов. М.: Воздушный транспорт, 1990. 140 с.
3. **Богаткин О.Г.** Основы авиационной метеорологии: учебник. СПб.: РГГМУ, 2009. 339 с.
4. **Vasiliev O.** The design and operation features of the near-airfield zone weather radar complex "Monocle" / O. Vasiliev, E. Bolelov, K. Galaeva, N. Gevak, S. Zyabkin, E. Kolesnikov, A. Peshko, I. Sinitsyn // 2021 XVIII Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky (TSCZh), 2021. Pp. 64–72. DOI: 10.1109/TSCZh53346.2021.9628352
5. **Галаева К.И.** Анализ результатов испытаний и сертификации метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны // Научный Вестник МГТУ ГА. 2020. Т. 23, № 1. С. 28–40. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-1-28-40
6. **Васильев О.В.** Критерии принятия решений для классификации метеоявлений в метеорологическом радиолокационном комплексе ближней аэродромной зоны / О.В. Васильев, С.С. Коротков, К.И. Галаева, Э.С. Бояренко // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 2. С. 49–60. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-2-49-60
7. **Басов И.А., Дмитриева О.А., Дорофеев Е.В. и др.** Методические указания по производству метеорологических радиолокационных наблюдений на ДМРЛ-С на сети Росгидромета в целях штормооповещения и метеообеспечения авиации. СПб.: ФГБУ «ГГО им. А.И. Воейкова», 2013. 137 с.
8. **Дуда Р., Харт П.** Распознавание образов и анализ сцен / Пер. с англ. Г.Г. Вайнштейна и А.М. Васильковского, под ред. В.Л. Стефанюка. М.: Мир, 1976. 511 с.
9. **Горелик А.Л., Скрипкин В.А.** Методы распознавания: учеб. пособие для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1989. 232 с.
10. **Репин В.Г., Тартаковский Г.П.** Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М.: Советское радио, 1977. 432 с.
11. **Фомин Я.А., Тарловский Г.Р.** Статистическая теория распознавания образов. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
12. **Дегтярев А.С., Драбенко В.А., Драбенко В.А.** Статистические методы обработки метеорологической информации: учебник. СПб.: Андреевский издательский дом, 2015. 225 с.
13. **Хандожко Л.А.** Экономическая метеорология: учебник. СПб.: Гидрометеиздат, 2005. 490 с.
14. **Тихонов В.И., Бакаев Ю.Н.** Статистическая теория радиотехнических устройств: монография. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1978. 420 с.
15. **Бекряев В.И.** Основы теории эксперимента: учеб. пособие. СПб.: РГГМУ, 2001. 266 с.
16. **Кремер Н.Ш.** Теория вероятностей и математическая статистика. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2004. 573 с.
17. **Айвазян С.А., Енюков И.С., Мешалкин Л.Д.** Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. М.: Финансы и статистика, 1983. 471 с.
18. **Яновский Ф.И.** Метеорологическое обеспечение авиации // Энциклопедия безопасности авиации / Под ред. Н.С. Кулика. Киев: Техника, 2008. 1000 с.
19. **Максимов М.В., Бобнев М.П., Кривицкий Б.Х. и др.** Защита от радиопомех / Под ред. М.В. Максимова. М.: Советское радио, 1976. 496 с.

Information about the authors

Oleg V. Vasiliev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Technical Maintenance of Radio Electronic Equipment of Air Transport Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, vas_ov@mail.ru.

Ksenia I. Galaeva, Teacher of the Technical Maintenance of Radio Electronic Equipment of Air Transport Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, ks.galaeva@mail.ru.

Elvira S. Boyarenko, Postgraduate Student of the Technical Maintenance of Radio Electronic Equipment of Air Transport Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, boyarenko.elvira@mail.ru.

Сведения об авторах

Васильев Олег Валерьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта МГТУ ГА, vas_ov@mail.ru.

Галаева Ксения Игоревна, преподаватель кафедры технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта МГТУ ГА, ks.galaeva@mail.ru.

Бояренко Эльвира Сергеевна, аспирант кафедры технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта МГТУ ГА, boyarenko.elvira@mail.ru.

Поступила в редакцию	22.05.2023	Received	22.05.2023
Одобрена после рецензирования	24.07.2023	Approved after reviewing	24.07.2023
Принята в печать	21.11.2023	Accepted for publication	21.11.2023

УДК 621.45.04

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-22-32

Обеспечение кондиционности авиационных топлив при использовании противоводокристаллизационных жидкостей

К.И. Грядунов¹

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

Аннотация: Добавление противоводокристаллизационных жидкостей (ПВКЖ) в авиационные топлива (АТ) является радикальным и сравнительно простым способом борьбы с образованием льда в топливных системах воздушных судов (ВС) и авиационных двигателей (АД). Использование ПВКЖ крайне актуально для нашей страны. Однако отказы элементов топливных систем по причине обледенения случаются и при добавлении в АТ ПВКЖ. В статье показано, что одной из наиболее значимых причин указанного является снижение нормативной концентрации ПВКЖ в АТ после заправки из-за смешения заправляемого топлива с нормативным содержанием ПВКЖ с остатком топлива в баках ВС, как с наличием ПВКЖ, так и без нее. При этом контроль содержания ПВКЖ в АТ после заправки ВС не проводится. Показано, что решением данной проблемы может быть переход на вариативное дозирование ПВКЖ в АТ с учетом остатка топлива в баках ВС и топлива, находящегося в технологическом оборудовании авиатопливообеспечения. Создание дозаторов с изменяемой подачей ПВКЖ в АТ на данный момент не вызывает трудностей. Предложена формула и показан расчет требуемой дозировки ПВКЖ для гарантированного обеспечения ее нормативного значения в АТ после заправки. Также показано, что требуемая дозировка изменяется в весьма широких пределах: от 0,18 до 1,31 % об., и во всех случаях превышает осуществляемую по нормативу для гражданской авиации дозировку $0,125 \pm 0,025$ % об. Совершенствование процедуры дозирования ПВКЖ в АТ необходимо для обеспечения надежности работы топливных систем ВС и АД и обеспечения безопасности полетов.

Ключевые слова: авиационные топлива, противоводокристаллизационные жидкости, «И», «И-М», «ТГФ», «ТГФ-М», дозирование ПВКЖ.

Для цитирования: Грядунов К.И. Обеспечение кондиционности авиационных топлив при использовании противоводокристаллизационных жидкостей // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 6. С. 22–32. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-22-32

Ensuring the aviation fuel quality when using anti-water crystallization fluids

K.I. Gryadunov¹

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

Abstract: The addition of anti-water crystallization fluids (AWCF) in aviation fuels (AF) is a radical and relatively simple method to prevent ice formation in the aircraft fuel systems and aviation engines (AE). The anti-water crystallization fluids use is extremely important for our country. However, failures of fuel systems components due to icing also occur when the anti-water crystallization fluids are added to aviation fuel. The article shows that one of the most significant causes is a decrease in standard concentration of the anti-water crystallization fluids in aviation fuels after refueling due to mixing loaded fuel with the standard-anti-water crystallization fluids content with the remaining fuel in aircraft tanks, both with and without the anti-water crystallization fluids. At the same time, the anti-water crystallization fluids content control in aviation fuels after refueling is not carried out. It is shown that the solution to this problem can be a transition to variable anti-water crystallization fluids metering in aviation fuels, taking into account the remaining fuel in the aircraft tanks and the fuel in the aviation fuel supply technological equipment. Developing metering units with the variable anti-water crystallization fluids supply to aviation fuels is not currently associated with issues. The formula is proposed, and the calculation of the required anti-water crystallization fluids metering is shown to ensure its standard

value in aviation fuels after refueling. It is also shown that the required metering varies long-range: from 0.18 to 1.31% vol., and in all the cases, exceeds standard metering of $0,125 \pm 0,025\%$ vol. for civil aviation. The improvement of the anti-water crystallization fluids metering procedure in aviation fuel is feasible to ensure the reliability of aircraft fuel systems and aviation engines operation as well as flight safety.

Key words: aviation fuels, anti-water crystallization fluids, “Г”, “I-M”, “ТНФ”, “ТНФ-М”, anti-water crystallization fluids metering.

For citation: Gryadunov, K.I. (2023). Ensuring the aviation fuel quality when using anti-water crystallization fluids. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 6, pp. 22–32. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-22-32

Введение

Добавление противоводокристаллизационных жидкостей (ПВКЖ) в авиационные топлива (АТ) является радикальным и сравнительно простым способом борьбы с образованием кристаллов льда в топливах, а также отчасти льда и инея в топливных системах воздушных судов (ВС) и авиационных двигателей (АД). Это первые присадки, которые были внедрены в нашей стране для реактивных топлив (разработаны под руководством Б.А. Энглина) примерно в середине прошлого века [1–6]. При наличии прочих способов борьбы с образованием льда в топливных системах и забивкой льдом фильтров тонкой очистки (ФТО) АД – различные виды обогрева ФТО, подогрев топлива перед его поступлением в ФТО, впрыск спирта на ФТО при наличии на нем увеличенного перепада давления, оборудование системы наддува топливной системы ВС инертными газами (азотом) – этот метод при всех его недостатках является актуальным, особенно для российских условий эксплуатации. Преимущества и недостатки введения ПВКЖ в АТ показаны на рис. 1 [4, 7].

На сегодняшний день в гражданской авиации (ГА) применяют две марки противоводокристаллизационных жидкостей: «И» (ГОСТ 8313-88), «И-М» (ОСТ 54-3-175-73-99). Жидкость «И» представляет собой 100%-ный этилцеллозольв (этиловый эфир этиленгликоля – $C_2H_5OCH_2CH_2OH$), жидкость «И-М» – 50 % этилцеллозольва и 50 % метанола (метилового спирта – CH_3OH). Изначально в качестве ПВКЖ использовалась только жидкость «И», она же безальтернативно использовалась и до сего дня используется в государственной авиации, жидкость «И-М» была

разработана под руководством К.С. Черновой позже (1970-е гг.) и широко использовалась (используется) в ГА. Наравне с жидкостью «И» использовали марку «ТГФ» (тетрагидрофурфуриловый спирт – $C_4H_7OCH_2OH$), а также ее смесь с метанолом в соотношении 50 : 50 – «ТГФ-М», однако, ввиду того что ТГФ обладает склонностью к окислению и полимеризации, наблюдались случаи некорректной работы и отказов элементов топливорегулирующей аппаратуры АД из-за попадания продуктов окисления ТГФ, поэтому применение присадок «ТГФ» и «ТГФ-М» в начале 1990-х гг. было отменено. На текущий момент использование жидкости «И-М» все более сокращается, так как многие эксплуатанты ВС в ГА не считают целесообразным добавление ПВКЖ.

Кондиционная ПВКЖ, будучи кислородсодержащим органическим соединением, хорошо смешивается с топливом, равно как, благодаря наличию полярной гидроксильной ($-OH$) группы, хорошо смешивается и с водой. При этом из-за наличия гидроксильной группы молекулы ПВКЖ являются полярными, поэтому с водой они образуют устойчивые химические связи (водородная связь) и, соответственно, стойкие растворы в любых концентрациях, а химических связей (ковалентные связи) с углеводородами топлив практически не образуют, поэтому ПВКЖ весьма легко выделяется из топлива при определенных условиях (распределяется между топливом и водным отстоем в баках ВС в соответствии с коэффициентом распределения). Удлинение углеводородной цепи в спиртах приводит к тому, что они перестают растворяться в воде, поэтому добавление метанола к этилцеллозольву повышает раство-



Рис. 1. Преимущества и недостатки введения ПВКЖ в авиационные топлива
Fig. 1. Advantages and disadvantages of the AWCF addition to aviation fuels

римость ПВК-присадки в топливе (повышается коэффициент ее распределения в АТ¹), а также повышает и растворимость воды в присадке [7]. Отсюда следует, что весьма эффективной ПВК-присадкой был бы чистый метанол, однако, как известно, он является сильнодействующим ядом (1 класс опасности), и к его применению предъявляют особые требования, усложняющие эксплуатацию ВС в части обеспечения его авиационными горюче-смазочными материалами, кроме того, он крайне агрессивен по отношению к конструкционным материалам. Таким образом, введенная в АТ ПВКЖ образует устойчивые растворы с растворенной в нем водой² (эмульсии), не замерзающие до температур порядка минус 60 °С. При изменении внеш-

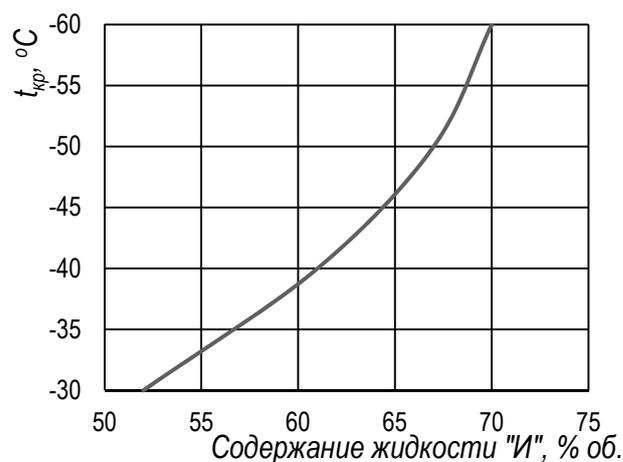


Рис. 2. Влияние концентрации присадки «И» на температуру кристаллизации водного раствора
Fig. 2. Influence of the agent “I” concentration on the aqueous solution crystallization temperature

¹ При температуре 20 °С коэффициент распределения для метанола равен 200, для этилцеллозольва – 84; при температуре минус 20 °С значения коэффициентов составляют 310 и 150 соответственно [8].

² Растворенной (гигроскопической) водой называют воду, находящуюся в межмолекулярном пространстве АТ, попадающую в него из атмосферы вместе с воздухом. Растворимость воды в АТ зависит от плотности АТ, влажности воздуха, давления в надтопливном пространстве, температуры топлива и характеризуется формулой Генри [4].

них условий (снижении температуры и давления) данная эмульсия может выделяться из топлива, смешиваясь с водой, находящейся в топливных системах ВС и АД в других фазах (пар, конденсат, иней, свободная и отстойная вода, лед), и образуя уже с ней низкотемпературные растворы. При этом температура замерзания растворов будет зависеть от концентрации в них ПВКЖ (рис. 2) [3, 4].

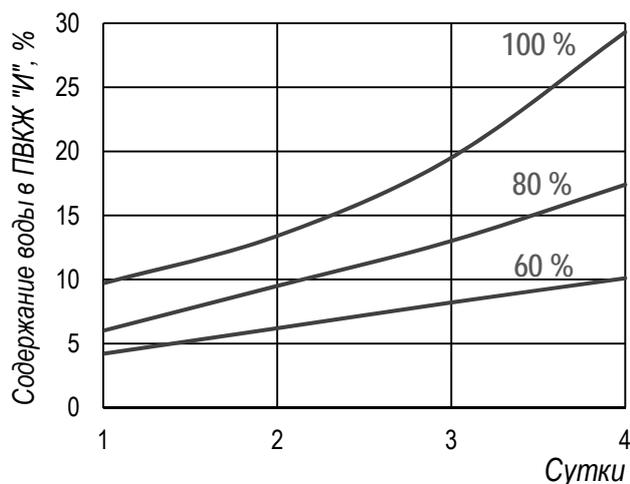


Рис. 3. Насыщение водой ПВКЖ «И» в зависимости от влажности воздуха при комнатной температуре

Fig. 3. AWCF "I" water saturation depending on air humidity at the room temperature

Обводненность или загрязненность ПВКЖ приводит к тому, что присадка практически теряет способность смешивания с топливом, ограниченно смешивается с растворенной в топливе водой и быстро выпадает в отстой, поэтому использование ПВКЖ с чистотой, не соответствующей требованиям нормативных документов, запрещается. Хранение топлива с ПВКЖ в полностью заполненной закрытой емкости является весьма стабильным (гарантийный срок хранения составляет 2 года). Если условия хранения нарушены, ПВКЖ достаточно быстро напитывается атмосферной влагой и при дозировании в АТ сразу выпадает в отстой (рис. 3, 4), отсюда же следует, что хранение топлива с ПВКЖ крайне нежелательно [7–9]. Все указанное подчеркивает актуальность введения ПВКЖ непосредственно при заправке ВС максимально равномерными порциями в поток топлива, что в целом и осуществляется в ГА, хотя идут работы над созданием более совершенных дозаторов, максимально равномерно подающих ПВКЖ в заправляемое АТ.

Следует отметить биоцидное действие ПВК-присадок [10]. Добавление жидкостей «И» и «И-М» в топливо в концентрациях порядка 0,1 % об. практически не сказывается на подавлении роста популяций микроорга-



Рис. 4. Водный раствор ПВКЖ «И-М», выпавший в отстой

Fig. 4. The aqueous AWCF "I-M" solution which fell into the sediment

низмов, однако гигроскопичность присадок и их способность выделяться в виде свободной фазы приводит к тому, что в водных отстоях концентрация присадок существенно повышается. При концентрациях ПВКЖ в водных растворах около 2 % об. способность микроорганизмов к размножению утрачивается. На данный момент рассматривается вопрос возврата добавления ПВКЖ-присадок для всех эксплуатирующихся в ГА ВС, идет доработка марок ПВКЖ с целью усиления функции антибактериального реагента [4, 11, 12]. Отсюда следует, что не только при наличии обледенения в топливных баках или технических средствах авиатопливообеспечения, но и при поражении их микрофлорой промывка этих объектов топливом с ПВКЖ является решением данных проблем наравне с аналогичной промывкой импортными биоцидными присадками.

На момент ввода ПВКЖ в эксплуатацию норматив ее дозировки в топливо был определен в количестве $0,3 \pm 0,03$ % об. Спустя некоторое время после проведения эксплуатации под наблюдением для всех рейсов, кроме литерных, в зависимости от типа ВС были установлены нормативы: $0,125 \pm 0,025$ % об.; $0,2 \pm 0,02$ % об. и $0,3 \pm 0,03$ % об. Пределы дозировки были заданы с учетом точности контрольно-измерительной аппаратуры и по-

Таблица 1
Table 1

Показатели качества авиационных ПВКЖ
Quality indicators of aviation AWCF

Показатель качества	Марка ПВКЖ	
	«И-М» (высший сорт)	«И» (высший сорт)
Плотность при температуре 20 °С, г/см ³	0,858–0,864	0,928–0,930
Показатель преломления при 20 °С	1,3660–1,36720	1,407–1,409
Массовая доля воды, %, не более: – на месте производства – на месте потребления	0,1 0,4	0,1 0,1
Наличие растворимых загрязнений	выдерживает испытания	выдерживает испытания
Содержание механических примесей	отсутствие	–
Содержание растворимых соединений металлов	отсутствие	отсутствие
Цвет по платиново-кобальтовой шкале, единицы Хазена, не более	–	8
Число омыления, мг КОН на 1 г продукта, не более	–	0,5
Массовая доля кислот в пересчете на уксусную кислоту, %, не более	–	0,005
Смешиваемость с водой	–	выдерживает испытания
Растворимость в топливе	–	выдерживает испытания
Температурные пределы перегонки (при 101,3 кПа): начало перегонки, °С, не ниже конец перегонки, °С, не выше	– –	134 138
Внешний вид	прозрачная, бесцветная	прозрачная

грешности дозаторов, использовавшихся на тот момент. После авиационного события в 2002 году в Бишкеке норматив ввода ПВКЖ $0,125 \pm 0,025$ % об. (то есть на 1 м³ АТ вводят 1–1,5 л ПВКЖ) был установлен для всех ВС ГА (для вертолетов, эксплуатирующихся в определенных условиях, норматив составляет $0,2 \pm 0,02$ % об.). В государственной авиации действует изначально установленный норматив. Научно обоснованного введения начального норматива ($0,3 \pm 0,03$ % об.) отыскать пока не представляется возможным, вероятно, он был позаимствован из иностранной практики (в США в качестве ПВКЖ под маркой PFA-55MB использовали метилцеллозольв – монометиловый эфир этиленгликоля с указанной дозировкой) и после всесто-

ронных исследований соответствующим образом адаптирован [4, 6, 7].

Сравнительные данные по показателям качества ПВКЖ «И» и «И-М» показаны в табл. 1.

Отдельно стоит отметить преимущества и недостатки добавления метанола к этилцеллозольву (рис. 5) [4, 7].

Тем не менее встречаются случаи отказов топливных систем ВС и АД при добавлении в АТ ПВКЖ (рис. 6, 7)³ [4], причины которых отчасти рассмотрены в данной статье, также предложен метод их устранения.

³ За период с 1990 по 2018 г. в России произошло 303 зарегистрированных события, отнесенных к коду 028 –Топливная система [4].

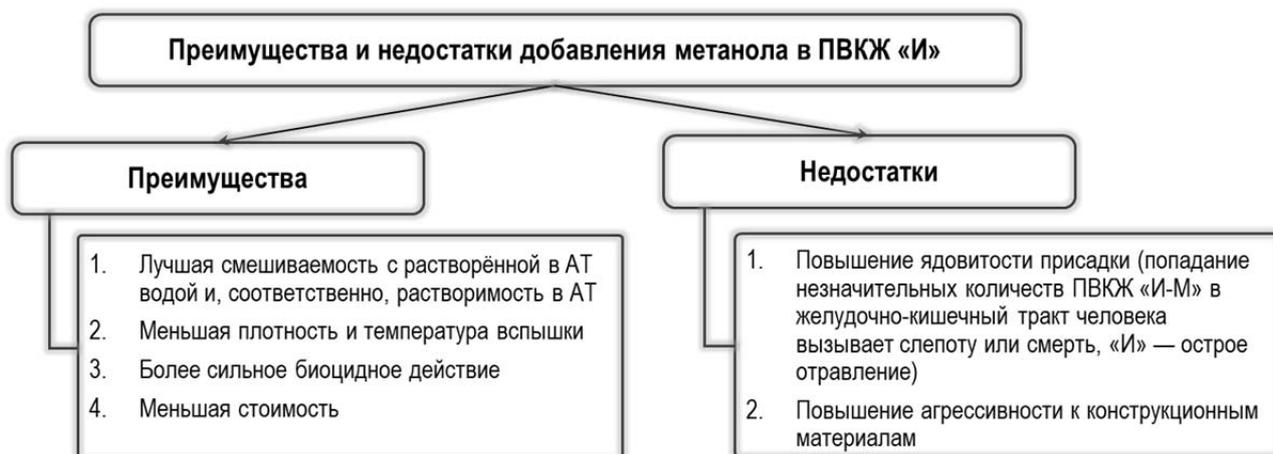


Рис. 5. Преимущества и недостатки добавления метанола в ПВКЖ «И»
Fig. 5. Advantages and disadvantages of adding methanol to AWCF “I”

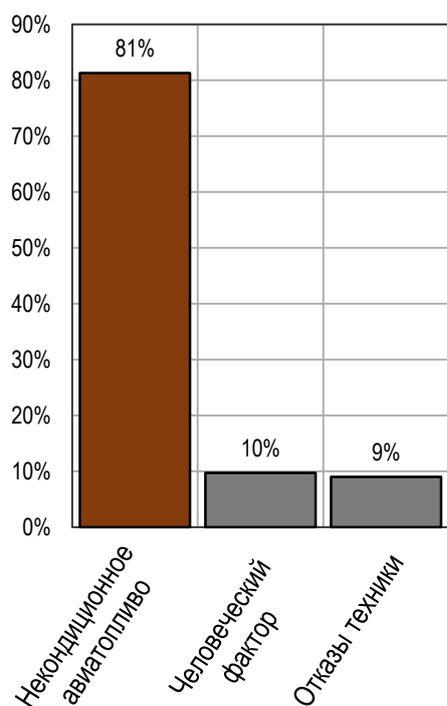


Рис. 6. Причины отказов топливных систем ВС и АД
Fig. 6. Causes of aircraft fuel systems and aviation engines failures

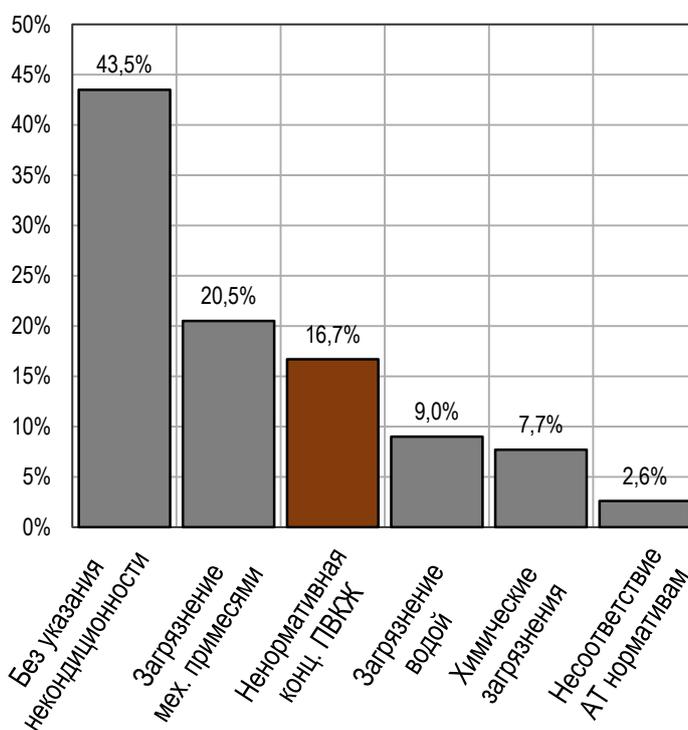


Рис. 7. Причины некондиционности авиационного топлива
Fig. 7. Causes of aviation fuel quality discrepancy

Основные положения

Для определения причин ненормативной концентрации ПВКЖ в АТ был проведен эксперимент по отбору проб АТ после за-

правки ВС АТ с ПВКЖ в вертолетном парке (тип ВС ВК-117). Результаты показаны в табл. 2 и на рис. 8, 9. Определение содержания ПВКЖ осуществлялось рефрактометрическим методом по стандартной методике.

Таблица 2
Table 2

Содержание ПВКЖ в АТ до и после заправки ВС
The AWCf content in aviation fuels before and after aircraft refueling

Номер испытания	Объем топлива в баках ВС до заправки, л	Объем заправляемого АТ в баки ВС, л	Процентное содержание ПВКЖ до заправки ВС, %	Процентное содержание ПВКЖ после заправки ВС, %
1	143	857	0,01	0,09
2	375	625	0,05	0,08
3	420	580	0,10	0,10
4	259	741	0,07	0,09
5	432	568	0,02	0,07
6	680	320	0,10	0,10
7	698	302	0,03	0,05
8	725	275	0,02	0,04
9	852	148	0,05	0,06
10	398	602	0,04	0,08
11	413	587	0,01	0,06
12	526	474	0,06	0,08
13	852	148	0,10	0,10
14	369	631	0,07	0,09
15	542	458	0,03	0,06
16	789	211	0,03	0,04
17	880	120	0,09	0,09
18	662	338	0,08	0,09
19	333	667	0,01	0,07
20	190	810	0,05	0,09
21	810	190	0,02	0,04

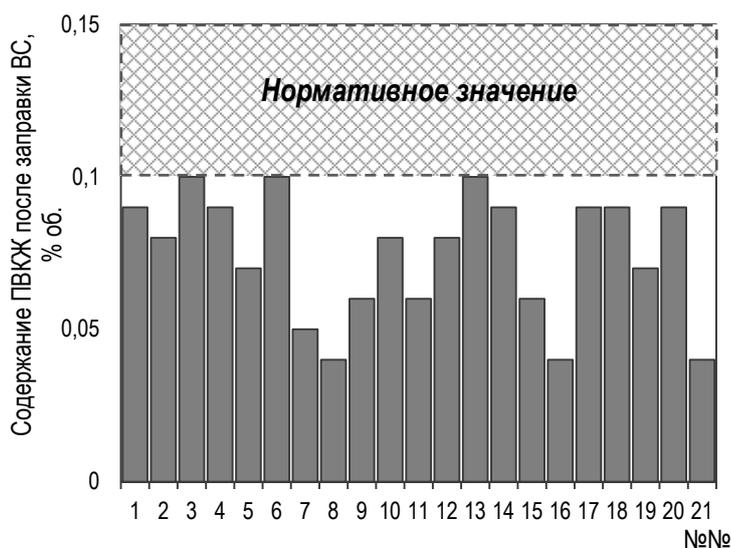


Рис. 8. Содержание ПВКЖ в АТ после заправки ВС
Fig. 8. The AWCf content in aviation fuels after the aircraft refueling

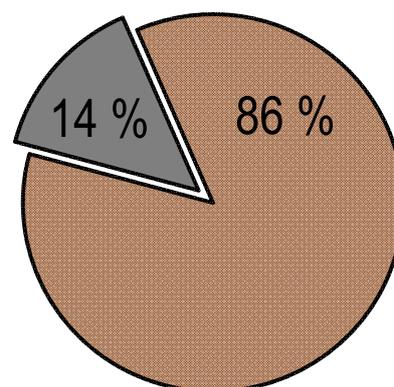


Рис. 9. Процент анализов АТ, в которых содержание ПВКЖ соответствует нормативу
Fig. 9. Percentage of aviation fuels analyses in which the AWCf content meets the established standard

Из представленных данных видно, что после заправки ВС АТ с ПВКЖ с дозированием $0,125 \pm 0,025$ % содержание ее в баках ВС соответствует нижней границе этого норматива лишь в 14 %, в прочих случаях может составлять более чем в 3 раза меньшее содержание.

Проблема, казалось бы, очевидная. Однако в эксплуатации при строгом выполнении дозирования ПВКЖ в заправляемое АТ определение содержания ПВКЖ в АТ после заправки не проводится.

В соответствии с п. 2.5.9 приказа № ДВ-126⁴ и п. 4.3.10 Методических рекомендаций ГосНИИ ГА НЦ-28⁵, если баки ВС полностью или частично заправлены АТ без ПВКЖ, а предстоит выполнение задания, требующего по условиям полета использование АТ с ПВКЖ, то в этом случае по требованию экипажа или эксплуатанта необходимо слить из баков все топливо без ПВКЖ и вновь заправить авиакеросином, содержащим положенное количество ПВКЖ. То есть почти в 86 % случаев было необходимо прибегнуть к указанной процедуре. Понятно, что это процедура просто не может быть применена, так как содержание ПВКЖ в АТ после заправки не контролируется.

Таким образом, поскольку нормативное содержание ПВКЖ принимается за истинно необходимое, существенным пробелом в дозировании ПВКЖ является то, что не учитывается ни остаток АТ в баках ВС, ни количество АТ, находящееся в заправочных рукавах. В случаях с магистральными самолетами ГА остатками в рукавах ($d = 5...7,5$ см, $l = 2,5...20$ м; $V = 5...70$ л) можно пренебречь, при сравнительно небольших заправках вертолетов и легкомоторных самолетов эти остатки уже имеют большое значение.

На текущий момент требуемое количество ПВКЖ при заправке ВС можно определить по формуле [3, 13]

$$V_{\text{ПВКЖ}} = K \cdot \frac{V_T}{100}, \quad (1)$$

где V_T – объем заправляемого топлива, м³;
 K – требуемая концентрация ПВКЖ, %.

На основании изложенного в статье коэффициент K должен быть вариативным, и с учетом остатка топлива и содержания в этом остатке ПВКЖ он может быть рассчитан следующим образом:

$$K = \frac{V_{\text{тобщ}} \cdot K_{\text{потреб}} - V_{\text{ост}} \cdot K_{\text{ост}}}{V_T}, \quad (2)$$

где $V_{\text{тобщ}}$ – общий потребный объем топлива в баках ВС после заправки, м³;
 $K_{\text{потреб}}$ – потребная (нормативная) концентрация ПВКЖ, %;
 $V_{\text{ост}}$ – объем остатка топлива в баках ВС, м³;
 $K_{\text{ост}}$ – остаточная концентрация ПВКЖ в баках ВС, %;
 V_T – объем заправляемого топлива, м³.

Принимая во внимание, что ПВКЖ, заправленная с АТ, после взаимодействия с различными фазами воды теряет свои свойства и практически утрачивает эффективность действия [4, 5, 7, 14], а также учитывая невозможность оценки концентрации ПВКЖ по всему объему топлива, для гарантированного обеспечения потребной концентрации ПВКЖ окончательная формула приобретает упрощенный вид

$$K = K_{\text{потреб}} \cdot \frac{V_T + V_{\text{ост}} + V_{\text{рукав}}}{V_T}, \quad (3)$$

где $K_{\text{потреб}}$ – потребная (нормативная) концентрация ПВКЖ, %;
 V_T – объем заправляемого топлива, м³;
 $V_{\text{ост}}$ – объем остатка топлива в баках ВС, м³;
 $V_{\text{рукав}}$ – объем топлива в заправочном рукаве, м³.

⁴ Руководство по приему, хранению, подготовке к выдаче на заправку и контролю качества авиационных горюче-смазочных материалов и специальных жидкостей в предприятиях воздушного транспорта РФ. М., 1993. 114 с.

⁵ Порядок производства, поставки в гражданскую авиацию, приема, хранения, выдачи и контроля качества противодокристаллизационной жидкости: методические рекомендации по применению авиа-ГСМ. 2-е изд. М.: ФГУП ГосНИИ ГА, 2021. 22 с.

Таблица 3
Table 3

Расчет требуемой концентрации ПВКЖ для гарантированного обеспечения кондиционности АТ в баках ВС по данному показателю
Calculation of the required AWCF concentration to ensure aviation fuel quality in the aircraft tanks according to this indicator

Номер испытания	Объем топлива в баках ВС до заправки, л	Объем заправляемого АТ в баки ВС, л	Требуемая концентрация ПВКЖ, рассчитанная по формуле (3), %
1	143	857	0,18
2	375	625	0,25
3	420	580	0,27
4	259	741	0,21
5	432	568	0,28
6	680	320	0,49
7	698	302	0,52
8	725	275	0,57
9	852	148	1,06
10	398	602	0,26
11	413	587	0,27
12	526	474	0,33
13	852	148	1,06
14	369	631	0,25
15	542	458	0,34
16	789	211	0,75
17	880	120	1,31
18	662	338	0,47
19	333	667	0,24
20	190	810	0,19
21	810	190	0,83

Обратимся к табл. 2 и рассчитаем потребную для гарантированного обеспечения нормативной (0,15 % об.) концентрацию ПВКЖ для дозирования при заправке ВС по формуле (3), принимая остаток топлива в рукаве равным 50 л (табл. 3).

Безусловно, если остаток топлива в баках ВС содержит некоторое количество ПВКЖ, при новом способе дозирования возможно превышение нормативных значений, но незначительная передозировка со всеми ее указанными в статье негативными моментами все же оказывается предпочтительнее, нежели недостаток, который, в сущности, нивелирует смысл добавления этой присадки.

Также следует отметить, что обеспечение организаций авиатопливообеспечения дозаторами ПВКЖ с управляемым и высокоточ-

ным расходом, в том числе массовыми, на сегодняшний день является легко решаемой задачей.

Заключение

В условиях эксплуатации ВС в России как в самой холодной стране мира использование ПВКЖ является актуальным методом борьбы с обледенением в топливных системах ВС и АД. ПВКЖ добавляют в АТ по требованию заказчика. Для обеспечения кондиционности АТ в баках ВС по концентрации ПВКЖ необходимо использовать ее вариативное дозирование. Способ расчета потребной концентрации ПВКЖ (для обеспечения нормативной концентрации в топливе в баках ВС) весьма прост и предложен в данной статье.

Представляется, что использование такого ввода с применением модернизированных дозаторов позволит повысить надежность работы элементов топливных систем ВС и АД, чувствительных к обледенению (ФТО АД, топливомасляные радиаторы, насосы, клапаны, топливомеры, трубопроводы и пр.), и, соответственно, безопасность полетов. Еще более актуальным может быть способ дозирования с учетом конструктивных особенностей топливных систем конкретных типов ВС и типов АД, однако это требует намного более скрупулезных исследований.

Список литературы

1. Пискунов В.А., Зрелов В.Н. Влияние топлив на надежность реактивных двигателей самолетов: химмотологическая надежность. М.: Машиностроение, 1978. 270 с.
2. Братков А.А., Серегин Е.П., Горенков А.Ф. и др. Химмотология ракетных и реактивных топлив. М.: Химия, 1987. 304 с.
3. Углов Б.А. Эксплуатационные свойства реактивных топлив и надежность авиационных силовых установок: учеб. пособие. Куйбышев: КуАИ, 1986. 68 с.
4. Грядунув К.И. Химмотология авиационных горюче-смазочных материалов: учеб. пособие. М.: ИД Академии Жуковского, 2021. 184 с.
5. Орешенков А.В., Гришин Н.Н. Оценка эффективности действия противодо-кристиаллизационных жидкостей для реактивных топлив // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 217 (7). С. 69–74.
6. Саблина З.А., Широкова Г.Б., Ермакова Т.И. Лабораторные методы оценки свойств моторных и реактивных топлив. М.: Химия, 1978. 238 с.
7. Грядунув К.И. Эксплуатационные свойства авиационных горюче-смазочных материалов: учеб. пособие. М.: ИД Академии Жуковского, 2022. 168 с.
8. Осипов А.О., Осипов О.П. Влияние температуры и концентрации присадки «И-М» на содержание воды в топливе // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 183. С. 34–36.

9. Большаков Г.Ф. Восстановление и контроль качества нефтепродуктов: монография. Л.: Недра, 1974. 320 с.

10. Hitzman D., Shotton J., Alquist H. Biocidal effects of PFA 55MB [Электронный ресурс] // SAE Technical Paper 630261, 1963. DOI: 10.4271/630261 (дата обращения: 25.02.2023).

11. Дайнеко И.В., Ковба Л.В. «Газпром-Аэро» внедрила современные методы контроля микробиологического загрязнения авиационного топлива // АвиаСоюз. 2020. № 5 (82). С. 66–68.

12. Вашуров С.А. Спецжидкости для предотвращения образования кристаллов льда в авиатопливе // АвиаСоюз. 2020. № 5 (82). С. 72–73.

13. Грядунув К.И. Химмотология авиационных ГСМ: учеб.-метод. пособие по выполнению лабораторных работ. Воронеж: МИР, 2022. 71 с.

14. Серегин Е.П. Развитие химмотологии. М.: Первый том, 2018. 880 с.

References

1. Piskunov, V.A., Zrelov, V.N. (1978). The influence of fuels on the reliability of aircraft jet engines: chemmotological reliability. Moscow: Mashinostroyeniye, 270 p. (in Russian)
2. Bratkov, A.A., Seregin, E.P., Gorenkov, A.F. et al. (1978). Chemmotology of rocket and jet fuels. Moscow: Khimiya, 304 p. (in Russian)
3. Uglov, B.A. (1986). Jet fuels operational properties and aviation powerplants reliability: a tutorial. Kuybyshev: KuAI, 68 p. (in Russian)
4. Gryadunov, K.I. (2021). Aviation fuels and lubricants chemmotology: Tutorial. Moscow: Izdatelskiy Dom Akademii Zhukovskogo, 184 p. (in Russian)
5. Oreshenkov, A.V., Grishin, N.N. (2015). Action efficiency estimation of anti-icing additives for aviation fuels. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 217 (7), pp. 69–74. (in Russian)
6. Sablina, Z.A., Shirokova, G.B., Ermakova, T.I. (1978). Laboratory methods for

assessing the properties of motor and jet fuels. Moscow: Khimiya, 238 p. (in Russian)

7. **Gryadunov, K.I.** (2022). Aviation fuels and lubricants operational properties: Tutorial. Moscow: Izdatelskiy Dom Akademii Zhukovskogo, 168 p. (in Russian)

8. **Osipov, A.O., Osipov, O.P.** (2012). The "I-M" additive temperature and concentration influence on water content in fuel. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 183, pp. 34–36. (in Russian)

9. **Bolshakov, G.F.** (1974). Restoration and quality control of petroleum products: Monography. Leningrad: Nedra, 320 p. (in Russian)

10. **Hitzman, D., Shotton, J., Alquist, H.** (1963). Biocidal effects of PFA 55MB. *SAE Technical Paper 630261*. DOI: 10.4271/630261 (accessed: 25.02.2023).

11. **Daineko, I.V., Kovba, L.V.** (2020). Gazprom-Aero has introduced modern methods of control of microbiological contamination of aviation fuel. *AviaSoyuz*, no. 5 (82), pp. 66–68. (in Russian)

12. **Vashurov, S.A.** (2020). Special fluids to prevent the formation of ice crystals in aviation fuel. *AviaSoyuz*, no. 5 (82), pp. 72–73. (in Russian)

13. **Gryadunov, K.I.** (2022). Chemmotology of aviation fuels and lubricants: Educational and methodical manual for performing laboratory work. Voronezh: MIR, 71 p. (in Russian)

14. **Seregin, E.P.** (2018). Development of chemmotology. Moscow: Pervyy tom, 880 p. (in Russian)

Сведения об авторе

Грядунув Константин Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, k.gryadunov@mstuca.aero.

Information about the author

Konstantin I. Gryadunov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aviation Fuel Supply and Aircraft Repair Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, k.gryadunov@mstuca.aero.

Поступила в редакцию	05.03.2023	Received	05.03.2023
Одобрена после рецензирования	26.05.2023	Approved after reviewing	26.05.2023
Принята в печать	21.11.2023	Accepted for publication	21.11.2023

УДК.629.7.067.8

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-33-46

Methodology for plotting the flight planned route change of the aircraft in flight

M.A. Kiselev^{1,2}, Y.S. Kalyuzhny², A.V. Karpov², S.F. Borodkin¹

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

²FAO "State Research Institute of Aviation Systems", Moscow, Russia

Abstract: A significant number of aviation incidents is related to loss of control in flight and controlled flight into terrain (LOC-I, CFIT, LALT categories). Investigation of these aviation incidents has revealed that these incidents often occur due to the need for rapid changes in flight routes as a result of detecting obstacles, such as thunderstorms, along the aircraft's path. During the determination of alternative routes to circumvent the encountered obstacle, as well as during the implementation process of the chosen rerouted route, the flight crew makes errors due to increased psycho-physiological workload and time constraints. This article presents an approach to the automatic rerouting of the aircraft's flight route to avoid obstacles detected during flight. The algorithm proposed by the authors allows for evaluating the safety of the original route, calculating alternative route options to bypass the obstacles encountered during flight, verifying their feasibility considering the aircraft's flight technical characteristics and control parameter limitations, and selecting the optimal rerouted route based on specific criteria, such as minimizing the increase in the flight route length, reducing additional fuel consumption, time required for implementing the new flight route, etc. Examples of rerouting the flight route of a hypothetical aircraft with detected obstacles along the flight path are provided in the article to demonstrate the algorithm's functionality. It is shown, in particular, that in the considered example, the shortest route for obstacle avoidance is not optimal in terms of time. It is also demonstrated that the safety of flying along the identified alternative rerouted routes depends, among other factors, on the selected flight speed. Therefore, for each calculated rerouted route, the algorithm determines a range of speeds within which the implementation of the obtained rerouted route is possible. This highlights the complexity and non-triviality of the pilot's task of autonomously finding a safe obstacle avoidance route on board the aircraft.

Key words: flight plan, obstacle avoidance, flight safety, control synthesis, restriction on control action, fuel efficiency.

For citation: Kiselev, M.A., Kalyuzhny, Y.S., Karpov, A.V., Borodkin, S.F. (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

Методика перестроения маршрута полета воздушного судна в процессе его выполнения

М.А. Киселев^{1,2}, Ю.С. Калюжный², А.В. Карпов²,
С.Ф. Бородкин¹

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

²Федеральное автономное учреждение «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», г. Москва, Россия

Аннотация: Большое количество авиационных происшествий связано с потерей управления в полете, а также со столкновением с землей в управляемом полете (категории LOC-I, CFIT, LALT). В результате расследования данных авиационных происшествий выявлено, что часто указанные авиационные происшествия обусловлены необходимостью быстрого изменения маршрута полета вследствие выявления на пути следования воздушного судна препятствий, например грозового фронта. При определении альтернативных маршрутов облета возникшего препятствия, а также в процессе реализации выбранного маршрута облета экипаж совершает ошибки ввиду повышенной психофизиологической нагрузки и дефицита времени. В данной статье представлен подход к автоматическому перестроению маршрута полета

воздушного судна для облета обнаруженных в процессе полета препятствий. Предлагаемый авторами алгоритм позволяет оценить безопасность исходного маршрута, рассчитать варианты альтернативных маршрутов облета обнаруженных в процессе полета препятствий, проверить их на реализуемость с учетом летно-технических характеристик воздушного судна, ограничений на управляющие параметры, а также выбрать среди найденных маршрутов облета оптимальный с точки зрения какого-либо критерия, например исходя из минимизации увеличения протяженности маршрута полета, сокращения дополнительных затрат топлива, времени, необходимого на реализацию нового маршрута полета, и т. д. Для демонстрации работоспособности алгоритма в статье представлены примеры перестроения маршрута полета гипотетического воздушного судна с выявленными на пути следования препятствиями. Показано, в частности, что в рассмотренном примере самый короткий маршрут облета препятствий не является оптимальным с точки зрения временных затрат. Также демонстрируется, что безопасность пролета по найденным альтернативным маршрутам облета препятствий зависит в том числе от выбранной скорости полета. Поэтому для каждого рассчитанного маршрута облета препятствий алгоритм определяет диапазон скоростей, в котором возможна реализация полученного маршрута облета препятствий. Последнее указывает на сложность и нетривиальность самостоятельного решения задачи поиска безопасного маршрута облета препятствий пилотом на борту воздушного судна.

Ключевые слова: маршрут полета, облет препятствий, безопасность полета, синтез управления, ограничение на управление, топливная эффективность.

Для цитирования: Киселев М.А. Методика перестроения маршрута полета воздушного судна в процессе его выполнения / М.А. Киселев, Ю.С. Калужный, 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

Introduction

According to flight accident statistics for 2011–2020¹, a significant number of such accidents for civil aircraft is related to such groups of events as loss of control in flight (LOC-I) and controlled flight into terrain (CFIT), and LOC-1, CFIT and LALT for helicopters (fig. 1–4). Analysis of the following accidents has shown that the lack of full crew situational awareness, along with errors due to increased psycho-physiological workload [1, 2] and time constraints for decision-making [3]. In these terms the prior potentially dangerous flight situation identification along with calculating alternative route options in order to choose a route for its performance seems to be relevant. Particularly, automatic re-routing of the aircraft's flight route to avoid obstacles detected during flight, threatening the aircraft safety, such as terrestrial natural or artificial object [4], thunderstorm, showers [5], etc. is of undoubtful practical interest.

The crew currently plans flights by means of a flight management computer (FMC). FMC is an airborne computer with relevant air navigation database [6], including air routes, standard departure procedures, arrival and final approach,

airfields, and also directory data, for instance, coupling and navigation frequencies [7]. Respectively, the crew plans its flight^{2,3} essentially plotting through the given waypoints together: choosing the departure airfield, runway and takeoff heading given by the air traffic controller, standard departure and airway for the following flight. After that the arrival airfield, runway and landing heading are given and the procedures for the following heading and runway are chosen [8]:

- Arrival Route;
- Initial Approach Segment;
- Intermediate Approach Segment;
- Final Approach Segment;
- Missed Approach.

It is clear from above mentioned, that the crew plans the route by the given scenario, provided that there are no unknown obstacles and restricted flight zones. Nevertheless, the aircraft may deviate from the initial plan during the flight due to wide range of reasons. Besides that, the dangerous weather conditions may occur on

¹ The analyses of the civil aviation flight safety in 2020. (2021). FAVT Rosaviatsia, 35 p. (in Russian)

² Doc 8168/OPS/611: Procedures for air navigation services-aircraft operations. (2006). 3rd ed. ICAO, vol. 1, Flight Procedures, 386 p.

³ Doc 8168/OPS/611: Procedures for air navigation services-aircraft operations. (2006). 3rd ed. ICAO, vol. 2, Construction of Visual and Instrument Flight Procedures, 880 p.



Fig. 1. Types of events that determined aviation accidents with commercial aircraft in 2011–2020



Fig. 2. Types of events that determined aviation accidents with commercial aviation helicopters in 2011–2020

the route. For instance, deviations from the helicopter and general aviation aircraft flight plan may lead to natural or artificial obstacle occurrence along the route. Despite the existence of on-board systems [9, 10] providing the data on obstacles and restrictions along the route and dangerous weather conditions to the crew, the crew has no instrument of automatic rerouting for the obstacle safe avoidance, considering the aircraft limitations and characteristics, which can lead (and leads) to fatal consequences in above mentioned time constraints circumstances. Such an instrument should obviously be integrated

into the FMC basic part, be one of its modes and provide:

- 1) determination of alternative routes majority, providing obstacles avoidance at safe distance in automatical or direct modes considering the aircraft characteristics and limitations;
- 2) determination of the best routes among the alternative ones by the given criteria, for instance, from a point of view of minimizing the extra time and fuel consumption, lateral deviations, etc. on the initial route.

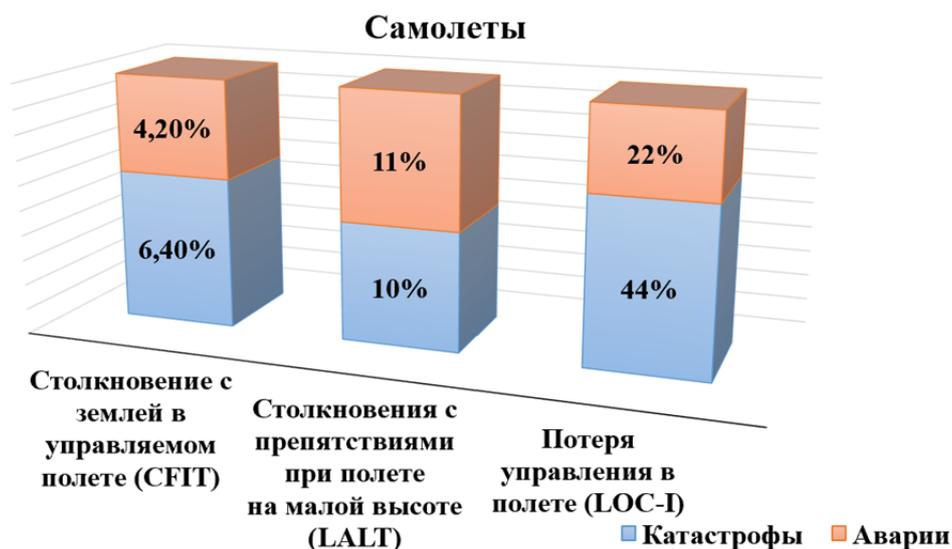


Fig. 3. Types of events that determined aviation accidents with general aviation aircraft in 2011–2020

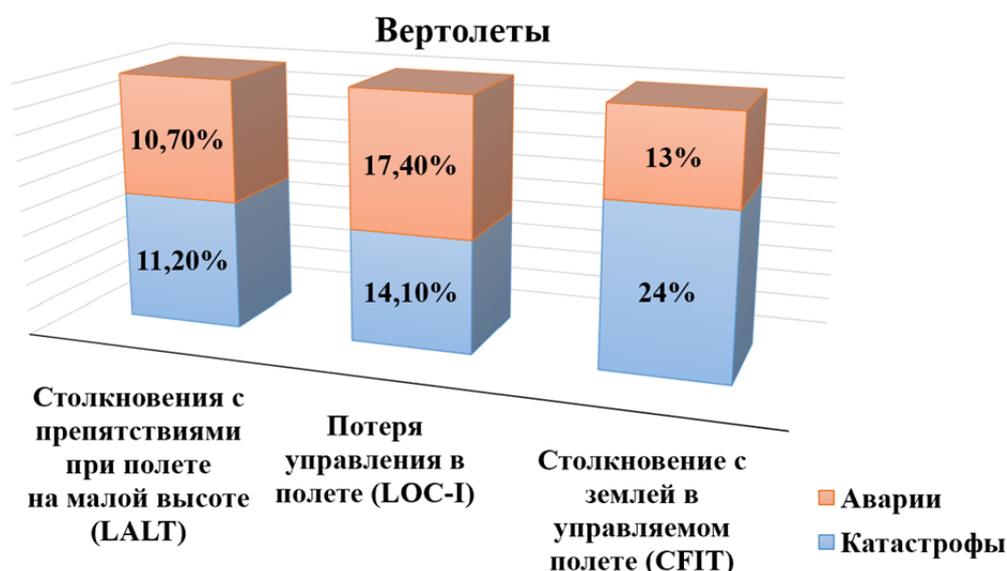


Fig. 4. Types of events that determined aviation accidents with general aviation helicopters in 2011–2020

Setting the problem

Let:

1) flight route be given by the initial route point $\{X_0\}$; pass (turning) route points $\{X_1\}, \{X_2\}, \dots, \{X_{n-1}\}$; final route points $\{X_n\}$, where $X_i = (x_{gi}, y_{gi}, z_{gi})$ are the route points coordinates in normal terrestrial coordinate system [11];

2) obstacles be given by the multitude of points: $\{X_{np1}\}, \dots, \{X_{npm}\}$;

3) the aircraft flight be described by the system of differential equations [11]

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = g(n_{xa} - \sin\theta), \\ \frac{d\theta}{dt} = \frac{g}{V}(n_{ya}\cos\gamma_a - \cos\theta), \\ \frac{d\Psi}{dt} = -\frac{g}{V\cos\theta}n_{ya}\sin\gamma_a, \\ \frac{dx_g}{dt} = V\cos\theta\cos\Psi, \\ \frac{dy_g}{dt} = V\sin\theta, \\ \frac{dz_g}{dt} = -V\cos\theta\sin\Psi, \\ \frac{dm}{dt} = -c_s, \end{cases}$$

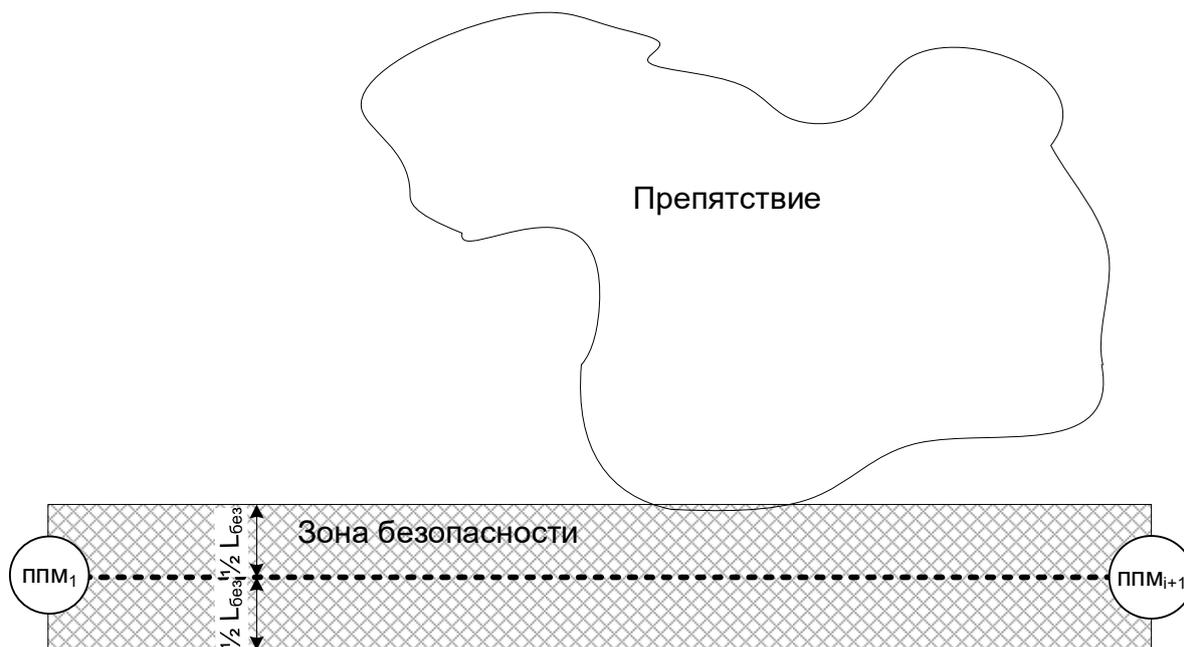


Fig. 5. Safety zone

where V is aircraft speed; θ, Ψ, γ_a are path, route and bank angles; x_g, y_g, z_g are aircraft coordinates in a normal terrestrial coordinate system;

g is downward acceleration; n_{ya}, n_{xa} are normal speed and flight path acceleration, calculated as

$$n_{xa} = \frac{P \cos(\alpha + \varphi_{дв}) - c_{xa} \frac{\rho V^2 S}{2}}{mg}, \quad n_{ya} = \frac{c_{ya} \frac{\rho V^2 S}{2} + P \sin(\alpha + \varphi_{дв})}{mg};$$

α – angle of attack; $\varphi_{дв}$ – engine angle of attack; $P = f(V, H, \alpha_{руд})$ – powerplant thrust; $\alpha_{руд}$ – throttle control lever position, determining the engine mode; $c_{ya} = f(\alpha)$ – lift coefficient; $c_{xa} = c_{xa}(c_{ya})$ – drag coefficient; $c_{xa}(c_{ya})$ – aircraft polar curve; ρ – air density; m – aircraft mass; S – wing area; c_s – fuel flow rate. Values $n_{ya}, \gamma_a, \alpha_{руд}$ are used as control functions;

4) limits for flight height and speed, normal speed acceleration and speed bank angle value and rate of change are given:

$$\begin{cases} V_{\min} \leq V(t) \leq V_{\max}, \\ H(t) \geq H_{\min}, \\ n_{ya \min} \leq n_{ya}(t) \leq n_{ya \max}, \\ |\dot{n}_{ya}(t)| \leq \dot{n}_{ya \max}, \\ |\dot{\gamma}_a(t)| \leq \dot{\gamma}_{a \max} \end{cases}$$

5) provided the altitude and speed characteristics of engine unit $P = f(V, y_g, \alpha_{руд})$.

It is necessary to:

- 1) estimate the route safety by reference to minimum shortest distance between the route and obstacle allowed (fig. 5);
- 2) determine the alternative safe routes from the initial to final point whether the initial route is dangerous;
- 3) determine the probable speed of flight via alternative routes;
- 4) to choose the best possible route by the given criterion.

Research methodology

There is the algorithm for searching a safe obstacle avoidance route in Figure 6.

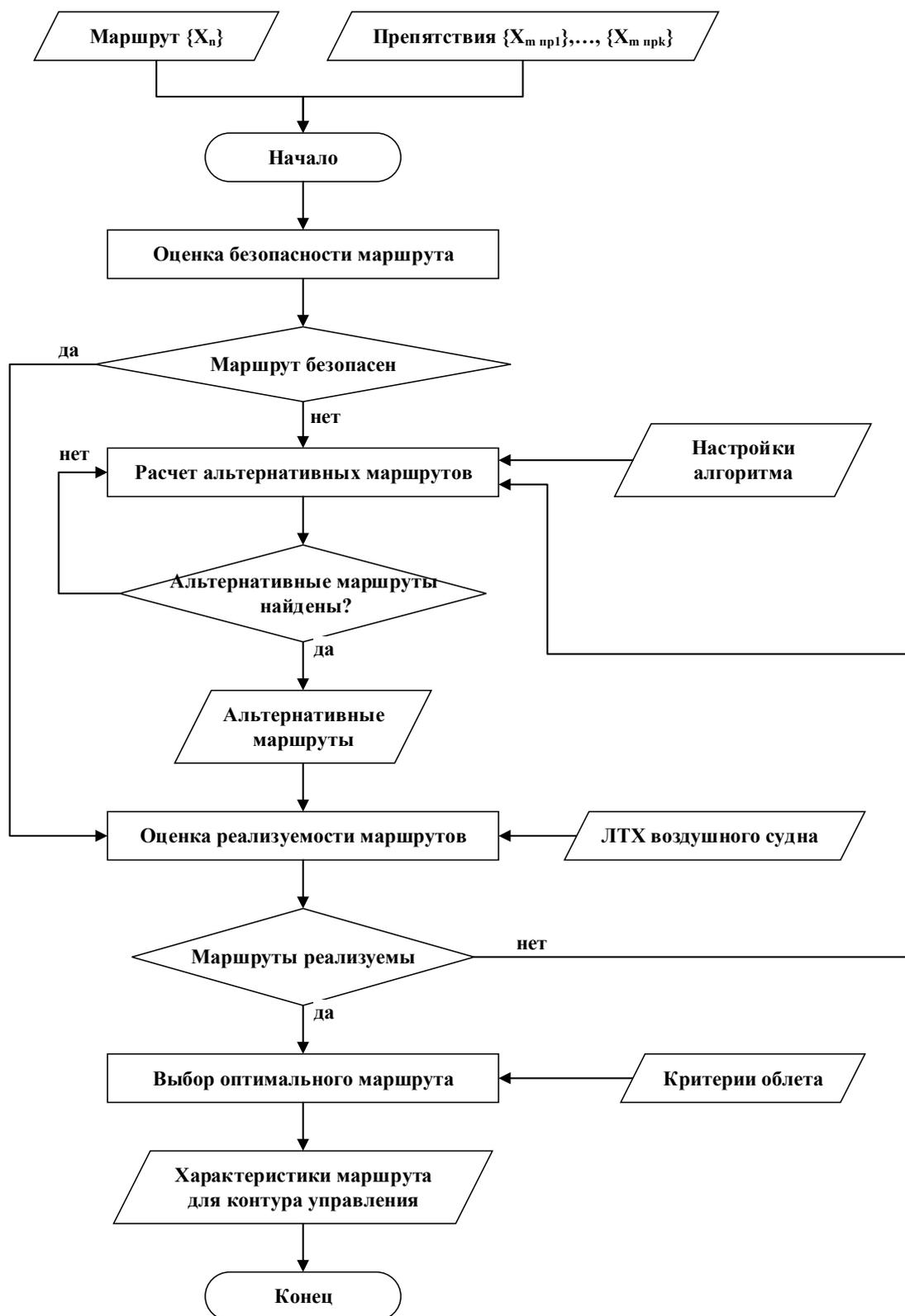


Fig. 6. Scheme of the main part of the algorithm

The algorithm incoming data are the route initial points $\{X_n\}$ and obstacle profile points $\{X_{m пр1}\}, \dots, \{X_{m прk}\}$, along with aircraft performance.

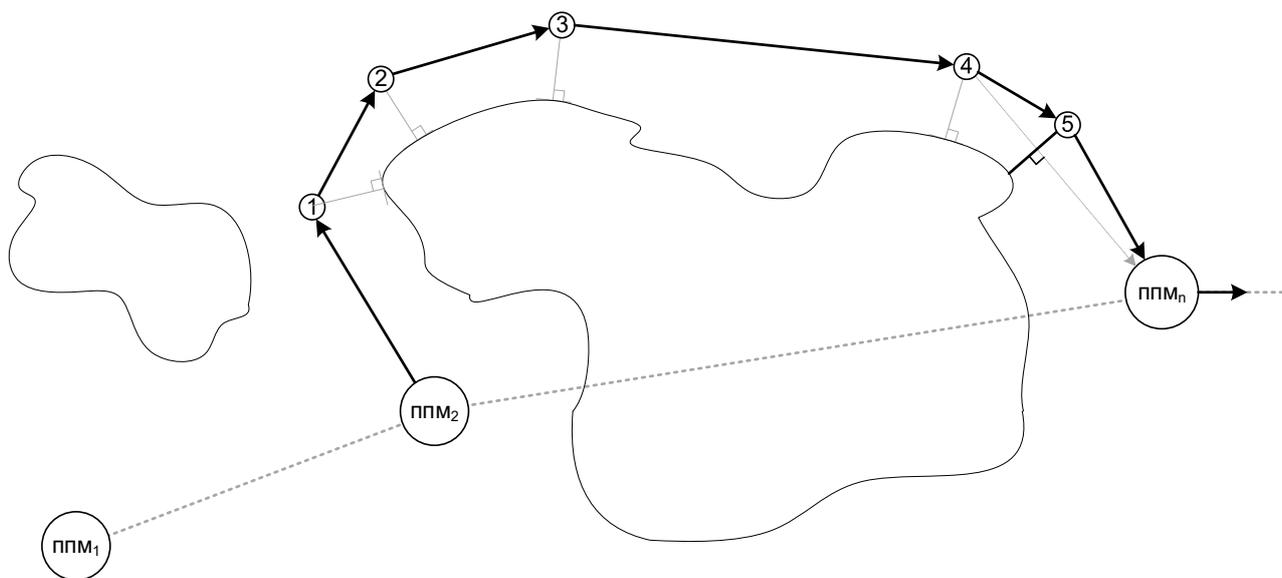


Fig. 7. Route search beam rotation

Let us specify the algorithm key peculiarities.

Route safety estimation is an estimation of an obstacle penetrating cylinder-shaped figure with a given radius. The radius determines the safe distance from the obstacle, which depends, for instance, on the probable aircraft deviation from the route.

Route performability estimation is a multiple aircraft displacement equations integration procedure considering the restrictions mentioned above provided the different aircraft flight speeds. The synthesis control algorithm [12] is used for it, which then allows to estimate the safe avoidance probability with a given speed, deviating from the initial route line not exceeding the given value, considering the aircraft performance and control parameters restrictions. The control parameters, necessary for route performance, exactly acceleration, banking and α_{pyd} are the algorithm outcoming data.

Alternative routes determination is a procedure, based on a subsequent search of a new route point by rotating the beam from the current route point from the initial flight destination to its collision with an obstacle and then shifting the contact point to the given distance from an obstacle considering the minimum shortest distance between the route and obstacle allowed (fig. 7).

The best possible route choice is made after determining the multitude of alternative route basing on flight operator criteria [13].

After route choice its parameters are coordinated with air traffic control [14] and are proceeded to trajectory autopilot loop for automatic or direct mode implementation.

Results of the research

The present paper introduces the results of a model problem of obstacle avoidance by the hypothetical aircraft in horizontal plane below for two cases:

- 1) assumption concerning the constant speed along the route;
- 2) the maximum possible flight speed in every path point by reference to aircraft performance, control parameters restrictions and maintaining safe distance from the obstacle.

The following restrictions are settled while research:

- 1) g-rating allowed is $-1 \dots +2.5$;
- 2) maximum acceleration speed change allowed is 1 un/s ;
- 3) bank range allowed is $-30^\circ \dots 30^\circ$;
- 4) maximum bank angle rate change allowed is $100^\circ/\text{s}$.

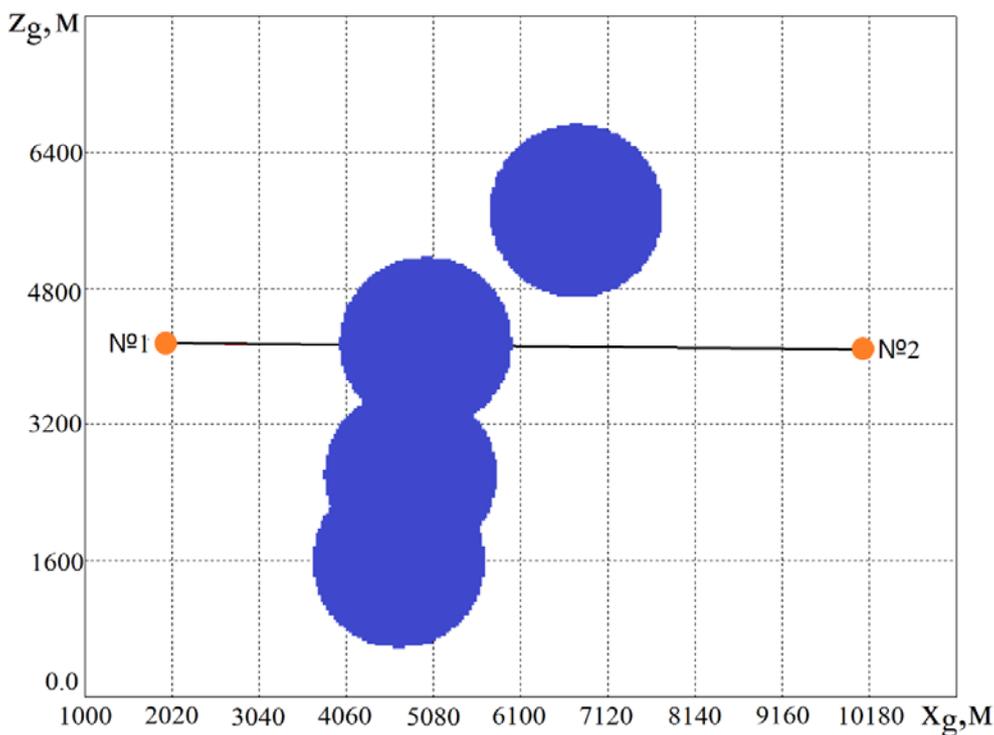


Fig. 8. Starting route and obstacle

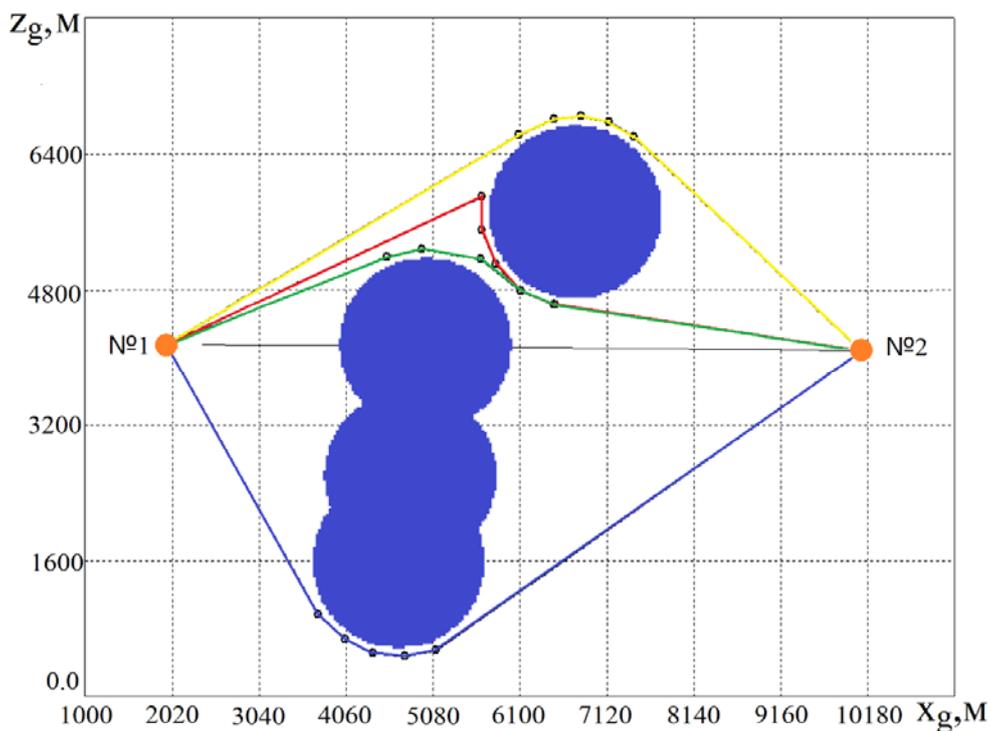


Fig. 9. Obstacle avoidance options at constant speed

The initial flight route in Figure 8 are given by points 1 and 2.

The determined safe obstacle avoidance routes at constant speed along the route are shown in Figure 9.

Discussion of the results

Safe obstacle avoidance route at a constant speed possess the following characteristics:

1) route 1 (marked yellow):

- route length is 9936 m;
- maximum safe speed of flight en-route is 285 km/h;
- g-rating within 0.8...1.4;
- bank angle within 30°...15°;
- estimated time en-route is 126 s;

2) 2 (marked red):

- route length is 9430 m;
- maximum safe speed of flight en-route 70 km/h;
- g-rating within 0.66...1.4;
- bank angle within -26°...3.5°;
- estimated time en-route is 486 s;

3) 3 (marked green):

- route length 8593 m;
- maximum safe speed of flight en-route is 220 km/h;
- bank angle within 0.6...1.5;
- bank angle within -30°...30°;
- estimated time en-route is 126 s;

4) 4 (marked blue):

- route length is 11327 m;
- maximum safe speed of flight en-route is 295 km/h;
- g-rating within 0.6...1.45;
- bank angle within of -15°...30°;
- estimated time en-route is 139 s;

By reference to above mentioned characteristics, we can make a conclusion that route 3 is the best possible from the minimum length point of view, although route 1 is the one from flight time minimization point of view, as it allows to perform the more flight constant speed due to its more flowing path, which finally gives time advantage.

Safe obstacle avoidance routes with speed⁴ changing along the flight path and restricted minimum flight speed of 250 km/h possess the following characteristics:

1) 1 (marked yellow):

- route length is 9936 m;
- maximum/minimum speed en route is 505/284 km/h;
- g-rating within 0.75...1.4;
- estimated time en-route is 105 s;

2) 2 (marked red):

- route length is 9430 m;
- route performance at a minimum speed restricted to 250 km/h is impossible;

3) 3 (marked green):

- route length is 8593 m;
- route performance at a minimum speed restricted to 250 km/h is impossible;

4) 4 (marked blue):

- route length is 11327 m;
- maximum/minimum speed en route is 485/294 km/h;
- g-rating within 0.4...1.29;
- estimated time en-route at a maximum speed is 123 s.

There is route 3 path at allowed speed at a path of 250 km/h in Figure 10. It is clear that performance impossibility of the route is related to bank limit (fig. 11). In this case aircraft has to quit the given route, which leads to prohibitive obstacle proximity. There are flight results on route 3 at 200 km/h speed in Figure 12. It is clear that reduction of speed provides the given route performance opportunity. There are control parameters for such a case in Figure 13.

⁴ The maximum speed allowed is performed in every path point by reference to aircraft performance data, control parameters restrictions and keeping safe distance from the obstacle.

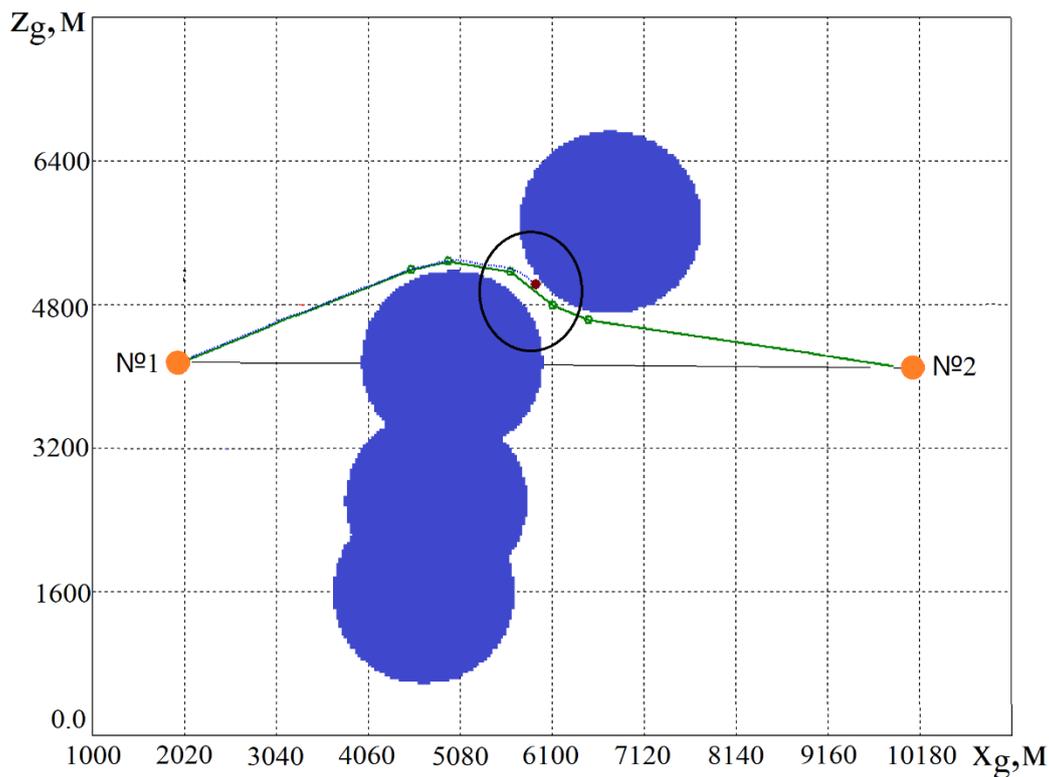


Fig. 10. Checking the route for feasibility at a speed of 250 km/h

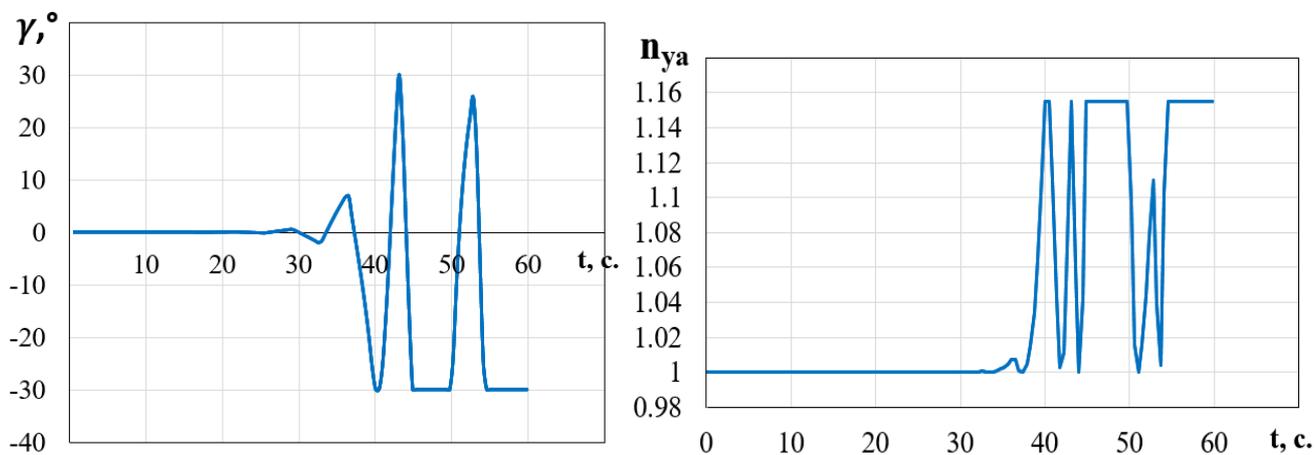


Fig. 11. Graph of change in normal overload when moving along the route at a speed of 250 km/h to the vanishing point

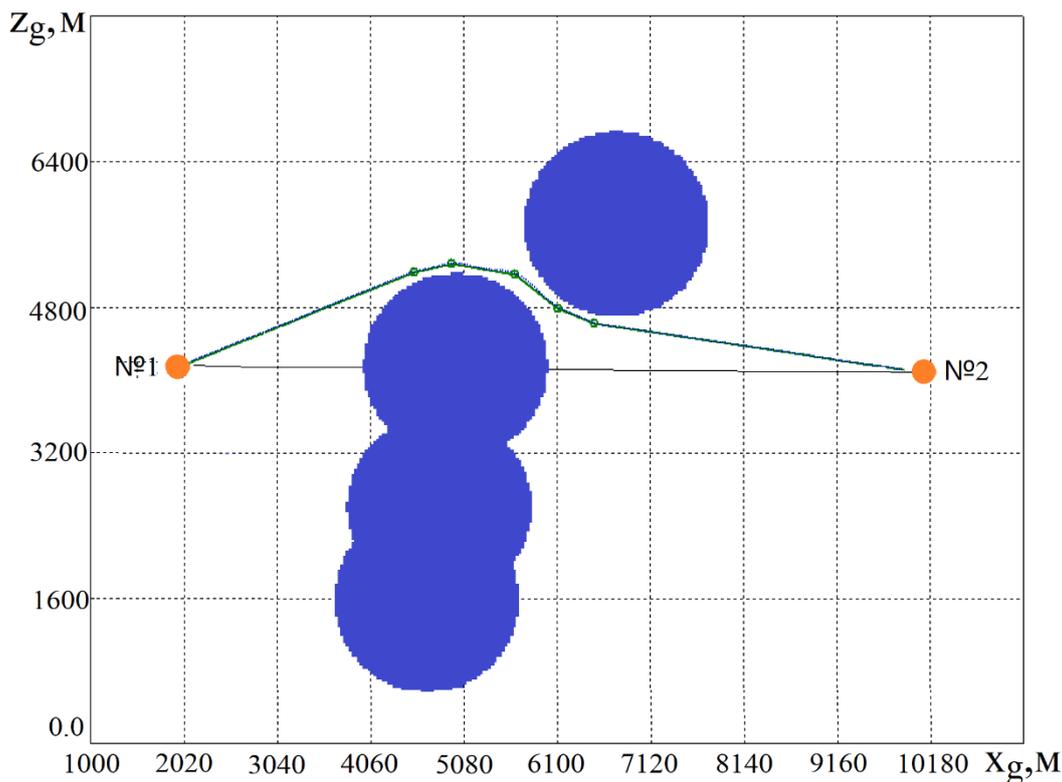


Fig. 12. Checking the route for feasibility at a speed of 200 km/h

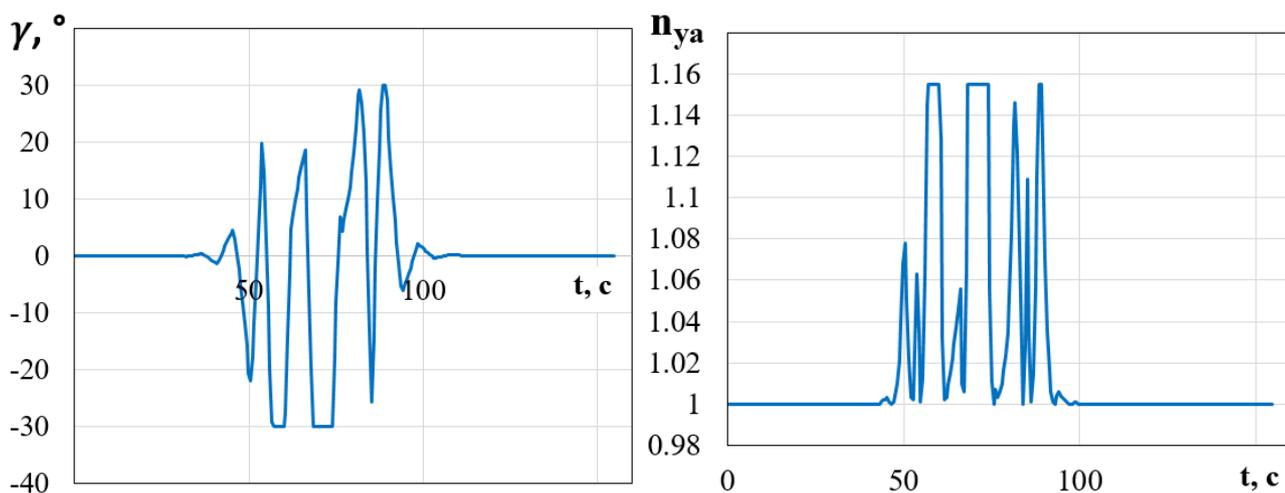


Fig. 13. Graph of changes in normal overload when moving along the route at a speed of 200 km/h

Conclusion

Flight accidents statistics analysis in LOC-I, CFIT, LALT shows their high level of occurrence for civil aircraft. In these terms the prior potentially dangerous flight situation identifica-

tion along with calculating alternative route options in order to choose a route for its performance seems to be relevant. Automatic rerouting of the aircraft's flight route to safely avoid obstacles detected during flight according to the chosen criteria seems to be relevant in order to decrease the number of such accidents.

There is the algorithm, providing the multitude of alternative safe routes performed by the given aircraft with marking the best possible ones by the chosen obstacle avoidance criteria and route safety estimation basing on current route data and obstacle coordinates, in this article.

The given aircraft flight dynamics modelling numerical numbers confirm the algorithm performance capability, particularly, for obstacle avoidance in horizontal plane or at changing (maximum allowed) speed at flight path.

It is supposed to continue the research in order to estimate the following approach performance capability in terms of making obstacle clearance in vertical plane and in the airspace.

References

1. **Gorbunov, V.V.** (2009). Peculiarities of some psycho-physiologic parameters change in pilots experiencing variable work and rest modes in long flights. *Meditsina truda i promyshlennaya ekologiya*, no. 5, pp. 5–9. (in Russian)
2. **Lyssakov, N.D.** (2014). Psychological aspects of human factor in aviation. *Vestnik Universiteta*, no. 2, pp. 250–253. (in Russian)
3. **Shumilov, I.S.** (2006). Aviation accidents. Causes and prevention options. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman, 384 p. (in Russian)
4. **Stevenson, G., Verdun, H.R., Stern, P.H., Koechner, W.** (1995). Testing the helicopter obstacle avoidance system. In: *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, pp. 93–103. DOI: 10.1117/12.212025
5. **Bogatkin, O.G.** (2009). Fundamentals of aviation meteorology: Textbook. St. Petersburg: RGGMU, 339 p. (in Russian)
6. **Gaska, T., Watkin, C., Chen, Y.** (2015). Integrated modular avionics – past, present, and future. In: *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 30, no. 9, pp. 12–23. DOI: 10.1109/MAES.2015.150014
7. **Chuyanov, G.A., Kosyanchuk, V.V., Selvesyuk, N.I.** (2013). Prospects of development of complex onboard equipment on the basis of integrated modular avionics. *Izvestiya SFEDU. Engineering Sciences*, no. 3 (140), pp. 55–62. (in Russian)

8. **Shchepilov, Yu.N.** (2013). Construction of airfield schemes: Textbook. St. Petersburg: SPBGU GA, 120 p. (in Russian)

9. **Dudnik, P.I., Kondratenkov, G.S., Tatarsky, B.G., Ilchuk, A.R., Gerasimov, A.A.** (2006). Aviation radar complexes and systems. Moscow: VVIA im. prof. N.Ye. Zhukovskogo, 1112 p. (in Russian)

10. **Shao, M-L., Yan, R-J., Wu, J. et al.** (2016). Sensor-based exploration for planar two-identical-link robots. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 230, issue 4, pp. 655–664. DOI: 10.1177/0954406215618684

11. **Levitskiy, S.V., Sviridov, N.A.** (2008). Flight dynamics: Textbook for Universities. Moscow: VVIA im. prof. N.Ye. Zhukovskogo, 527 p. (in Russian)

12. **Kiselev, M.A., Kostin, A.M., Tyumenov, V.R.** (2008). To optimization of trajectory movement management of the plane. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 125, pp. 138–145. (in Russian)

13. **Levickiy, S.V., Levickaya, E.V.** (2014). The methods of assessment of transportation efficiency of a passenger aircraft. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 205, pp. 99–106. (in Russian)

14. **Ahrenhold, N., Stasicka, I., Abdellaoui, R., Mühlhausen, T., Temme, M.-M.** (2023). Enabling green approaches by FMS-AMAN coordination. *Aerospace*, vol. 10, issue 3, p. 278. DOI: 10.3390/aerospace10030278/ (accessed: 04.01.2023).

Список литературы

1. **Горбунов В.В.** Особенности изменения некоторых психофизиологических показателей летчика при различных режимах труда и отдыха в длительных полетах // Медицина труда и промышленная экология. 2009. № 5. С. 5–9.
2. **Лысаков Н.Д.** Психологические аспекты человеческого фактора в авиации // Вестник университета. 2014. № 2. С. 250–253.

3. **Шумилов И.С.** Авиационные происшествия. Причины возникновения и возможности предотвращения. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 384 с.

4. **Stevenson G.** Testing the helicopter obstacle avoidance system / G. Stevenson, H.R. Verdun, P.H. Stern, W. Koechner // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 1995. Pp. 93–103. DOI: 10.1117/12.212025

5. **Богаткин О.Г.** Основы авиационной метеорологии: учебник. СПб.: РГГМУ, 2009. 339 с.

6. **Gaska T., Watkin C., Chen Y.** Integrated modular avionics – past, present, and future // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2015. Vol. 30, no. 9. Pp. 12–23. DOI: 10.1109/MAES.2015.150014

7. **Чуянов Г.А., Косьянчук В.В., Сельвсюк Н.И.** Перспективы развития комплексов бортового оборудования на базе интегрированной модульной авионики // Известия ЮФУ. Технические науки. 2013. № 3 (140). С. 55–62.

8. **Щепилов Ю.Н.** Построение аэродромных схем: учеб. пособие. СПб.: СПбГУ ГА, 2013. 120 с.

9. **Дудник П.И.** Авиационные радиолокационные комплексы и системы: учебник

для вузов / П.Н. Дудник, Г.С. Кондратенков, Б.Г. Татарский, А.Р. Ильчук, А.А. Герасимов. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2006. 1112 с.

10. **Shao M-L., Yan R-J., Wu J. et al.** Sensor-based exploration for planar two-identical-link robots // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2016. Vol. 230, iss. 4. Pp. 655–664. DOI: 10.1177/0954406215618684

11. **Левицкий С.В., Свиридов Н.А.** Динамика полета: учебник для вузов. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2008. 527 с.

12. **Киселев М.А., Костин А.М., Тюменев В.Р.** К оптимизации управления траекторным движением самолета // Научный Вестник МГТУ ГА. 2008. № 125. С. 138–145.

13. **Левицкий С.В., Левицкая Е.В.** Методика оценки транспортной эффективности магистрального пассажирского самолета // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 205. С. 99–106.

14. **Ahrenhold N.** Enabling green approaches by FMS-AMAN coordination / N. Ahrenhold, I. Stasicka, R. Abdellaoui, T. Mühlhausen, M.-M. Temme [Электронный ресурс] // Aerospace. 2023. Vol. 10, iss. 3. P. 278. DOI: 10.3390/aerospace10030278/ (дата обращения: 04.01.2023).

Information about the authors

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.aero.

Yury S. Kalyuzhny, Lead Engineer of the State Research Institute of Aviation Systems, yury.kalyuzhny@gmail.com.

Andrey V. Karpov, Lead Engineer of the State Research Institute of Aviation Systems, ya.karanvik@gmail.com.

Sergey F. Borodkin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aerodynamics, Design and Aircraft Strength Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, s.borodkin@mstuca.aero.

Сведения об авторах

Киселев Михаил Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой аэродинамики конструкции и прочности летательных аппаратов МГТУ ГА, m.kiselev@mstuca.aero.

Калюжный Юрий Сергеевич, ведущий инженер ФАУ «ГосНИИАС»,
yury.kalyuzhny@gmail.com.

Карпов Андрей Викторович, ведущий инженер ФАУ «ГосНИИАС»,
ya.karanvik@gmail.com.

Бородкин Сергей Филиппович, кандидат технических наук, доцент кафедры аэродинамики конструкции и прочности летательных аппаратов МГТУ ГА, s.borodkin@mstuca.aero.

Поступила в редакцию	16.06.2023	Received	16.06.2023
Одобрена после рецензирования	27.06.2023	Approved after reviewing	27.06.2023
Принята в печать	21.11.2023	Accepted for publication	21.11.2023

УДК: 351.814.33

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-47-57

Особенности организации планирования использования воздушного пространства в Российской Федерации на примере Московской воздушной зоны

В.К. Печенежский¹, Е.К. Чуви́ковская¹

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

Аннотация: Для решения задач по увеличению пропускной способности секторов обслуживания воздушного движения (ОВД), предполагается задействовать ряд мер регулирования потоков воздушного движения на этапах стратегического и предтактического планирования. На практике применение таких мер оказывается малоэффективным в связи с отклонением параметров фактических полетов от заявленных при подаче планов полетов. Цель настоящего исследования состоит в выявлении основных проблем в системе планирования воздушного движения для последующего предложения мер по совершенствованию регулирования потоков воздушного движения (ВД) и недопущению конфликтных ситуаций (КС) на этапах стратегического и предтактического планирования. Для достижения поставленной цели были проанализированы основные документы планирования ВД, проведен анализ параметров полета на разных этапах планирования на примере Московского зонального центра Единой системы организации воздушного движения (МЗЦ ЕС ОрВД). Анализ основных документов, регламентирующих планирование воздушного движения (ПВД) в РФ и рекомендаций ИКАО показывает сложности в согласовании и обмене информацией между заинтересованными сторонами в использовании воздушного пространства РФ. Рассчитаны отклонения от расписания при прилете/вылете воздушных судов на примере аэропорта Домодедово. Проанализировано количество поданных и отмененных заявок на использование воздушного пространства при планировании ВД в МЗЦ ЕС ОрВД. Проведенные исследования позволяют сделать вывод о состоянии системы организации планирования ВД и обосновать нецелесообразность выявления и предотвращения КС на этапе предтактического планирования. В ходе исследований были выявлены основные недостатки организации планирования ВД в РФ, которые могут оказывать существенное негативное воздействие на безопасность и экономическую эффективность полетов воздушных судов.

Ключевые слова: организация потоков воздушного движения, план полетов, центры планирования воздушного движения, конфликтные ситуации, стратегическое планирование, предтактическое планирование.

Для цитирования: Печенежский В.К., Чуви́ковская Е.К. Особенности организации планирования использования воздушного пространства в Российской Федерации на примере Московской воздушной зоны // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 6. С. 47–57. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-47-57

Features of the organizational concept of airspace management planning in the Russian Federation on the example of the Moscow airspace

V.K. Pechenezhsky¹, E.K. Chuvikovskaya¹

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

Abstract: In order to solve the tasks of increasing capacity of the air traffic service sectors (ATS), it is planned to use a number of measures to regulate air traffic flows at the stages of strategic and pre-tactical planning. In practice, the application of such measures is ineffective due to the deviation of the parameters of actual flights from those stated when submitting flight plans. The purpose of this study is to identify the main problems in the air traffic planning organization for the subsequent proposal of measures to improve the regulation of air traffic flows and prevent conflict situations at the stages of strategic and pre-tactical planning. To achieve this goal, the key documents of air traffic planning were analyzed, the analysis of flight parameters at different stages of planning was conducted on the example of the Moscow Area Center of the Unified Air Traffic Management System (UATMS).

The review of the key documents regulating air traffic planning in the Russian Federation and the ICAO recommendations shows difficulties in coordinating and exchanging information between the parties concerned in the Russian Federation airspace management. Deviations from the schedule during the aircraft arrival/departure are calculated using the example of Domodedovo Airport. The number of submitted and canceled applications for the airspace management (ASM) during the air traffic planning in the Moscow Area Center of the UATMS is analyzed. The conducted studies allow us to draw up a conclusion about the state of the air traffic planning system and justify the inexpediency of detecting and preventing conflict situations at the stage of pre-tactical planning. The research revealed the obvious shortcomings of air traffic management in the Russian Federation, which can have a significant negative impact on the safety and economic efficiency of aircraft flights.

Key words: Air traffic flow management, flight plan, air traffic planning centers, conflict situations, strategic planning, pre-tactical planning.

For citation: Pechenezhskij, V.K., Chuvikovskaya, E.K. (2023). Features of the organizational concept of airspace management planning in the Russian Federation on the example of the Moscow airspace. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 6, pp. 47–57. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-47-57

Введение

Постоянный рост спроса на воздушное пространство в Московской зоне до начала 2022 года выдвигал на первый план проблемы в области планирования воздушного движения. Грамотный подход к планированию воздушного движения позволяет решать проблемы превышения пропускной способности (ПС) секторов обслуживания воздушного движения (ОВД) и возможных конфликтных ситуаций (КС) между воздушными судами уже на этапе стратегического и предтактического планирования, что невозможно при отклонении параметров рабочих планов полета и фактических.

Целью настоящего исследования является выявление основных проблем в системе планирования воздушного движения (ПВД), разработка и обоснование мер по совершенствованию регулирования потоков воздушного движения (ВД) и недопущению конфликтных ситуаций на этапах стратегического и предтактического планирования.

Для достижения указанной цели проведен анализ основных документов, регламентирующих подход к планированию воздушного движения в РФ, на предмет их соответствия рекомендациям ИКАО, а именно приложению ICAO 6, приложению ICAO 11, документам ICAO 4444, 8168, 9971. Выполнен сбор и обработка статистических данных параметров фактически выполненных полетов и их сравнение с заявленной плановой информацией на примере Московского зональ-

ного центра Единой системы организации воздушного движения (МЗЦ ЕС ОрВД) и аэропорта Домодедово.

Большой объем информации, необходимый для планирования использования воздушного пространства (ПИВП), поступает от разных заинтересованных сторон [1]. Так как все они используют разное программное обеспечение для планирования полетов, возникает проблема согласованности поданной информации для ее дальнейшего использования в целях ОВД [2, 3].

Приведенные в статье исследования позволяют выявить основные недостатки в системе планирования полетов в РФ, избавившись от которых в дальнейшем можно будет повысить безопасность и экономическую эффективность полетов.

Анализ заявок при планировании воздушного движения в Московском зональном центре Единой системы организации воздушного движения

Для количественного анализа поданных и обработанных заявок в МЗЦ ЕС ОрВД были использованы статистические данные за 2020 год. При обработке статистики по полетам в воздушном пространстве (ВП) Московской зоны ЕС ОрВД были получены следующие результаты.

В МЗЦ ЕС ОрВД в 2020 году было подано 295 206 заявок на ИВП, при этом аннулировано 88 924 из них, что составляет 30 % от

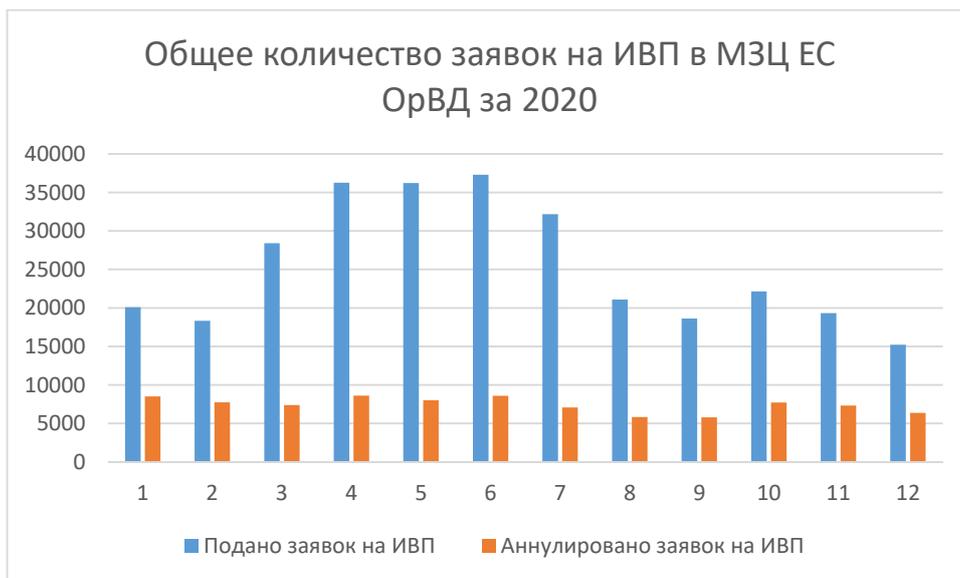


Рис. 1. Общее количество заявок на ИВП в МЗЦ ЕС ОрВД за 2020 год
Fig. 1. Total number of applications for the ASM in the Moscow Area Center of the Unified ATM system for 2020

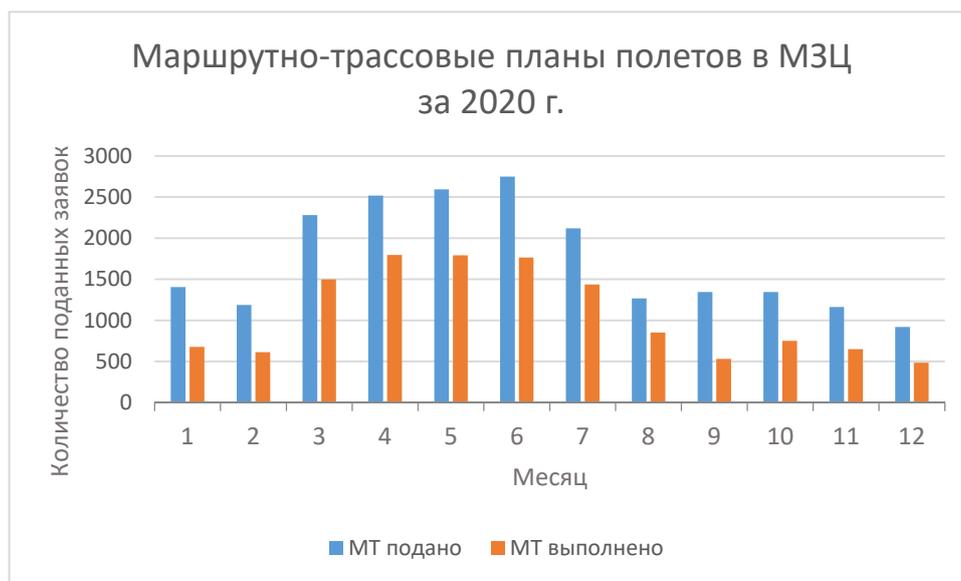


Рис. 2. Маршрутно-трассовые планы полетов в МЗЦ за 2020 год
Fig. 2. Route and local air routes flight plans in the Moscow Area Center of the Unified ATM system for 2020

общего количества. Заявки аннулируются по следующим причинам:

- неправильное оформление;
- нарушение срока подачи;
- отсутствие своевременного подтверждения на ИВП;
- метеоусловия.

Из графика 1 (рис. 1) видно, что от 25 до 50 % заявок аннулируются на этапе предтактического планирования (менее чем за 2 суток до начала ИВП, но не позднее его нача-

ла), и, следовательно, подобные рейсы не выполняются.

Данные по маршрутным и маршрутно-трассовым полетам представлены на графиках 2 и 3 (рис. 2, 3).

Анализ данных, представленных на графиках 2 и 3, показывает, что чуть менее половины полетов от запланированных не выполняется. В среднем за 2020 год было выполнено 61 % от поступивших заявок для

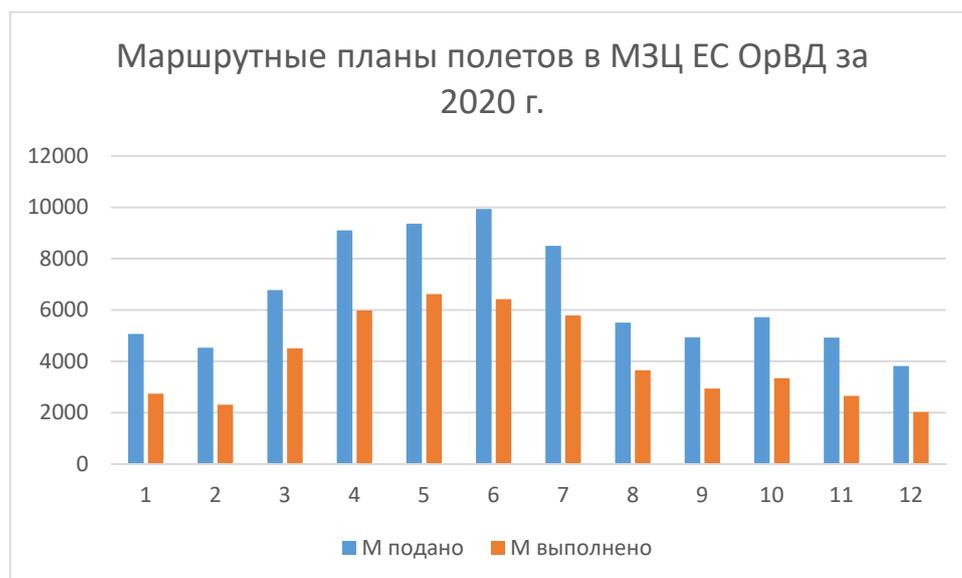


Рис. 3. Маршрутные планы полетов в МЗЦ ЕС ОрВД за 2020 год
Fig. 3. Route flight plans in the Moscow Area Center of the Unified ATM system for 2020

* Плановый													
UDD	TOGMO	UPLOP	DOSAG	ULKID	DEDUG	ABAGI	IPLEG	TAKIB	NANEP	ULPON	ERELI	RUBEK	UWWW
F000	F260	F290	F390	F330	F250	F150	F000						
13.41	13.57	13.58	14.03	14.08	14.12	14.17	14.24	14.28	14.35	14.37	14.41	14.47	15.01

* Текущий												
14L	СИД	TOGMO	UPLOP	DOSAG	ULKID	DEDUG	ABAGI	IPLEG	TAKIB			
F000	ТОГМОЗМ	F265	F280	F330	F360	F370	F390	F390	F390			
13.41		13.58	13.59	14.03	14.07	14.11	14.15	14.24	14.27			

Рис. 4. Пример маршрутной части плана полета в АС ОрВД
Fig. 4. Example of the route part of the flight plan in the Automated System of the ATM system

маршрутно-трассовых и 63 % от маршрутных планов полетов.

Становится очевидным, что на этапе пред- тактического планирования в настоящее время нецелесообразно проводить мероприятия по выявлению и недопущению КС между ВС, так как около половины поданных заявок впоследствии отменяются.

Анализ фактического выдерживания временных параметров планов полета

Поступающие из главного центра Единой системы организации воздушного движения (ГЦ ЕС ОрВД) суточные планы полетов обрабатываются в автоматизированной системе

управления воздушным движением (АС УВД) и становятся доступны пользователю (в том числе диспетчеру ОВД) в виде окна ФПЛ [4, 5].

Обработанный план содержит описание маршрутной части полета с разбивкой по точкам пути, эшелону и времени пролета данной точки (рис. 4) [6].

Маршрутная часть плановой информации доступна в трех видах [7]:

- текущая;
- плановая;
- пройденная.

Анализ статистических данных выдерживания времени пролета точек пути за период с 03.11.2021 по 10.11.2021 для ВС, следующих в аэропорт Домодедово с южного на- правления, показывает несоответствие плани-

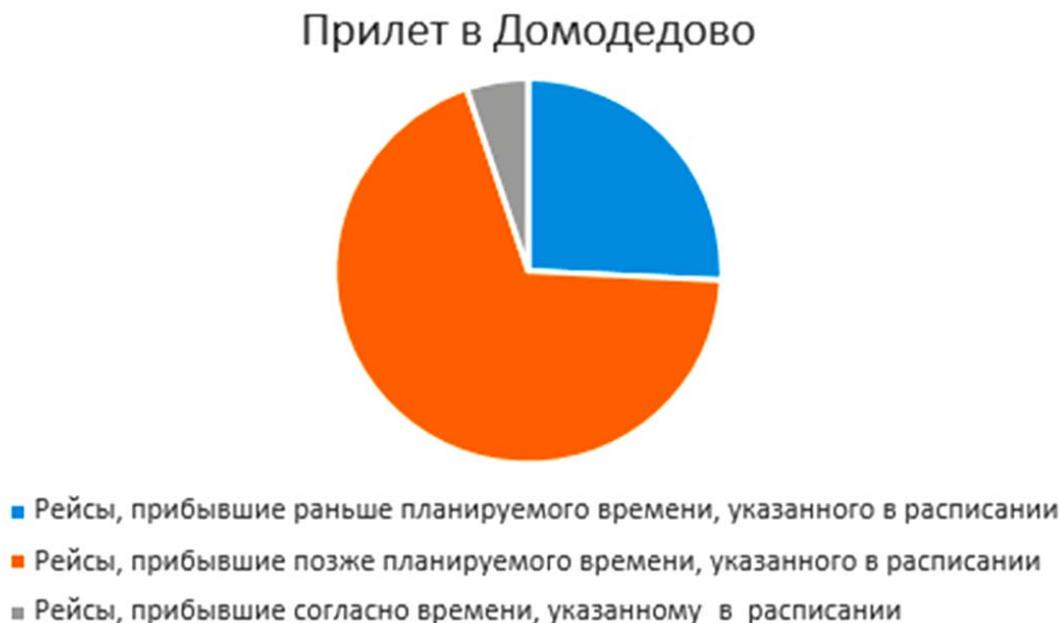


Рис. 5. Прилет ВС в аэропорт Домодедово
Fig. 5. Domodedovo arrival

руемого времени прохождения точек пути и фактического.

В среднем ВС проходит точку пути с разницей 3–4 минуты относительно плана.

Максимальное время отклонения составляет:

- пролет точки пути на 7 минут раньше планируемого времени;
- пролет точки пути на 6 минут позже планируемого времени.

Одним из главных факторов изменения времени пролета точек пути в МЗЦ ЕС ОВД является спрямление маршрута [8]. Маршрутная часть 73 % планов полетов была изменена в результате решения диспетчера ОВД, который не учитывает планового времени пролета точек пути.

Данная ситуация приводит к тому, что:

- оперативное изменение траектории полета ВС может привести к необходимости изменения планов полетов других участников ВД;
- эффективность прогнозирования КС на этапе предтактического планирования становится неэффективной из-за невыдерживания ВС времени пролета точек пути.

Анализ выдерживания запланированного времени прилета/вылета ВС на примере аэропорта Домодедово

В целях планирования производственной деятельности аэропорты предлагают авиакомпаниям выбрать временные интервалы на пользование инфраструктурой аэропорта и разрешение на вылет или прилет в этот аэропорт в определенное время и дату [9]. Данная процедура формируется за счет выделения слотов (Slot-time), которые используются в РФ в соответствии со стандартами ИАТА.

Анализ статистических данных по времени прилетов и вылетов 113 рейсов в аэропорту Домодедово за 9 апреля 2022 года показал низкую дисциплину выдерживания времени прилета. При анализе сравнивалось отклонение временных параметров прибытия/вылета согласно расписанию (± 1 минута).

При сравнении фактического и запланированного времени прилетов по 62 рейсам получены следующие данные (рис. 5):

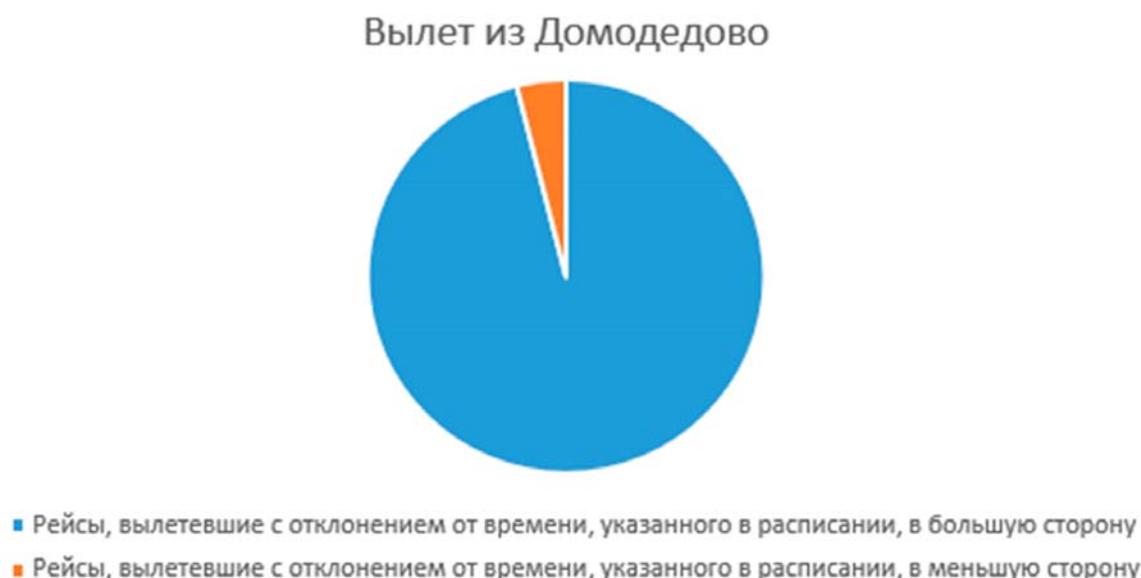


Рис. 6. Вылет ВС из аэропорта Домодедово
Fig. 6. Domodedovo departure

- у 40 % рейсов планируемое время прилета дублировалось с другим рейсом;
- 25 % рейсов прибыли раньше расписания, при этом максимальное отклонение составило 38 минут;
- 67 % рейсов прибыло позже расписания, максимальное отклонение составило 230 минут;
- 5 % рейсов выдержали запланированное время прилета.

При сравнении фактического и запланированного времени вылетов по 51 рейсу получены следующие данные (рис. 6):

- у 41 % рейсов планируемое время вылета совпадало с другим рейсом;
- 96 % рейсов вылетели с отклонением от запланированного времени, максимальное отклонение вылета составило 37 минут;
- 4 % рейсов вылетело раньше расписания;
- ни один из рейсов не выдержал запланированного времени вылета.

Полученные результаты могут свидетельствовать о проблемах в системе планирования еще на этапе выделения слотов. Статистические данные говорят о наличии одинаковых слотов для нескольких рейсов, что может повлечь за собой смещение времени прилета и вылета. В то же время задержка

вылета рейсов приводит к дальнейшей задержке по маршруту и, следовательно, невозможности на этапах стратегического и предтактического планирования решать вопросы, связанные с предотвращением КС [10].

Концепция ОПВД (ATFM)

Концепция организации потоков воздушного движения – это механизм, позволяющий повысить эффективность организации воздушного движения. Введение концепции организации потоков воздушного движения (ОПВД) позволит создать глобальную скоординированную систему ОПВД во всем мире и стандартизировать все процессы.

Эта концепция ИКАО предназначена для регулирования потребностей воздушного движения и должна быть использована на всех этапах планирования (стратегическом, предтактическом и тактическом) [11].

Достижение целей ОПВД невозможно без четкого взаимодействия всех заинтересованных в ИВП сторон [12].

В будущем, из-за взаимосвязи воздушного движения во всем мире, данная система должна выходить за пределы границ государства. Однако на начальном этапе следует от-

работать все меры ОПВД на отдельных районах полетной информации.

Использование ОПВД позволяет повысить уровень безопасности полетов, свести к минимуму скачки интенсивности воздушного движения, решить проблемы, связанные с ограничением полетов и непредвиденными ситуациями, влияющими на пропускную способность [13], скоординировать пользователей ВП и своевременно обеспечить их всей необходимой информацией, согласовать все системы ОрВД [14].

Помимо всего прочего, концепция ОПВД предполагает введение ряда мер, направленных на снижение негативного влияния в случае возникновения непредвиденных обстоятельств или нарушений функционирования какого-либо ресурса из системы [14]. Подобные меры могут представлять собой заранее оговоренные всеми пользователями воздушного пространства планы при появлении непредвиденных факторов, осложняющих ИВП. Данные меры должны быть согласованы всеми заинтересованными в ИВП сторонами и предлагаться на стратегическом и предтактическом этапах. К таким мерам могут относиться [2]:

- программа задержек на земле (Ground Delay Program GDP);
- изменение маршрута;
- ожидание на земле;
- интервал эшелонирования с учетом спутного следа в минутах/милях (MIT/MINIT);
- минимальные интервалы вылета (MDI);
- согласование контрольных точек;
- ограничение эшелона.

Часть подобных мер, например изменение маршрута и ограничение эшелона, в настоящее время используется при ОВД в Московской зоне ОрВД, но все это происходит на этапе текущего планирования и без предварительного согласования с пользователями воздушного пространства.

Организация ИВП в РФ

В РФ основным документом, регламентирующим планирование использования воздушного пространства (ПИВП), является

ФАП «Организация планирования использования воздушного пространства в РФ».

В соответствии с ФАП «Организация планирования использования воздушного пространства в РФ» к ПИВП относятся:

- сбор и обработка информации о планах полетов ВС, а также информации по разрешительному и уведомительному порядку ИВП;
- координирование ИВП для его распределения между всеми заинтересованными пользователями на этапах стратегического, предтактического и тактического планирования;
- взаимодействие всех заинтересованных в ИВП сторон, включая органы ПВО.

Согласно ФАП «Организация планирования использования воздушного пространства в РФ» выделяются три этапа планирования ИВП – стратегический, предтактический и тактический (текущий) этапы. Каждый из этих этапов имеет свои цели, временные рамки и выполняется определенным центром Единой системы организации воздушного движения (ЕС ОрВД) РФ [7]. Однако к основной задаче всех этапов планирования можно отнести недопущение превышения пропускной способности секторов УВД. Всем центрам ЕС ОрВД дано право принимать регулирующие меры относительно пользователей воздушного пространства.

Регулирующие меры могут приниматься центрами ЕС ОрВД в таких случаях, как прогнозируемое превышение пропускной способности органов ОВД, изменение метеоусловий и аэронавигационной информации. Но на практике центры ЕС ОрВД не в полной мере используют эту возможность.

Рассмотрим пример, произошедший в Московской зоне ОВД 02.11.2020. В связи с ухудшением метеоусловий ВС не могли произвести посадку на аэродромах Московского аэроузла, и принималось решение ждать в зонах ожиданий улучшения метеоусловий. При этом те ВС, что еще не вылетели или не вошли в Московскую зону, но следующие на те же аэродромы, не получив от центра ЕС ОрВД запрета на ИВП или изменений в ранее выданные разрешения, принимают решение на вылет или на продолжение следования на аэродром назначе-

ния, несмотря на то, что посадку по метеоусловиям они произвести не смогут.

Это происходит потому, что у авиакомпаний есть юридическая ответственность и отмена вылета без оснований, в данном случае запрета на вылет от ЕС ОрВД, будет являться нарушением обязательств перед пассажирами. В такой ситуации количество ВС в воздухе увеличивается, вызывая перегрузку секторов ОВД, а также перерасход топлива всеми ВС, которые могли бы ожидать на земле. Все это пагубно отражается на безопасности полетов и их экономической эффективности.

Европейский опыт подсказывает, что своевременное введение ограничительных мер, например временный запрет на вылет на определенный аэродром для ВС с категорией ниже необходимой для посадки или запрет на вход в перегруженные в настоящий момент зоны/сектора, поможет минимизировать негативный эффект [9, 11].

Сравнение целей и задач на разных этапах планирования ВД в РФ с рекомендациями ИКАО

Основные документы, регулирующие организацию планирования ВД в РФ, в целом во многом соответствуют рекомендациям ИКАО. В РФ осуществляются те же три этапа планирования – стратегический, предтактический и тактический. Кроме того, центры ЕС ОрВД наделяются возможностью регулирования потоков ВД теми же методами, что предложены в концепции ОПВД.

Реальное состояние системы планирования показывает, что на практике многие меры ОПВД не применяются или применяются только на этапе текущего планирования. Использование регулирующих мер не обсуждается с пользователями ВП, не выбираются и не согласовываются на этапах стратегического и предтактического планирования, что идет в разрез с рекомендациями ИКАО [12]. Это приводит к увеличению количества согласований на этапе текущего планирования между ВС и органом ОВД и увеличивает время ведения радиосвязи, что в нестандарт-

ных ситуациях может привести к снижению уровня безопасности полетов.

Можно выделить основные проблемы в ОПВД в РФ:

- отсутствие процессов совместного принятия решений между органами ОВД и пользователями ВП в РФ;
- проблема с обменом информацией между пользователями ВП и органами ОВД, когда пользователи не получают полную актуальную информацию о воздушной обстановке от органов ОВД;
- организационно-технические сложности согласований на всех этапах планирования;
- недостаточное использование возможностей центров ЕС ОрВД по планированию потоков ВД на этапах стратегического и предтактического планирования.

Заключение

Текущее состояние системы организации ВД в РФ в целом, согласно основополагающим документам, максимально приближено к рекомендациям ИКАО. Недостатки, выявленные в процессе исследований, не позволяют в полной мере использовать все меры организации потоков воздушного движения в РФ.

Выполненная работа позволила получить следующие результаты.

1. Регулярные отклонения ВС от запланированного времени прохождения точек пути усложняет оперативное прогнозирование ВД в органах ОВД.

2. Обоснована нецелесообразность проведения мер по выявлению и недопущению КС на этапе предтактического планирования из-за большого количества отменяемых планов полетов.

3. На примере аэропорта Домодедово показана низкая дисциплина выдерживания временных слотов, выделяемых авиакомпаниям в соответствии со стандартами ИАТА, опубликованными в Worldwide Slot Guidelines (WSG).

Проведенные исследования показывают необходимость совершенствования системы ПВД РФ. Основными проблемами в организации планирования ВП является низкая ко-

ординация взаимодействия между звеньями ЕС, дублирование функций на разных этапах планирования, сложности в информационном обмене между всеми задействованными сторонами ИВП.

Список литературы

1. Луговая А.В., Коновалов А.Е. Совместное принятие решения о потоках прилета и вылета воздушных судов при организации воздушного движения // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 4. С. 78–87. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-78-87

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

3. Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б., Михайлин Д.А. Постановка и решение задачи оперативной коррекции потоков прилета и вылета воздушных судов в районе аэродрома с помощью генетического алгоритма // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 4. С. 8–17. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-8-17

4. Ассоров Н.А. К вопросу построения прилетного потока воздушных судов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 4. С. 52–58. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-52-58

5. Чехов И.А. Пути развития систем навигации в рамках внедрения концепции CNS/ATM // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 4. С. 98–106. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-98-106

6. Тельпуховская О.Н. Моделирование воздушной обстановки с использованием объектно-ориентированной системы программирования // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 4. С. 107–113. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-107-113

7. Рудельсон Л.Е., Смородский С.Н., Степаненко А.С. Стратегия контроля целостности данных в концепции управления общесистемной информацией // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 4. С. 114–126. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-114-126

8. Wilson S., Suzić R., Stricht S. The SESAR ATM information reference model within the new ATM system // 2014 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS) Conference Proceedings, 2014. Pp. L3-1–L3-13. DOI: 10.1109/ICNSurv.2014.6819999

9. Шумилов И.С. Авиационные происшествия. Причины возникновения и возможности предотвращения. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 384 с.

10. Байташева Г.У., Шарипбаева А.М. Негативное влияние увеличения количества автотранспорта на воздушный бассейн // Вестник Казахского национального женского педагогического университета. 2018. № 3. С. 6–11.

11. Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б. Формирование частных критериев эффективности А-СДМ с учетом интересов участников процесса принятия решений в динамической обстановке // Научный Вестник МГТУ ГА. 2020. Т. 23, № 6. С. 53–64. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-6-53-64

12. Volkovska A. Methods and models for passenger transportations forecasting on air routes // The Scientific Heritage. 2021. № 61-1. Pp. 44–48.

13. Фурар Х.Э. Оценка рисков при обеспечении безопасности бортовых систем воздушного судна / Х.Э. Фурар, Б.Д. Огунвоул, В.Д. Будаев, Ф. Лаши // Научный Вестник МГТУ ГА. 2020. Т. 23, № 4. С. 84–95. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-4-84-95

14. Major L. Key human-centered transition issues for future oceanic air traffic control systems / L. Major, H. Johannsson, H. Davison, E.T. Hvannberg, R.J. Hansman [Электронный ресурс] // ICAT-Reports and Papers, 2004. 7 p. URL: <http://hdl.handle.net/1721.1/35756> (дата обращения: 04.11.2022).

References

1. Lugovaya, A.V., Konovalov, A.E. (2017). Collaborative decision-making on the inbound and outbound air traffic flow in air traffic management. *Civil Aviation High Technolo-*

gies, vol. 20, no. 4, pp. 78–87. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-78-87 (in Russian)

2. **Zhiltsov, I.E., Mitrofanov, A.K., Rudel'son, L.E.** (2018). Air space capacity assessment regarding the problem of the collaborative management of air traffic flows. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 21, no. 2, pp. 83–95. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-2-83-95 (in Russian)

3. **Lebedev, G.N., Malygin, V.B., Mikhaylin, D.A.** (2017). Problem setting and solution of the response correction of arrival and departure air traffic flow in the vicinity of the field by means of the genetic algorithm. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 20, no. 4, pp. 8–17. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-8-17 (in Russian)

4. **Assorov, N.A.** (2017). On the arrival traffic flow organization. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 20, no. 4, pp. 52–58. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-52-58 (in Russian)

5. **Chekhov, I.A.** (2017). Ways of navigation systems development within the implementation of the CNS/ATM concept. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 20, no. 4, pp. 98–106. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-98-106 (in Russian)

6. **Telpukhovskaya, O.N.** (2017). The modeling of air situation using object-oriented programming system. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 20, no. 4, pp. 107–113. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-107-113 (in Russian)

7. **Rudelson, L.E., Smorodskiy, S.N., Stepanenko, A.S.** (2017). Strategy of data integrity control for system wide information management concept. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 20, no. 4, pp. 114–126. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-4-114-126 (in Russian)

8. **Wilson, S., Suzić, R., Stricht, S.** (2014). The SESAR ATM information reference model within the new ATM system. In: *2014 Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNS) Conference Proceedings*, pp. L3-1–L3-13. DOI: 10.1109/ICNSurv.2014.6819999

9. **Shumilov, I.S.** (2006). Aviation accidents. Causes and prevention options. Moscow: MGTU im. N.E. Baumana, 384 p. (in Russian)

10. **Baitasheva, G.U., Sharipbaeva, A.M.** (2018). The negative effect of the traffic growth to the air basin. *Bulletin of Kazakh National Women's Teacher Training University*, no. 3, pp. 6–11.

11. **Lebedev, G.N., Malygin, V.B.** (2020). Creating private criteria for A-CDM effectiveness to take into account the interests of decision-making participants in a dynamic environment. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 23, no. 6, pp. 53–64. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-6-53-64 (in Russian)

12. **Volkovska, A.** (2021). Methods and models for passenger transportations forecasting on air routes. *The Scientific Heritage*, no. 61-1, pp. 44–48.

13. **Fourar, H.E., Ogunvoul, B.D., Budaev, V.D., Lashi, F.** (2020). Risk assessment in ensuring aircraft on-board systems safety. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 23, no. 4, pp. 84–95. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-4-84-95 (in Russian)

14. **Major, L., Johannsson, H., Davison, H., Hvannberg, E.T., Hansman, R.J.** (2004). Key human-centered transition issues for future oceanic air traffic control systems. *ICAT – Reports and Papers*, 7 p. Available at: <http://hdl.handle.net/1721.1/35756> (accessed: 04.11.2022).

Сведения об авторах

Печенежский Владимир Константинович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления воздушным движением МГТУ ГА, pvk_nikulino@mail.ru.

Чуви́ковская Евгения Константиновна, аспирант МГТУ ГА, evgeniya.chuvik@mail.ru.

Information about the authors

Vladimir K. Pechenezhsky, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, pvk_nikulino@mail.ru.

Evgeniya K. Chuvikovskaya, Postgraduate Student, Moscow State Technical University of Civil Aviation, evgeniya.chuvik@mail.ru.

Поступила в редакцию	27.01.2023	Received	27.01.2023
Одобрена после рецензирования	09.06.2023	Approved after reviewing	09.06.2023
Принята в печать	21.11.2023	Accepted for publication	21.11.2023

УДК 629.735

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-58-74

Характеристики достоверности эксплуатационного контроля функциональных систем и комплексов бортового оборудования воздушных судов

С.В. Кузнецов¹

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

Аннотация: Система эксплуатационного контроля (СЭК) бортового оборудования (БО) воздушных судов (ВС) гражданской авиации (ГА) является важной составляющей его системы технической эксплуатации (СТЭ). Эксплуатационный контроль – составная часть процесса технической эксплуатации. Он позволяет оценить технические состояния (ТС) объектов контроля (ОК) в различных состояниях функционирования БО, подготовки ВС к полету, различных видах технического обслуживания (ТО) и восстановлении. Основным свойством эксплуатационного контроля является достоверность контроля. Ключевая задача эксплуатационного контроля – не только определение вида ТС, но и количественная оценка правильности или ошибочности принятия решений. Характеристики достоверности контроля (ХДК) являются количественными показателями степени объективности принятия решений. В зависимости от уровня детализации задачи следует различать ХДК блоков, функциональных систем и комплексов БО для различных средств эксплуатационного контроля: встроенных, бортовых автономных, наземно-бортовых и наземных. Выбор ХДК основан на системном анализе и математическом аппарате логики, теории вероятности и математической статистики. Сформированы рациональные множества технических состояний и решений о технических состояниях функциональных систем и комплексов БО. На основании принадлежности к этим множествам определены три группы характеристик достоверности контроля. Первую группу составляют условные вероятности переходов процесса эксплуатационного контроля при различных видах контроля. Вторую группу составляют безусловные вероятности переходов процесса эксплуатационного контроля при различных видах контроля. Третью группу составляют апостериорные вероятности принятия решений в процессе эксплуатационного контроля при различных видах контроля. Определены аналитические зависимости для вычисления ХДК трех групп для функциональных систем и комплексов БО и взаимоотношения между ними. На примере системы кондиционирования воздуха проведены расчеты по достоверности контроля.

Ключевые слова: система эксплуатационного контроля, процесс технической эксплуатации, техническое состояние, достоверность контроля, бортовое оборудование.

Для цитирования: Кузнецов С.В. Характеристики достоверности эксплуатационного контроля функциональных систем и комплексов бортового оборудования воздушных судов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 6. С. 58–74. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-58-74

Characteristics of operational control reliability of aircraft functional systems and avionics suites

S.V. Kuznetsov¹

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

Abstract: The operational control system (OCS) of civil aircraft (A/C) airborne equipment is an important component of its technical operation system (TOS). Operational control is an integral part of the technical operation process. It makes it possible to assess the technical conditions (TC) of the objects to be monitored in various states of airborne equipment operation, aircraft preparation for flight, various types of maintenance and recovery. The main property of operational control is the reliability of control. The key task of operational control is not only to determine the type of technical condition, but also to quantify the correctness or erroneousness of decision-making. Control reliability characteristics (CRC) are quantitative indicators of the degree

of objectivity in decision-making. Depending on the level of task details, it is necessary to distinguish the control reliability characteristics of units, functional systems (FS) and avionics suites for various means of operational control: built-in test equipment (BITE), on-board self-contained, ground-onboard and ground systems. The choice of the control reliability characteristics is based on the system analysis and the mathematical apparatus of logic, probability theory and mathematical statistics. Rational sets of technical states and decision-making about the technical conditions of functional systems and avionics suites are formed. Based on these sets, three groups of control reliability characteristics were identified. The first group consists of conditional probabilities of transitions in the operational control process under various types of control. The second group consists of unconditional probabilities of transitions in the operational control process under various types of control. The third group consists of a posteriori decision-making probability in the operational control process under various types of control. Analytical dependences for calculating the control reliability characteristics of three groups for functional systems and avionics suites and relationships between them are determined. The air-conditioning system was used to calculate the reliability of the control.

Key words: operational control system, technical operation process, technical condition, reliability of the control, onboard equipment.

For citation: Kuznetsov, S.V. (2023). Characteristics of operational control reliability of aircraft functional systems and avionics suites. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 6, pp. 58–74. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-58-74

Введение

Эффективность технической эксплуатации бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации проявляется в процессе его технической эксплуатации. Основной составляющей этого процесса является процесс эксплуатационного контроля. Он включает процессы контроля в полете, послеполетный и предполетный контроль, а также контроль демонтированного с борта оборудования в наземных условиях. Основным свойством эксплуатационного контроля является достоверность контроля, определяющая степень объективности отображения результатами контроля реального технического состояния объекта. Бортовое оборудование как объект технической эксплуатации представляет собой совокупность блоков, систем и комплексов. В зависимости от глубины детализации задачи оценки эффективности эксплуатационного контроля следует использовать соответствующие математические модели.

Характеристика современного бортового оборудования как интегрированной модульной авионики дана в [1]. Актуальные исследования в области достоверности контроля приведены в работах отечественных ученых [2–10] и зарубежных авторов [11–16].

В [17] автором сформулирована научная задача формирования системы эксплуатационного контроля (СЭК) бортового оборудования (БО) воздушных судов (ВС) граждан-

ской авиации (ГА), в [18] осуществлен выбор и проведено обоснование параметров и показателей эффективности системы эксплуатационного контроля на нижнем уровне иерархии для блоков бортового оборудования. В настоящей статье проводятся выбор и обоснование параметров и показателей эффективности эксплуатационного контроля второго и третьего уровней иерархии для функциональных систем и бортовых комплексов.

Методы и методология исследования

В основе исследования лежат логико-вероятностные методы, наиболее адекватно описывающие реальные процессы эксплуатационного контроля как суть случайные процессы, подчиненные строгим и детерминированным правилам, следующим из программы технического обслуживания и ремонта ВС. Эти методы естественным образом вписываются в общую методологию исследования систем технической эксплуатации ВС в целом и бортового оборудования в частности.

Формирование множеств технических состояний и решений о технических состояниях функциональных систем и комплексов. В общем случае техническое состояние (ТС) I -й функциональной системы (ФС) может быть описано множеством $S(I)$, состоящим из двух элементов:

$$S(I) = \{S^+(I); S^-(I)\}, \quad (1)$$

где $S^+(I)$ – исправное ТС ФС; $S^-(I)$ – множество неисправных ТС ФС.

Пусть ФС состоит из M блоков. Тогда каждый элемент множества $S(I)$ характеризуется совокупностью элементов множеств $s(j)$; $j = \overline{1, M}$ и множества ТС межблочных связей $s(i, j)$:

$$S(i, j) = \{S^+(i, j); S^-(i, j)\}, \quad (2)$$

где $S^+(i, j)$ – исправное ТС межблочной связи блоков i и j ; $S^-(i, j)$ – множество неисправных ТС межблочной связи блоков i и j . Тогда

$$\begin{aligned} S^+(I) &= \{S^+(j); S^+(i, j) = \overline{1, M}\}, \\ S^-(I) &= \{S^-(j); S^-(i, j) = \overline{1, M}\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Решение о ТС I -й ФС принадлежит множеству решений $Z(I)$, также состоящему из двух элементов:

$$Z(I) = \{Z^+(I); Z^-(I)\}, \quad (4)$$

где $Z^+(I)$ – решение об исправности I -й ФС; $Z^-(I)$ – множество решений о наличии неисправностей I ФС.

Решение о ТС межблочных связей I -й ФС принадлежит множеству решений

$$Z(i, j) = \{Z^+(i, j); Z^-(i, j)\}, \quad (5)$$

где $Z(i, j)$ – решение об исправности межблочной связи блоков i и j ; $Z^-(i, j)$ – решение о неисправности межблочной связи блоков i и j . Тогда

$$\begin{aligned} Z^+(I) &= \{Z^+(j); Z^+(i, j) = \overline{1, M}\}, \\ Z^-(I) &= \{Z^-(j); Z^-(i, j) = \overline{1, M}\}. \end{aligned} \quad (6)$$

События, связанные с принадлежностью текущего ТС ФС $s(I)$ одному из элементов множества $S(I)$, а также принадлежностью текущего решения о ТС ФС $z(I)$ одному из элементов множества $Z(I)$, являются попарно совместными, и их можно объединить в три группы.

Первая группа событий:

$$\{z(I) \in Z^+(I)/s(I) \in S^+(I)\};$$

$$\begin{aligned} \{z(I) \in Z^-(I)/s(I) \in S^+(I)\}; \\ \{z(I) \in Z^+(I)/s(I) \in S^-(I)\}; \\ \{z(I) \in Z^-(I)/s(I) \in S^-(I)\}. \end{aligned} \quad (7)$$

Вторая группа событий:

$$\begin{aligned} \{z(I) \in Z^+(I); s(I) \in S^+(I)\}; \\ \{z(I) \in Z^-(I); s(I) \in S^+(I)\}; \\ \{z(I) \in Z^+(I); s(I) \in S^-(I)\}; \\ \{z(I) \in Z^-(I); s(I) \in S^-(I)\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Третья группа событий:

$$\begin{aligned} \{s(I) \in S^+(I)/z(I) \in Z^+(I)\}; \\ \{s(I) \in S^-(I)/z(I) \in Z^+(I)\}; \\ \{s(I) \in S^+(I)/z(I) \in Z^-(I)\}; \\ \{s(I) \in S^-(I)/z(I) \in Z^-(I)\}. \end{aligned} \quad (9)$$

Тогда достоверность контроля ФС количественно можно определить вероятностями появления каждого события из соответствующей группы событий (7)–(9). Такие вероятности будем называть характеристиками достоверности контроля (ХДК) ФС.

В зависимости от вида эксплуатационного контроля будем различать ХДК ФС:

- в полете (когда ТС I -й ФС на момент окончания полета $s_p(I)$, а решение системы контроля о ТС этой ФС $z_p(I)$);
- при послеполетном контроле (когда ТС I -й ФС на момент окончания послеполетного контроля $s_{псп}(I)$, а решение системы контроля о ТС этой ФС $z_{псп}(I)$);
- при предполетном контроле (когда ТС I -й ФС на момент окончания предполетного контроля $s_{прп}(I)$, а решение системы контроля о ТС этой ФС $z_{прп}(I)$).

Так как вне борта самолета ФС как единое целое не существует (она представляет собой не связанные между собой демонтированные блоки), вводить ХДК демонтированной ФС нецелесообразно.

Рассмотрим далее процедуру формирования множеств ТС и решений о ТС бортовых комплексов (БК). В общем случае ТС БК описывается множеством S , состоящим из двух элементов:

$$S = \{S^+; S^-\}, \quad (10)$$

где S^+ – исправное ТС оборудования БК;
 S^- – множество неисправных ТС БК.

Пусть БК состоит из L ФС. Тогда каждый элемент множества S характеризуется совокупностью элементов множества $S(I)$, $I = \overline{1, L}$ и множества ТС межсистемных связей $S(I, J)$:

$$S(I, J) = \{S^+(I, J); S^-(I, J)\}, \quad (11)$$

где $S^+(I, J)$ – исправное ТС межсистемной связи ФС I и J ; $S^-(I, J)$ – множество неисправных ТС межсистемной связи ФС I и J . Тогда

$$\begin{aligned} S^+ &= \{S^+; S^+(I, J); I, J = \overline{1, L}\}, \\ S^- &= \{S^-; S^-(I, J); I, J = \overline{1, L}\}. \end{aligned} \quad (12)$$

Решение о ТС БК принадлежит множеству решений Z , состоящему из двух элементов:

$$Z = \{Z^+; Z^-\}, \quad (13)$$

где Z^+ – решение об исправности БК; Z^- – решение о наличии неисправностей в БК.

Решение о ТС межсистемных связей БК принадлежит множеству решений

$$Z(I, J) = \{Z^+(I, J); Z^-(I, J)\}, \quad (14)$$

где $Z^+(I, J)$ – решение об исправности межсистемной связи I и J ; $Z^-(I, J)$ – решение о наличии неисправностей в межсистемной связи I и J . Тогда

$$\begin{aligned} Z^+ &= \{Z^+; Z^+(I, J); I, J = \overline{1, L}\}, \\ Z^- &= \{Z^-; Z^-(I, J); I, J = \overline{1, L}\}. \end{aligned} \quad (15)$$

События, связанные с принадлежностью текущего ТС БК s одному из элементов множества S , а также принадлежностью текущего решения о ТС БК z одному из элементов множества Z , являются попарно совместными, и их можно объединить в три группы.

Первая группа событий:

$$\begin{aligned} \{z \in Z^+ / s \in S^+\}; \{z \in Z^- / s \in S^+\}; \\ \{z \in Z^+ / s \in S^-\}; \{z \in Z^- / s \in S^-\}. \end{aligned} \quad (16)$$

Вторая группа событий:

$$\begin{aligned} \{z \in Z^+, s \in S^+\}; \{z \in Z^-, s \in S^+\}; \\ \{z \in Z^+, s \in S^-\}; \{z \in Z^-, s \in S^-\}. \end{aligned} \quad (17)$$

Третья группа событий:

$$\begin{aligned} \{s \in S^+ / z \in Z^+\}; \{s \in S^+(I) / z \in Z^-\}; \\ \{s \in S^- / z \in Z^+\}; \{s \in S^- / z \in Z^-\}. \end{aligned} \quad (18)$$

Тогда достоверность контроля БК количественно можно определить вероятностями появления каждого события из соответствующей группы событий (16)–(18). Такие вероятности будем называть ХДК БК.

В зависимости от вида эксплуатационного контроля будем различать ХДК БК:

- в полете (когда ТС БК на момент окончания полета $s_{\text{п}}$, а решение системы контроля о ТС БК $z_{\text{п}}$);
- при послеполетном контроле (когда ТС БК на момент окончания послеполетного контроля $s_{\text{псп}}$, а решение системы контроля о ТС БК $z_{\text{псп}}$);
- при предполетном контроле (когда ТС БК на момент окончания предполетного контроля $s_{\text{прп}}$, а решение системы контроля о ТС БК $z_{\text{прп}}$).

Эти ХДК являются показателями эффективности СЭК БК.

Характеристики достоверности эксплуатационного контроля функциональных систем и комплексов бортового оборудования

Первая группа характеристик. Первую группу ХДК I -й ФС составляют условные вероятности переходов процесса эксплуатационного контроля ФС. При контроле в полете это следующие вероятности:

$\alpha_{\text{п}}(I) = P\{\exists z_{\text{п}}(i) \in Z^-(i) \forall z_{\text{п}}(i, j) \in Z^-(i, j) / \forall s_{\text{п}}(i) \in S^+(i), \forall s_{\text{п}}(i, j) \in S^+(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$ – вероятность принятия решения при контроле в полете ФС о нахождении хотя бы одного блока ФС или хотя бы одной межблочной связи в неработоспособном состоянии при условии, что действительные ТС всех блоков и межблочных связей

являются работоспособными (вероятность ошибки контроля ФС в полете 1-го рода);

$\beta_{\Pi}(I) = P\{\forall z_{\Pi}(i) \in Z^+(i), \forall z_{\Pi}(i,j) \in Z^+(i,j) / \exists s_{\Pi}(i) \in S^-(i), \forall \exists s_{\Pi}(i,j) \in S^-(i,j); i,j = \overline{1,M}\}$ – вероятность принятия решения при контроле в полете ФС о работо-

способности всех блоков и всех межблочных связей ФС при условии, что существует хотя бы один блок или хотя бы одна межблочная связь, действительное ТС которых является неработоспособным (вероятность ошибки контроля ФС в полете 2-го рода).

Аналогичным образом получим ХДК первой группы при послеполетном контроле ФС:

$$\alpha_{\text{псп}}(I) = P\{\exists z_{\text{псп}}(i) \in Z^-(i) \forall \exists z_{\text{псп}}(i,j) \in Z^-(i,j) / \forall s_{\text{псп}}(i) \in S^+(i), \forall s_{\text{псп}}(i,j) \in S^+(i,j); i,j = \overline{1,M}\}; \quad (19)$$

$$\beta_{\text{псп}}(I) = P\{\forall z_{\text{псп}}(i) \in Z^+(i) \forall z_{\text{псп}}(i,j) \in S^+(i,j) / \exists s_{\text{псп}}(i) \in S^-(i), \forall \exists s_{\text{псп}}(i,j) \in S^-(i,j); i,j = \overline{1,M}\}.$$

При предполетном контроле ФС ХДК 1-й группы определяются следующим образом:

$$\alpha_{\text{прп}}(I) = P\{\exists z_{\text{прп}}(i) \in Z^-(i) \forall \exists z_{\text{прп}}(i,j) \in Z^-(i,j) / \forall s_{\text{прп}}(i) \in S^+(i), \forall s_{\text{прп}}(i,j) \in S^+(i,j); i,j = \overline{1,M}\}; \quad (20)$$

$$\beta_{\text{прп}}(I) = P\{\forall z_{\text{прп}}(i) \in Z^+(i) \forall z_{\text{прп}}(i,j) \in Z^+(i,j) / \exists s_{\text{прп}}(i) \in S^-(i), \forall \exists s_{\text{прп}}(i,j) \in S^-(i,j); i,j = \overline{1,M}\}.$$

Первую группу ХДК комплекса составляют условные вероятности переходов процесса эксплуатационного контроля комплекса. При контроле в полете это следующие вероятности:

$A_{\Pi} = P\{\exists z_{\Pi}(I) \in Z_{\Pi}^-(I) \forall \exists z_{\Pi}(I,J) \in Z_{\Pi}^-(I,J) / \forall s_{\Pi}(I) \in S_{\Pi}^+(I), \forall s_{\Pi}(I,J) \in S_{\Pi}^+(I,J); I,J = \overline{1,L}\}$ – вероятность принятия решения при контроле в полете комплекса о нахождении хотя бы одной ФС комплекса или хотя бы одной межсистемной связи в неработоспособном состоянии при условии, что действительные ТС всех ФС и межсистемных связей являются работоспособными (вероятность ошибки контроля комплекса в полете 1-го рода);

$B_{\Pi} = P\{\exists z_{\Pi}(I) \in Z_{\Pi}^-(I) \forall \exists z_{\Pi}(I,J) \in Z_{\Pi}^-(I,J) / \forall s_{\Pi}(I) \in S_{\Pi}^+(I), \forall s_{\Pi}(I,J) \in S_{\Pi}^+(I,J); I,J = \overline{1,L}\}$ – вероятность принятия решения при контроле в полете комплекса о работоспособности всех ФС и всех межсистемных связей при условии, что существует хотя бы одна ФС или хотя бы одна межсистемная связь, действительное ТС которых является неработоспособным (вероятность ошибки контроля комплекса в полете 2-го рода).

Аналогичным образом получим ХДК 1-й группы при послеполетном контроле комплекса:

$$A_{\text{псп}} = P\{\exists z_{\text{псп}}(i) \in Z^-(I) \forall \exists z_{\text{псп}}(I,J) \in Z^-(I,J) / \forall s_{\text{псп}}(I) \in S^+(I), \forall s_{\text{псп}}(I,J) \in S^+(I,J); I,J = \overline{1,L}\}; \quad (21)$$

$$B_{\text{псп}} = P\{\forall z_{\text{псп}}(I) \in Z^+(I) \forall z_{\text{псп}}(I,J) \in Z^+(I,J) / \exists s_{\text{псп}}(i) \in S^-(I), \forall \exists s_{\text{псп}}(I,J) \in S^+(I,J); I,J = \overline{1,L}\}.$$

При предполетном контроле комплекса ХДК 1-й группы определяются следующим образом:

$$A_{\text{прп}} = P\{\exists z_{\text{прп}}(I) \in Z^-(I) \forall \exists z_{\text{прп}}(I,J) \in Z^-(I,J) / \forall s_{\text{прп}}(I) \in S^+(I), \forall s_{\text{прп}}(I,J) \in S^+(I,J); I,J = \overline{1,L}\};$$

(22)

$$B_{\text{прп}} = P\{\forall z_{\text{прп}}(I) \in Z^+(I) \forall z_{\text{прп}}(I, J) \in Z^+(I, J) / \\ \exists s_{\text{прп}}(i) \in S^-(I), \forall \exists s_{\text{прп}}(I, J) \in S^-(I, J); I, J = \overline{1, L}\}.$$

Вторая группа характеристик. Вторую группу ХДК I-й ФС составляют безусловные вероятности нахождения процесса эксплуатационного контроля ФС в состояниях контроля. При контроле ФС в полете это следующие вероятности:

$p_{\text{по}}^{\text{II}}(I) = P\{\forall s_{\text{II}}(i) \in S^+(i), \forall s_{\text{II}}(i, j) \in S^+(i, j); \exists z_{\text{II}}(i) \in Z^-(i) \forall \exists z_{\text{II}}(i, j) \in Z^-(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$ – вероятность нахождения всех блоков ФС и всех межблочных связей в работоспособном ТС совместно с принятием решения во время контроля в полете о нахождении хотя бы одного блока ФС или хотя бы одной межблочной связи в неработоспособном состоянии (вероятность ложного отказа ФС в полете);

$p_{\text{но}}^{\text{II}}(I) = P\{\exists s_{\text{II}}(i) \in S^-(i) \forall \exists s_{\text{II}}(i, j) \in S^-(i, j); \forall z_{\text{II}}(i) \in Z^+(i), \forall z_{\text{II}}(i, j) \in Z^+(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$; – вероятность нахождения хотя бы одного блока ФС или хотя бы одной межблочной связи в неработоспособном состоянии совместно с принятием решения во время контроля в полете о нахождении всех блоков и межблочных связей ФС в работоспособном состоянии (вероятность необнаруженного отказа ФС в полете);

$p_{\text{ра}}^{\text{II}}(I) = P\{\forall s_{\text{II}}(i) \in S^+(i), \forall s_{\text{II}}(i, j) \in S^+(i, j); \forall z_{\text{II}}(i) \in Z^+(i), \forall z_{\text{II}}(i, j) \in Z^+(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$ – вероятность нахождения всех блоков и всех межблочных связей ФС в работоспособном состоянии совместно с принятием решения во время контроля в полете о нахождении всех блоков и межблочных связей ФС в работоспособном состоянии (вероятность контролируемой работоспособности ФС в полете);

$p_{\text{ко}}^{\text{II}}(I) = P\{\exists s_{\text{II}}(i) \in S^-(i) \forall \exists s_{\text{II}}(i, j) \in S^-(i, j); \exists z_{\text{II}}(i) \in Z^-(i) \forall \exists z_{\text{II}}(i, j) \in Z^-(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$ – вероятность нахождения хотя бы одного блока или хотя бы одной межблочной связи ФС в неработоспособном состоянии совместно с принятием решения во время контроля в полете о нахождении этого же самого блока или этой же межблоч-

ной связи в неработоспособном состоянии (вероятность контролируемого отказа ФС в полете).

Аналогичным образом получим ХДК 2-й группы при после- и предполетном контроле ФС.

Вторую группу ХДК комплекса составляют безусловные вероятности нахождения процесса эксплуатационного контроля комплекса в состояниях контроля. При контроле комплекса в полете это следующие вероятности:

$P_{\text{по}}^{\text{II}} = P\{\forall s_{\text{II}}(I) \in S^+(I), \forall s_{\text{II}}(I, J) \in S^+(I, J); \exists z_{\text{II}}(I) \in Z^-(I) \forall \exists z_{\text{II}}(I, J) \in Z^-(I, J); I, J = \overline{1, L}\}$ – вероятность нахождения всех ФС и межсистемных связей комплекса в работоспособном ТС совместно с принятием решения во время контроля в полете о нахождении хотя бы одной ФС или одной межблочной связи в неработоспособном состоянии (вероятность ложного отказа комплекса в полете);

$P_{\text{но}}^{\text{II}} = P\{\exists s_{\text{II}}(I) \in S^-(I) \forall \exists s_{\text{II}}(I, J) \in S^-(I, J); \forall z_{\text{II}}(I) \in Z^+(I), \forall z_{\text{II}}(I, J) \in Z^+(I, J); I, J = \overline{1, L}\}$ – вероятность нахождения хотя бы одной ФС комплекса или хотя бы одной межсистемной связи в неработоспособном состоянии совместно с принятием решения во время контроля в полете о нахождении всех ФС и всех межсистемных связей в работоспособном состоянии (вероятность необнаруженного отказа комплекса в полете);

$P_{\text{ра}}^{\text{II}} = P\{\forall s_{\text{II}}(I) \in S^+(I), \forall s_{\text{II}}(I, J) \in S^+(I, J); \forall z_{\text{II}}(I) \in Z^+(I) \forall z_{\text{II}}(I, J) \in Z^+(I, J); I, J = \overline{1, L}\}$ – вероятность нахождения всех ФС и всех межсистемных связей комплекса в работоспособном состоянии совместно с принятием решения во время контроля в полете о нахождении всех ФС и всех межсистемных связей комплекса в работоспособном состоянии (вероятность контролируемой работоспособности комплекса в полете);

$P_{\text{ко}}^{\text{п}} = P\{\exists s_{\text{п}}(I) \in S^-(I) \forall \exists s_{\text{п}}(I, J) \in S^-(I, J); \exists z_{\text{п}}(I) \in Z^-(I) \forall \exists z_{\text{п}}(I, J) \in Z^-(I, J); I, J = \overline{1, L}\}$ – вероятность нахождения хотя бы одной ФС или хотя бы одной межсистемной связи комплекса в неработоспособном состоянии совместно с принятием решения во время контроля в полете о нахождении той же самой ФС или той же самой межсистемной связи в неработоспособном состоянии (вероятность контролируемого отказа комплекса в полете).

Аналогичным образом получим ХДК 2-й группы при после- и предполетном контроле комплекса.

Третья группа характеристик. Третью группу ХДК I-й ФС составляют апостериорные вероятности нахождения процесса эксплуатационного контроля ФС в состояниях контроля. При контроле ФС в полете это следующие вероятности:

$d_{\text{г/г}}^{\text{п}}(I) = P\{\forall s_{\text{п}}(i) \in S^+(i), \forall s_{\text{п}}(i, j) \in S^+(i, j) / \forall z_{\text{п}}(i) \in Z^+(i), \forall z_{\text{п}}(i, j) \in Z^+(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$ – вероятность нахождения всех блоков и всех межблочных связей ФС в работоспособном состоянии при усло-

вии, что принято решение при контроле в полете, что все блоки и межблочные связи ФС находятся в работоспособном состоянии (вероятность достоверного результата контроля ФС в полете «годен»);

$d_{\text{нг/кг}}^{\text{п}}(I) = P\{\exists s_{\text{п}}(i) \in S^-(i) \forall \exists s_{\text{п}}(i, j) \in S^-(i, j) / \exists z_{\text{п}}(i) \in Z^-(i) \forall \exists z_{\text{п}}(i, j) \in Z^-(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$ – вероятность того, что хотя бы один блок или хотя бы одна межблочная связь ФС находится в неработоспособном состоянии при условии, что принято решение при контроле в полете, что этот блок или эта межблочная связь находится в работоспособном состоянии (вероятность достоверного результата контроля ФС в полете «не годен»).

Аналогичным образом получим ХДК третьей группы при послеполетном и предполетном контроле ФС.

Третью группу ХДК комплекса составляют апостериорные вероятности нахождения процесса эксплуатационного контроля комплекса в состояниях контроля. При контроле комплекса в полете это следующие вероятности:

$$D_{\text{г/г}}^{\text{п}} = P\{\forall s_{\text{п}}(I) \in S^+(I), \forall s_{\text{п}}(I, J) \in S^+(I, J) / \forall z_{\text{п}}(I) \in Z^+(I), \forall z_{\text{п}}(I, J) \in Z^+(I, J); I, J = \overline{1, L}\}, \quad (23)$$

$$D_{\text{нг/кг}}^{\text{п}} = P\{\exists s_{\text{п}}(I) \in S^-(I) \forall \exists s_{\text{п}}(I, J) \in S^-(I, J) / \exists z_{\text{п}}(I) \in Z^-(I) \forall \exists z_{\text{п}}(I, J) \in Z^-(I, J); I, J = \overline{1, L}\}.$$

Аналогичным образом получаем ХДК 3-й группы при послеполетном и предполетном контроле комплекса.

Характеристики безотказности функциональных систем и комплексов в процессе эксплуатационного контроля. Характеристики безотказности (ХБ) функциональных систем и комплексов в процессе эксплуатационного контроля представляют собой априорные вероятности безотказности и отказов функциональных систем и комплексов в промежутках между определенными видами контроля:

$p_{\text{п}}(J) = P\{s_{\text{п}}(J) \in S^+(J)\}$ – вероятность безотказной работы ФС J -й номенклатуры в полете за время между окончанием предполетного контроля и окончанием полета;

$q_{\text{п}}(J) = P\{s_{\text{п}}(J) \in S^-(J)\}$ – вероятность отказа ФС J -й номенклатуры в полете за время между окончанием предполетного контроля и окончанием полета;

$p_{\text{псп}}(J) = P\{s_{\text{псп}}(J) \in S^+(J)\}$ – вероятность безотказной работы ФС J -й номенклатуры при послеполетном контроле за время между окончанием полета и окончанием послеполетного контроля;

$q_{\text{псп}}(J) = P\{s_{\text{псп}}(J) \in S^-(J)\}$ – вероятность отказа ФС J -й номенклатуры при послеполетном контроле за время между окончанием полета и окончанием послеполетного контроля;

$p_{\text{прп}}(J) = P\{s_{\text{прп}}(J) \in S^+(J)\}$ – вероятность безотказной работы ФС J -й номенклатуры при предполетном контроле за время между

окончанием полета или послеполетного контроля и окончанием предполетного контроля;

$q_{\text{прп}}(J) = P\{s_{\text{прп}}(J) \in S^-(J)\}$ – вероятность отказа ФС J -й номенклатуры при предполетном контроле за время между окончанием полета или послеполетного контроля и окончанием предполетного контроля.

Аналитические зависимости между характеристиками достоверности контроля функциональных систем и комплексов.
Если определены ХДК ФС 1-й группы ФС

блока, то ХДК блока 2-й группы можно определить следующим образом:

$$\begin{aligned} P_{\text{ра}} &= p(J)[1 - \alpha(J)]; \\ P_{\text{ло}} &= p(J) \alpha(J); \\ P_{\text{ко}} &= q(J)[1 - \beta(J)]; \\ P_{\text{но}} &= p(J) \beta(J). \end{aligned} \tag{24}$$

Если определены ХДК ФС 2-й группы, то можно определить ХДК ФС 3-й группы:

$$\begin{aligned} D_{\text{Г/Г}}(J) &= P_{\text{ра}}(J) / [P_{\text{ра}}(J) + P_{\text{но}}(J)]; \\ D_{\text{НГ/НГ}}(J) &= P_{\text{ко}}(J) / [P_{\text{ко}}(J) + P_{\text{ло}}(J)]; \\ D_{\text{НГ/Г}}(J) &= P_{\text{ло}}(J) / [P_{\text{ко}}(J) + P_{\text{ло}}(J)]; \\ D_{\text{Г/НГ}}(J) &= P_{\text{но}}(J) / [P_{\text{ра}}(J) + P_{\text{но}}(J)]. \end{aligned} \tag{25}$$

Если определены ХДК ФС 1-й группы и ХБ ФС, то ХДК ФС 3-й группы определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} D_{\text{Г/Г}}(J) &= p(J)[1 - \alpha(J)] / \{p(J)[1 - \alpha(J)] + q(J)\beta(J)\}; \\ D_{\text{НГ/НГ}}(J) &= q(J)[1 - \beta(J)] / \{q(J)[1 - \beta(J)] + p(J)\alpha(J)\}; \\ D_{\text{НГ/Г}}(J) &= p(J)\alpha(J) / \{q(J)[1 - \beta(J)] + p(J)\alpha(J)\}; \\ D_{\text{Г/НГ}}(J) &= q(J)\beta(J) / \{p(J)[1 - \alpha(J)] + q(J)\beta(J)\}. \end{aligned} \tag{26}$$

На основе аналитических зависимостей (24)–(26) определяются соотношениями между ХДК ФС БО различных групп для СЭК.

Результаты исследования. Три группы ХДК ФС представлены в табл. 1, 2 и 3.

Таблица 1
Table 1

Первая группа характеристик достоверности эксплуатационного контроля ФС
The first group of operational control reliability characteristics of functional systems

ХДК ФС	Обозначение и определение	Примечание
Контроль в полете		
Вероятность ошибки контроля 1-го рода	$\alpha_{\text{п}}(I) = P\{\exists z_{\text{п}}(i) \in Z^-(i); \forall \exists z_{\text{п}}(i, j) \in Z^-(i, j) / \forall s_{\text{п}}(i) \in S^+(i); \forall s_{\text{п}}(i, j) \in S^+(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	После окончания полета: $s_{\text{п}}(i)$ – ТС i -го блока; $s_{\text{п}}(i, j)$ – ТС межблочной связи i -го и j -го блоков
Вероятность ошибки контроля 2-го рода	$\beta_{\text{п}}(I) = P\{\forall z_{\text{п}}(i) \in Z^+(i), \forall z_{\text{п}}(i, j) \in Z^+(i, j) / \exists s_{\text{п}}(i) \in S^-(i), \forall \exists s_{\text{п}}(i, j) \in S^-(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	$z_{\text{п}}(i), z_{\text{п}}(i, j)$ – решение о ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков

Окончание таблицы 1
Continuation of Table 1

Послеполетный контроль		
Вероятность ошибки контроля 1-го рода	$\alpha_{\text{псп}}(I) = P\{\exists z_{\text{псп}}(i) \in Z^-(i); \forall z_{\text{псп}}(i,j) \in Z^-(i,j) / \forall s_{\text{псп}}(i) \in S^+(i); \forall s_{\text{псп}}(i,j) \in S^+(i,j); i,j = \overline{1,M}\}$	После окончания контроля: $s_{\text{псп}}(i), s_{\text{псп}}(i,j)$ – ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков
Вероятность ошибки контроля 2-го рода	$\beta_{\text{псп}}(I) = P\{\forall z_{\text{псп}}(i) \in Z^+(i); \forall z_{\text{псп}}(i,j) \in S^+(i,j) / \exists s_{\text{псп}}(i) \in S^-(i); \forall s_{\text{псп}}(i,j) \in S^-(i,j); i,j = \overline{1,M}\}$	$z_{\text{псп}}(i), z_{\text{псп}}(i,j)$ – решение о ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков
Предполетный контроль		
Вероятность ошибки контроля 1-го рода	$\alpha_{\text{прп}}(I) = P\{\exists z_{\text{прп}}(i) \in Z^-(i); \forall z_{\text{прп}}(i,j) \in Z^-(i,j) / \forall s_{\text{прп}}(i) \in S^+(i); \forall s_{\text{прп}}(i,j) \in S^+(i,j); i,j = \overline{1,M}\}$	После окончания предполетного контроля: $s_{\text{прп}}(i), s_{\text{прп}}(i,j)$ – ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков
Вероятность ошибки контроля 2-го рода	$\beta_{\text{прп}}(I) = P\{\forall z_{\text{прп}}(i) \in Z^+(i); \forall s_{\text{прп}}(i,j) \in S^+(i,j) / \exists s_{\text{прп}}(i) \in S^-(i); \forall s_{\text{прп}}(i,j) \in S^-(i,j); i,j = \overline{1,M}\}$	$z_{\text{прп}}(i), z_{\text{прп}}(i,j)$ – решение о ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков

Таблица 2
Table 2

Вторая группа характеристик достоверности эксплуатационного контроля ФС
The second group of operational control reliability characteristics of functional systems

ХДКФС	Обозначение и определение	Примечание
Контроль в полете		
Вероятность ложного отказа	$p_{\text{по}}^{\text{п}}(I) = P\{\forall s_{\text{п}}(i) \in S^+(i); \forall s_{\text{п}}(i,j) \in S^+(i,j); \exists z_{\text{п}}(i) \in Z^-(i); \forall z_{\text{п}}(i,j) \in Z^-(i,j); i,j = \overline{1,M}\}$	После окончания полета: $s_{\text{п}}(i)$ – ТС i -го блока; $s_{\text{п}}(i,j)$ – ТС межблочной связи i -го и j -го блоков
Вероятность необнаруженного отказа	$p_{\text{но}}^{\text{п}}(I) = P\{\exists s_{\text{п}}(i); \forall s_{\text{п}}(i,j) \in Z^-(i,j); \forall z_{\text{п}}(i) \in Z^+(i); \forall z_{\text{п}}(i,j) \in Z^+(i,j); i,j = \overline{1,M}\}$	
Вероятность контролируемой работоспособности	$p_{\text{ра}}^{\text{п}}(I) = P\{\forall s_{\text{п}}(i) \in S^-(i); \forall s_{\text{п}}(i,j) \in S^+(i,j); \forall z_{\text{п}}(i) \in Z^+(i); \forall z_{\text{п}}(i,j) \in Z^+(i,j); i,j = \overline{1,M}\}$	$z_{\text{п}}(i), z_{\text{п}}(i,j)$ – решение о ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков
Вероятность контролируемого отказа	$p_{\text{ко}}^{\text{п}}(I) = P\{\exists s_{\text{п}}(i) \in S^-(i); \forall s_{\text{п}}(i,j) \in S^-(i,j); \exists z_{\text{п}}(i) \in Z^+(i); \forall z_{\text{п}}(i,j) \in Z^+(i,j); i,j = \overline{1,M}\}$	
Послеполетный контроль		
Вероятность ложного отказа	$p_{\text{по}}^{\text{псп}}(I) = P\{\forall s_{\text{псп}}(i) \in S^+(i); \forall s_{\text{псп}}(i,j) \in S^+(i,j); \exists z_{\text{псп}}(i) \in Z^-(i); \forall z_{\text{псп}}(i,j) \in Z^-(i,j); i,j = \overline{1,M}\}$	После окончания контроля: $s_{\text{псп}}(i), s_{\text{псп}}(i,j)$ – ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков

Окончание таблицы 2
Continuation of Table 2

Вероятность необнаруженного отказа	$p_{\text{но}}^{\text{псп}}(I) = P\{\exists s_{\text{псп}}(i); \forall \exists s_{\text{псп}}(i, j) \in S^-(i, j); \forall z_{\text{псп}}(i) \in Z^+(i); \forall z_{\text{псп}}(i, j) \in Z^+(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	
Вероятность контролируемой работоспособности	$p_{\text{ра}}^{\text{псп}}(I) = P\{\forall s_{\text{псп}}(i) \in S^-(i), \forall s_{\text{псп}}(i, j) \in S^+(i, j); \forall z_{\text{псп}}(i) \in Z^+(i); \forall s_{\text{псп}}(i, j) \in Z^+(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	$z_{\text{псп}}(i), z_{\text{псп}}(i, j)$ – решение о ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков
Вероятность неконтролируемого отказа	$p_{\text{ко}}^{\text{псп}}(I) = P\{\exists s_{\text{псп}}(i) \in S^-(i) \exists s_{\text{псп}}(i, j) \in S^-(i, j); \exists z_{\text{псп}}(i) \in Z^-(i) \forall \exists z_{\text{псп}}(i, j) \in Z^-(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	
Предполетный контроль		
Вероятность ложного отказа	$p_{\text{по}}^{\text{прп}}(I) = P\{\forall s_{\text{прп}}(i) \in S^+(i); \forall s_{\text{прп}}(i, j) \in S^+(i, j); \exists z_{\text{прп}}(i) \in Z^-(i); \forall \exists z_{\text{прп}}(i, j) \in Z^-(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	После окончания контроля: $s_{\text{прп}}(i), s_{\text{прп}}(i, j)$ – ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков
Вероятность необнаруженного отказа	$p_{\text{но}}^{\text{прп}}(I) = P\{\exists s_{\text{прп}}(i) \in S^-(i); \forall \exists s_{\text{прп}}(i, j) \in S^-(i, j) \forall z_{\text{прп}}(i) \in Z^+(i); \forall z_{\text{прп}}(i, j) \in Z^+(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	
Вероятность контролируемой работоспособности	$p_{\text{ра}}^{\text{прп}}(I) = P\{\forall s_{\text{прп}}(i) \in S^-(i), \forall s_{\text{прп}}(i, j) \in S^+(i, j); \forall z_{\text{прп}}(i) \in Z^+(i); \forall z_{\text{прп}}(i, j) \in Z^+(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	$z_{\text{прп}}(i), z_{\text{прп}}(i, j)$ – решение о ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков
Вероятность неконтролируемого отказа	$p_{\text{ко}}^{\text{прп}}(I) = P\{\exists s_{\text{прп}}(i) \in S^-(i) \forall \exists s_{\text{прп}}(i, j) \in S^-(i, j); z_{\text{прп}}(i, j) \in Z^-(i) \forall \exists z_{\text{прп}}(i, j) \in Z^-(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	

Таблица 3
Table 3

Третья группа характеристик достоверности эксплуатационного контроля ФС
The third group of operational control reliability characteristics of functional systems

ХДК ФС	Обозначение и определение	Примечание
Контроль в полете		
Вероятность достоверности результатов контроля в полете:		После окончания полета:
Годен	$d_{\text{г}}^{\text{п}}(I) = P\{\forall s_{\text{п}}(i) \in S^+(i); \forall s_{\text{п}}(i, j) \in S^+(i, j) / \forall z_{\text{п}}(i) \in Z^+(i); \forall z_{\text{п}}(i, j) \in Z^+(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	$s_{\text{п}}(i)$ – ТС i -го блока; $s_{\text{п}}(i, j)$ – ТС межблочной связи i -го и j -го блоков
Не годен	$d_{\text{кг}}^{\text{п}}(I) = P\{\exists s_{\text{п}}(i) \in S^-(i); \forall \exists s_{\text{п}}(i, j) \in S^-(i, j) / \exists z_{\text{п}}(i) \in Z^-(i); \forall \exists z_{\text{п}}(i, j) \in Z^-(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	$z_{\text{п}}(i), z_{\text{п}}(i, j)$ – решение о ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков

Окончание таблицы 3
Continuation of Table 3

Послеполетный контроль		
Годен	$d_{\overline{r}}^{\text{псп}}(I) = P\{\forall s_{\text{псп}}(i) \in S^+(i);$ $\forall s_{\text{псп}}(i, j) \in S^+(i, j) / \forall z_{\text{псп}}(i) \in Z^+(i);$ $\forall z_{\text{псп}}(i, j) \in Z^+(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	После окончания контроля: $s_{\text{псп}}(i), s_{\text{псп}}(i, j)$ – ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков
Не годен	$d_{\overline{nr}}^{\text{псп}}(I) = P\{\exists s_{\text{псп}}(i) \in S^-(i);$ $\forall \exists s_{\text{псп}}(i, j) \in S^-(i, j) / \exists z_{\text{псп}}(i) \in Z^-(i, j);$ $\forall \exists z_{\text{псп}}(i, j) \in Z^-(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	$z_{\text{псп}}(i), z_{\text{псп}}(i, j)$ – решение о ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков
Предполетный контроль		
Годен	$d_{\overline{r}}^{\text{прп}}(I) = P\{\forall s_{\text{прп}}(i) \in S^+(i);$ $\forall s_{\text{прп}}(i, j) \in S^+(i, j) / \forall z_{\text{прп}}(i) \in Z^+(i);$ $\forall z_{\text{прп}}(i, j) \in Z^+(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	$s_{\text{прп}}(i), s_{\text{прп}}(i, j)$ – ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков
Не годен	$d_{\overline{nr}}^{\text{прп}}(I) = P\{\exists s_{\text{прп}}(i) \in S^-(i);$ $\forall \exists s_{\text{прп}}(i, j) \in S^-(i, j) / \exists z_{\text{прп}}(i) \in$ $\in Z^-(i, j) \forall \exists z_{\text{прп}}(i, j) \in$ $\in Z^-(i, j); i, j = \overline{1, M}\}$	$z_{\text{прп}}(i), z_{\text{прп}}(i, j)$ – решение о ТС i -го блока и межблочной связи i -го и j -го блоков

Граф-модель надежности и достоверности контроля блока управления комплексной системы кондиционирования воздуха БУ КСКВ1 представлена на рис. 1.

Результаты расчета достоверности контроля приведены на рис. 2–4.

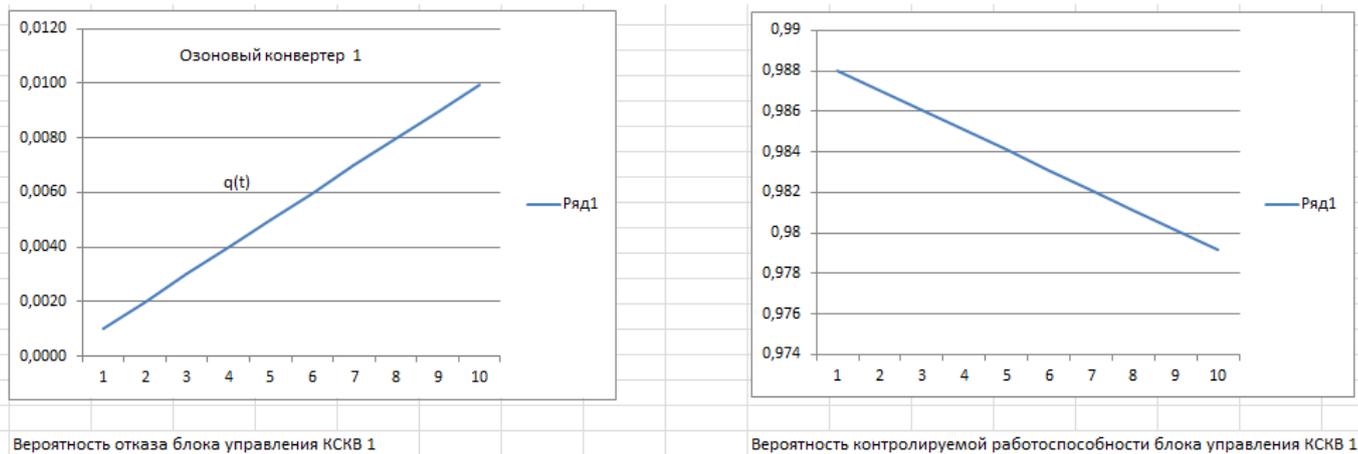


Рис. 2. Графики зависимости вероятности отказа и вероятности контролируемой работоспособности блока управления КСКВ1
Fig. 2. Graphs of dependence of the failure probability and the monitored performance probability of the IACS1 control unit

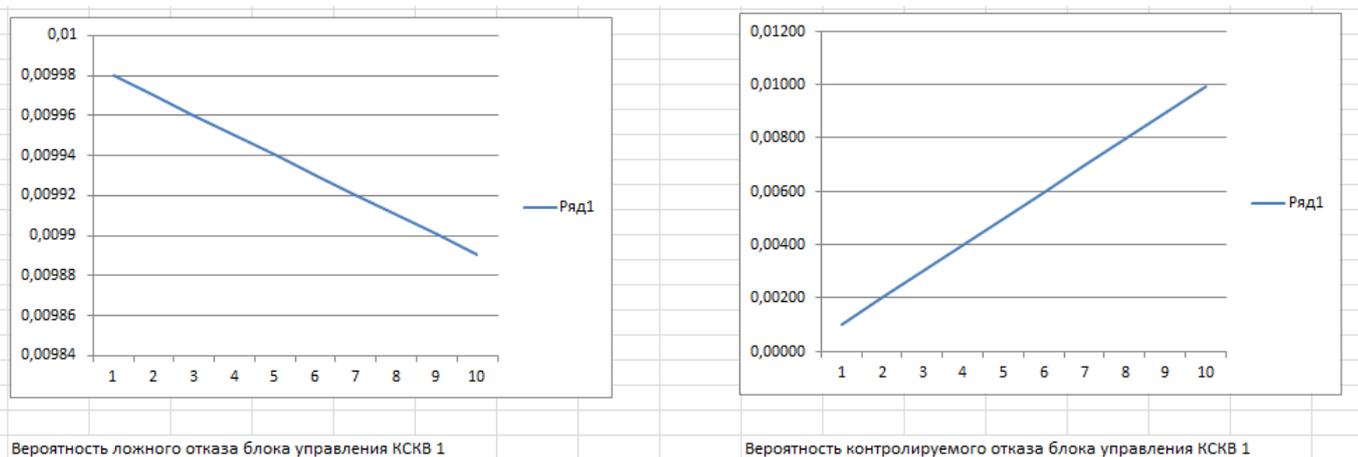


Рис. 3. Графики зависимости вероятностей ложного и контролируемого отказа блока управления КСКВ1
Fig. 3. Graphs of dependence of the false and controlled failure probabilities of the IACS1 control unit

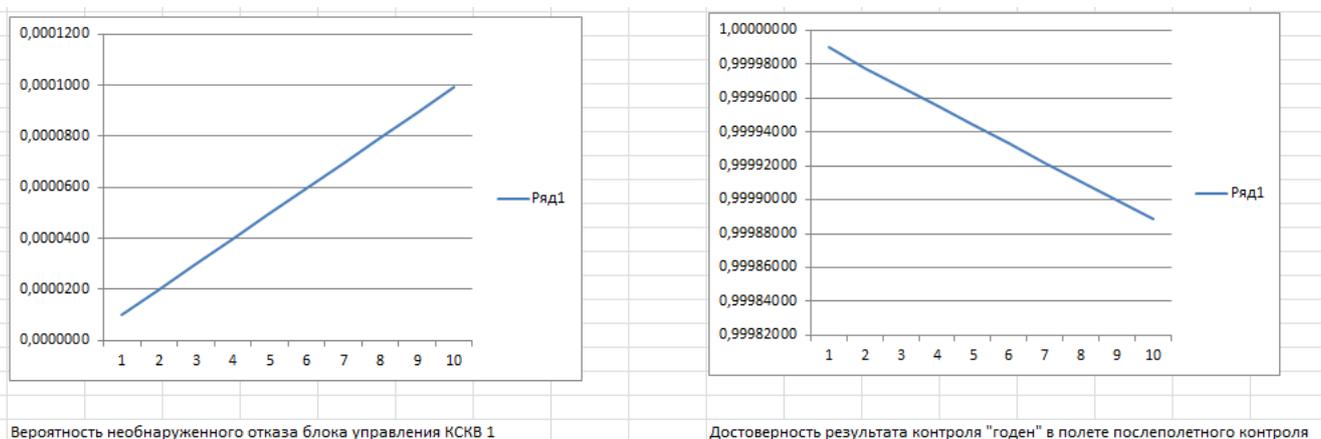


Рис. 4. Графики зависимости вероятности необнаруженного отказа и достоверности результатов контроля «годен» блока управления КСКВ1
Fig. 4. Graphs of dependence of an undetected failure probability and reliability of the control results “valid” for the IACS1 control unit

Заключение

1. Качество СЭК определяется основным свойством – достоверностью контроля или степенью объективности отображения результатами контроля реального технического состояния функциональных систем и комплексов бортового оборудования в процессе эксплуатационного контроля – в полете, при полетном и предполетном контроле. Оценка достоверности контроля требует применения системного подхода на основе соответствующего математического аппарата.

2. Определены параметры и показатели эффективности СЭК функциональных систем и комплексов бортового оборудования. Для этого сформированы рациональные множества технических состояний и решений о технических состояниях объектов контроля, определены характеристики достоверности эксплуатационного контроля функциональных систем и комплексов бортового оборудования, осуществлено их группирование по видам контроля и типам вероятностей.

3. На основе разработанных математических моделей проведен анализ достоверности контроля в полете с помощью встроенных средств контроля и послеполетного контроля с помощью интегральной системы управления техническим состоянием с последующей выработкой рекомендаций по повышению достоверности эксплуатационного контроля функциональных систем и комплексов бортового оборудования.

Список литературы

1. Федосов Е.А., Косьянчук В.В., Сельвесюк Н.И. Интегрированная модульная Авионика // Радиоэлектронные технологии. 2015. № 1. С. 66–71.

2. Левин С.Ф. Качество проверки средств измерений и апостериорная достоверность контроля // Измерительная техника. 2018. № 9. С. 20–25. DOI: 10.32446/0368-1025it-2018-9-20-25

3. Мальцев Г.Н., Якимов В.Л. Достоверность многоэтапного контроля техниче-

ского состояния объектов испытаний // Информационно-управляющие системы. 2018. № 1 (92). С. 49–57. DOI: 10.15217/issnl684-8853.2018.1.49

4. Данилевич С.Б., Третьяк В.В. Метрологическое обеспечение достоверности результатов контроля // Контроль. Диагностика. 2018. № 7. С. 56–60. DOI: 10.14489/td.2018.07.pp.056-060

5. Богоявленский А.А. Методология и практика обеспечения единства измерений при эксплуатации наземных автоматизированных систем контроля бортового оборудования воздушных судов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2021. № 37. С. 31–41.

6. Масленников Д.В. Влияние погрешностей средств измерительной техники на достоверность контроля / Д.В. Масленников, И.В. Куличкова, В.С. Еремина, Т.Д. Клочкова // Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей XXVIII Международной научно-практической конференции. Пенза, 25 мая 2019 г. Пенза: Наука и Просвещение, 2019. С. 113–116.

7. Чинючин Ю.М., Соловьев А.С. Применение Марковских процессов для анализа и управления эксплуатационной технологичностью летательного аппарата // Научный Вестник МГТУ ГА. 2020. Т. 23, № 1. С. 71–83. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-1-71-83

8. Данилевич С.Б., Третьяк В.В. Влияние вида распределения погрешности измерения на показатели достоверности контроля // Контроль. Диагностика. 2020. № 7. С. 48–52. DOI: 10.14489/td.2020.07.pp.048-052

9. Антонюк Е.М. О достоверности контроля адаптивных информационно-измерительных систем / Е.М. Антонюк, П.Е. Антонюк, И.Е. Варшавский, Д.С. Гвоздев // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям: сборник материалов конференции, 2022. Т. 1. С. 234–236.

10. Рагуткин А.В. Методы повышения достоверности контроля работоспособности цифровых систем / А.В. Рагуткин, М.Е. Ставровский, И.А. Александров, Е.С. Юрцев // Технология машиностроения. 2022. № 6. С. 36–42.

11. Okamura H., Dohi T. On Kolmogorov-Smirnov test for software reliability models with grouped data // 2019 IEEE 19th International Conference on Software Quality, Reliability and Security (QRS). Bulgaria, Sofia, 22–26 July 2019. Pp. 77–82. DOI: 10.1109/QRS.2019.00023

12. Lu P., Lu H. Application research of highly accelerated life test on civil aircraft airborne equipment // 2020 Global Reliability and Prognostics and Health Management (PHM-Shanghai). China, Shanghai, 16–18 October 2020. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/PHM-Shanghai49105.2020.9280918

13. Yin L. Test suite generation for software reliability testing based on hybrid Musa and Markov method // 2020 7th International Conference on Dependable Systems and Their Applications (DSA). China, Xi'an, 28–29 November 2020. Pp. 509–514. DOI: 10.1109/DSA51864.2020.00087

14. Zhang X. Reliability test of aircraft integrated electronic assemblies based on virtual qualification method / X. Zhang, Z. Xie, Z. Wang, C. Lu // 2021 Global Reliability and Prognostics and Health Management (PHM-Nanjing). China, Nanjing, 5–17 October 2021. Pp. 1–5. DOI: 10.1109/PHM-Nanjing52125.2021.9613086

15. Pan G. A Reliability evaluation method for multi-performance degradation products based on accelerated degradation testing / G. Pan, D. Li, Q. Li, C. Huang, B. Mo // 2022 IEEE 10th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC). China, Chongqing, 17–19 June 2022. Pp. 1871–1875. DOI: 10.1109/ITAIC54216.2022.9836924

16. Jiang P. A new method for deriving reliability qualification test plans / P. Jiang, B. Wang, D. Zhang, J. Qi // 2022 13th International Conference on Reliability, Maintainability, and Safety (ICRMS). Hong Kong, Kowloon, 21–24 August 2022. Pp. 140–143. DOI: 10.1109/ICRMS55680.2022.9944586

17. Кузнецов С.В. Системы эксплуатационного контроля бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации // Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества: сборник тезисов докладов Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию МГТУ ГА. Москва, 25–26 мая

2021 г. М.: ИД Академии Жуковского, 2021. С. 239–242.

18. Кузнецов С.В. Выбор и обоснование параметров и показателей эффективности системы эксплуатационного контроля блоков бортового оборудования воздушных судов // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2022. № 4. С. 70–82. DOI: 10.51955/2312-1327_2022_4_70

References

1. Fedosov, E.A., Kosyanchuk, V.V., Selvesyuk, N.I. (2015). Integrated modular avionics. *Radioelektronnyye tekhnologii*, no. 1, pp. 66–71. (in Russian)

2. Levin, S.F. (2018). Level of verification of measuring instruments and a posteriori reliability of control. *Measurement Techniques*, vol. 61, no. 9, pp. 863–871. DOI: 10.1007/s11018-018-1516-0 (in Russian)

3. Maltsev, G.N., Yakimov, V.L. (2018). Reliability of multi-stage control over technical condition of tested objects. *Information and control systems*, no. 1 (92), pp. 49–57. DOI: 10.15217/issnl684-8853.2018.1.49 (in Russian)

4. Danilevich, S.B., Tretyak, V.V. (2018). Metrological supervision of control results validity. *Kontrol'. Diagnostika*, no. 7, pp. 56–60. DOI: 10.14489/td.2018.07.pp.056-060 (in Russian)

5. Bogoyavlenskiy, A.A. (2021). Methodology and practice of ensuring the uniformity of measurements in the operation of ground-based automated systems for diagnostics airborne equipment of aircraft. *Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA)*, no. 37, pp. 31–41. (in Russian)

6. Maslennikov, D.V., Kulichkova, I.V., Eremina, V.S., Klochkova, T.D. (2019). The effect of errors of measuring instruments the reliability of the control. In: *Sovremennyye tekhnologii: aktual'nyye voprosy, dostizheniya i innovatsii: sbornik statey XXVIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Moscow: Nauka i Prosveshcheniye, pp. 113–116. (in Russian)

7. Chinyuchin, Yu.M., Solov'ev, A.S. (2020). Application of Markov processes for

analysis and control of aircraft maintainability. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 23, no. 1, pp. 71–83. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-1-71-83 (in Russian)

8. Danilevich, S.B., Tretyak, V.V. (2020). Influence of measurement error distribution the accuracy rates of the control. *Kontrol'. Diagnostika*, no. 7, pp. 48–52. DOI: 10.14489/td.2020.07.pp.048-052 (in Russian)

9. Antonyuk, E.M., Antonyuk, P.E., Varshavskiy, I.E., Gvozdev, D.S. (2022). On the reliability of control of adaptive information-measuring systems. In: *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam: sbornik materialov konferentsii*, vol. 1, pp. 234–236. (in Russian)

10. Ragutkin, A.V., Stavrovskiy, M.E., Aleksandrov, I.A., Yurtsev, E.S. (2022). Methods for increasing the reliability of digital systems performance monitoring. *Tekhnologiya mashinostroyeniya*, no. 6, pp. 36–42. (in Russian)

11. Okamura, H., Dohi, T. (2019). On Kolmogorov-Smirnov test for software reliability models with grouped data. In: *2019 IEEE 19th International Conference on Software Quality, Reliability and Security (QRS)*. Sofia, Bulgaria, 22–26 July, pp. 77–82. DOI: 10.1109/QRS.2019.00023

12. Lu, P., Lu, H. (2020). Application research of highly accelerated life test on civil aircraft airborne equipment. In: *2020 Global Reliability and Prognostics and Health Management (PHM-Shanghai)*. Shanghai, China, 16–18 October, pp. 1–6. DOI: 10.1109/PHM-Shanghai49105.2020.9280918

13. Yin, L. (2020). Test suite generation for software reliability testing based on hybrid Musa and Markov method. In: *2020 7th International Conference on Dependable Systems and Their Applications (DSA)*. Xi'an, China, 28–29 November, pp. 509–514. DOI: 10.1109/DSA51864.2020.00087

14. Zhang, X., Xie, Z., Wang, Z., Lu, C. (2021). Reliability test of aircraft integrated electronic assemblies based on virtual qualification method. In: *2021 Global Reliability and Prognostics and Health Management (PHM-Nanjing)*. Nanjing, China, 5–17 October, pp. 1–5. DOI: 10.1109/PHM-Nanjing52125.2021.9613086

15. Pan, G., Li, D., Li, Q., Huang, C., Mo, B. (2022). A reliability evaluation method for multi-performance degradation products based on accelerated degradation testing. In: *2022 IEEE 10th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC)*. Chongqing, China, 17–19 June, pp. 1871–1875. DOI: 10.1109/ITAIC54216.2022.9836924

16. Jiang, P., Wang, B., Zhang, D., Qi, J. (2022). A new method for deriving reliability qualification test plans. In: *2022 13th International Conference on Reliability, Maintainability, and Safety (ICRMS)*. Kowloon, Hong Kong, 21–24 August, pp. 140–143 DOI: 10.1109/ICRMS55680.2022.9944586

17. Kuznetsov, S.V. (2021). Operational control systems for on-board equipment of civil aviation aircraft. In: *Grazhdanskaya aviatsiya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva: sbornik tezisov dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 50-letiyu MGTU GA*. Moscow: ID Akademii Zhukovskogo, pp. 239–242. (in Russian)

18. Kuznetsov, S.V. (2022). Election and substantiation of parameters and performance indicators of the in-service inspection system of onboard aircraft equipment units. *Crede Experito: Transport, Society, Education, Language*, no. 4, pp. 70–82. DOI: 10.51955/2312-1327_2022_4_70 (in Russian)

Сведения об авторе

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

Information about the author

Sergey V. Kuznetsov, Doctor of Technical Sciences, Professor, the Head of the Aircraft Electrical Systems and Avionics Technical Operation Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, s.kuznetsov@mstuca.aero.

Поступила в редакцию	30.06.2023	Received	30.06.2023
Одобрена после рецензирования	21.07.2023	Approved after reviewing	21.07.2023
Принята в печать	21.11.2023	Accepted for publication	21.11.2023

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 62-233.3

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-75-87

Анализ используемых подходов расчета эвольвентных шлицевых соединений и методы учета их влияния на динамическое поведение систем

И.В. Николаев¹, М.К. Леонтьев¹, В.В. Попов²

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

²*МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*

Аннотация: Шлицевые соединения ввиду своих высоких параметров надежности и прочности широко распространены не только в машиностроении. Возможность обеспечивать передачу большого крутящего момента при достаточно большом ресурсе работы привела к активному использованию данных соединений в авиастроении. Поскольку в авиационных газотурбинных двигателях данный узел испытывает большие нагрузки, особое внимание уделяется не только прочностным характеристикам, но и влиянию на динамические параметры роторной системы. Для минимизации рисков разрушения и возникновения дефектов проводится большое количество исследований, позволяющих проводить оценку работы роторной системы со шлицами и прогнозировать ее поведение при возникновении различных факторов, приводящих к изменению работы шлицев. В данной статье проведен обзор различных методов, методик и моделей эвольвентных шлицевых соединений, использующихся при анализе динамического поведения роторных систем. Рассмотрены аналитические модели, позволяющие учитывать соединение в различных системах, и конечно-элементные модели, демонстрирующие описание различных процессов в шлицах. Исследованы работы, посвященные сравнению конечно-элементных моделей с аналитическими, подтверждающие результаты, связанные с динамическими характеристиками систем с ростом радиального и углового перекосов. Также представлены результаты сравнения вышеперечисленных моделей и их результатов с экспериментальными исследованиями для верификации и подтверждения различных эффектов. Приведенные исследования роторных систем с перекосом позволяют сделать вывод о существенном влиянии шлицев, поскольку они могут приводить к изменению жесткости соединения, перераспределению контакта, увеличению нагрузок в зацеплении, росту амплитуд вибраций, изменению спектра возбуждаемых частот и автоколебательным процессам вследствие различных факторов.

Ключевые слова: шлицевые соединения, верификация, автоколебания, перекос, моделирование.

Для цитирования: Николаев И.В., Леонтьев М.К., Попов В.В. Анализ используемых подходов расчета эвольвентных шлицевых соединений и методы учета их влияния на динамическое поведение систем // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 6. С. 75–87. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-75-87

Analysis of the approaches used for calculating involute splined couplings and the methods of considering their influence on the dynamic behavior of systems

I.V. Nikolaev¹, M.K. Leontiev¹, V.V. Popov²

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

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract: Spline couplings, due to their high reliability and strength parameters, are widespread not only in mechanical engineering. The ability to transmit high torque with a sufficiently long service life has led to the extensive use of these couplings in the aircraft industry. Since this unit is under heavy loads in aircraft gas turbine engines, much attention is paid not only to strength characteristics, but also to the influence on the dynamic parameters of the rotor system. To mitigate the risks of destruction and the occurrence of defects, a large number of studies are carried out allowing us to evaluate the rotor system operation with splines and make a forecast of its behavior in the event of various factors leading to a change in the operation of splines. This paper provides a review of various methods, techniques and models of involute spline couplings used in the analysis of the dynamic behavior of rotor systems. The analytical models that allow us to take into account the coupling in various systems as well as finite element models that demonstrate the description of various processes in splines. The publications, devoted to the comparison of finite element models with analytical ones confirming the results associated with the dynamic characteristics of systems with an increase in radial and angular swashes, have been considered. The results of comparing the above models and their results with experimental research to verify and confirm various effects are also presented. The given research of rotor systems with swash allows for a conclusion about a significant spline influence, since they can cause a change in the coupling rigidity, redistribution of contact, increased loads in meshing, increased vibration amplitudes, change in the spectrum of excited frequencies and self-oscillatory processes due to various factors.

Key words: spline couplings, verification, self-oscillations, swash, simulation.

For citation: Nikolaev, I.V., Leontiev, M.K., Popov, V.V. (2023). Analysis of the approaches used for calculating involute splined couplings and the methods of considering their influence on the dynamic behavior of systems. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 6, pp. 75–87. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-6-75-87

Введение

Эвольвентные шлицевые соединения получили большое распространение в авиационной технике благодаря высокой прочности, хорошей точности соединяемых деталей и возможности передавать большой крутящий момент. Повышенная прочность достигается благодаря большому количеству зубьев и утолщению зубьев к основанию, а коэффициенты концентрации напряжений при кручении в 1,5 раза ниже, чем у прямобочного соединения.

Для шлицевых соединений характерно неравномерное распределение нагрузки по длине, а поскольку данное соединение является высоконагруженным, то основной причиной потери работоспособности шлицев является повреждение рабочих поверхностей, а также усталостное разрушение зубьев. Поэтому расчет на прочность шлицевых соединений

включает расчет шлицевых валов на кручение при действии статических и переменных крутящих моментов и расчет зубьев [1].

При анализе динамического поведения роторных систем со шлицами более важным является оценка величины жесткости соединения, давление на контактирующих поверхностях, силы зацепления в шлицах, анализ контакта в зубьях и влияние шлицев на амплитудно-частотную характеристику системы. Рассматривая эвольвентное шлицевое соединение в составе роторной системы, необходимо отметить существование таких факторов, как радиальный и угловой перекося, которые могут приводить к увеличенной нагруженности соединения и являться причинами роста амплитуд вибраций и изменения собственных частот. В связи с этим шлицевые соединения в динамических системах невозможно рассматривать как абсолютно жесткие. Целесообразным методом анализа влияния шлицев является разработка моде-

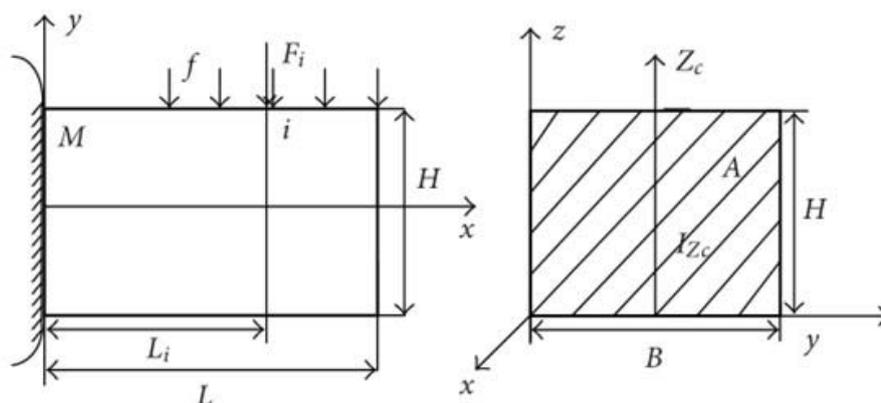


Рис. 1. Схема шлица, представляемого в виде балки
Fig. 1. The spline scheme represented as a beam

лей, позволяющих учитывать вышеперечисленные факторы.

Подобные математические решения позволяют моделировать поведение роторных систем и оценивать влияние шлицевого соединения на динамические параметры при различных условиях – учете боковых зазоров, возникновении радиального и углового перекосов, вариативных законах трения, посадках.

Целью настоящего исследования является анализ существующих моделей, позволяющих учитывать шлицевые соединения и их влияние на роторные системы для решения практических задач проектирования авиационных газотурбинных двигателей (ГТД).

Модели шлицевого соединения

Базовый метод расчета шлицевых муфт основывается на формулах изгиба балки [2]. Представление зуба в виде балочного элемента позволяет определить напряжения достаточно простым методом. Кроме того, контакт между зубьями наиболее часто описывается по теории Герца, что позволяет достаточно просто описывать касательные напряжения и напряжения сжатия в шлицах. Модели, использующие такие допущения, могут не обладать высокой точностью, но дают возможность предварительной оценки нагрузок и напряжений в соединении без использования значительных вычислительных ресурсов.

Одной из первых работ, посвященных вопросам шлицевого соединения с перекосом и действующим в нем силам, можно назвать работу [3]. Автором представлен механизм действующих в перекошенном соединении сил, показано их распределение и предложены простые формулы для оценки рождающихся усилий. Используемые простые соотношения могут быть полезны при оценке предельных нагрузок, действующих в шлицевой муфте. Также автором представлен алгоритм определения зазоров в соединении для каждого зуба. По результатам данной работы можно заключить, что возникающие в шлицевой муфте нагрузки зависят не только от геометрических параметров, но и от величины перекоса и коэффициента трения. Также данная работа продемонстрировала важность учета податливости зубьев, поскольку в случае описания зуба как абсолютно жесткого тела нагрузка в соединении будет передаваться лишь одной парой шлицев, в то время как учет деформаций шлица приводит к распределению передаваемых нагрузок. Это формирует определенные условия к создаваемым математическим моделям динамических систем со шлицевыми соединениями.

Наиболее распространенным методом описания деформаций шлица является представление его в виде балки, упругая деформация которой определяется как сумма деформаций изгиба, сдвига и упругого основания (рис. 1) [4, 5].

В соединении жесткость и силы, действующие на зуб, рассматриваются отдельно для каждого шлица, а результирующие усилия вычисляются как суммарные. Авторами исследуется влияние величины несоосности на силы в зацеплении и жесткость соединения. В результатах исследования отмечается нелинейное поведение сил зацепления и жесткости в зависимости от величины перекоса.

Одним из важных параметров в соединении является распределение нагрузки по шлицам. Аналитические модели, используемые при подобных расчетах, учитывают зазор по боковым поверхностям в шлицевом соединении, что позволяет контролировать степень взаимного проникновения при перекосах и оценивать влияние данного зазора на контакт. В исследованиях [6–8] авторами показано влияние величины перекоса на распределение контакта между зубьями, на жесткость соединения и влияние зазора по боковым поверхностям на нагрузку на зуб. Изменение контактирующих поверхностей происходит главным образом при росте перекоса. Величина зазора между боковыми поверхностями зубьев может перераспределить контакт только в двух крайних случаях – учет зазора и его отсутствие. При сравнении двух разных величин зазора можно отметить лишь рост нагрузки в контактирующих поверхностях, но не их перераспределение.

Влияние же перекоса на распределение контакта в шлицах приводит к увеличению давления на зубьях. Контактующие зоны смещаются, становятся более узкими. Поведение жесткостных характеристик имеет более нелинейный характер – величина радиальной жесткости падает, в то время как угловые коэффициенты возрастают. Однако данный эффект наблюдается лишь при небольших величинах крутящего момента в соединении – при дальнейшем увеличении нагрузки характеристика угловой жесткости становится похожей на радиальную.

Эти исследования позволяют выделить основные параметры, которые необходимо учитывать при создании аналитических моделей. Их сравнение с экспериментальными исследованиями или результатами конечно-

элементного моделирования позволяет говорить о верификации и подтверждении протекающих процессов.

Значительное количество работ посвящено сравнению аналитических и конечно-элементных (КЭ) моделей шлицевых соединений. Например, в работах [9–12] сопоставляются шлицы под действием нескольких величин перекоса (от 20 до 100 мкм) с различной величиной крутящего момента (от 100 до 5000 Н·м). В каждой из моделей отмечается перераспределение контактирующих шлицев, рост напряжений в контакте с ростом величины перекоса (174,8, 215,6 и 276 МПа для 0,02, 0,04 и 0,08 мм соответственно, [11]), увеличение сил зацепления. При верификации аналитических моделей в работах отмечены количественные различия. Авторы [10] связывают несоответствие с допущениями аналитической модели о том, что зацепление зубьев осуществляется одновременно и угловые смещения, создаваемые деформацией зубьев, равны. Предлагается следующее соотношение, позволяющее оценить величину зазора при возникновении радиального перекоса:

$$\eta_j = \eta_0 - e \cdot \cos\left(\varphi_j - \frac{\pi}{2} + \beta\right).$$

Здесь η_0 – зазор со стороны зуба при нормальном состоянии, φ_j – угол между зубом j и положительным направлением оси X , β – угол давления.

Представленные работы показывают необходимость верификации аналитических моделей с экспериментами и подтверждения полученных результатов с использованием конструкций и условий, применяемых в реальных системах. Также подобная необходимость связана с трудностями моделирования определенных процессов и их учетом в численных моделях.

Например, авторы работы [13] проводили сопоставление результатов, полученных в КЭ-модели, эксперименте и аналитически. В анализе использовались различные виды посадок в соединении – натяги величиной 0,05 и 0,03 мм, зазоры величиной 0,03, 0,05 мм

и 0 мм, а также исследовалось влияние усилий предварительной затяжки на жесткость соединения. По результатам верификации аналитическая модель показывала значительные расхождения с результатами конечно-элементного моделирования и эксперимента. Авторы связывают данный эффект с потерей жесткости шлицевого соединения, обусловленной скольжением контактных поверхностей, и предлагают использовать параметрическую КЭ-модель при моделировании динамики ротора.

Также отмечаются исследования, связанные со сравнением жесткостных характеристик моделей и экспериментальных установок. Авторами [14] предложено сравнение результатов по статической жесткости роторной системы, полученной экспериментально, и конечно-элементной модели. Следует отметить, что при моделировании использовались три различных вида контакта между центрирующими поясками шлицев – зафиксированные относительно друг друга, контакт с трением (коэффициент трения скольжения 0,22) и параметрический (описывается с использованием модулей упругости двух контактирующих деталей). По результатам анализа наилучшее совпадение с экспериментальными данными показывает контактная модель.

В исследованиях [15] также анализируются результаты трех видов моделей – аналитической, конечно-элементной и экспериментальной. Распределение контактного давления в соединении получено для двух значений крутящего момента – 16,4 и 26,2 Н·м. Можно заметить, что в обоих случаях присутствуют две характерные зоны – зона повышенного давления, расположенная ближе к концу шлицевого соединения, и зона пониженного давления, находящаяся на длине 0,4–0,5 от длины соединения. Авторы отмечают существование отдельных зон с противоречивыми результатами, несмотря на хорошее совпадение. Приближения результатов авторы добивались путем корректирующих коэффициентов, выбираемых путем минимизации как стандартного отклонения, так и средней абсолютной ошибки.

Изучение влияния углового перекоса на величину деформаций и жесткость зубьев

шлицевого соединения представлено в работе [16]. Рассматривая соединение при трех значениях углового перекоса (0, 5' и 10'), сравнивают результаты между конечно-элементной моделью, экспериментом и численной моделью, предложенной авторами для оценки величин деформаций. Отмечается хорошее совпадение результатов – разница между результатами эксперимента и КЭ-модели составляет 7,6 %, а между аналитической моделью и экспериментом – 8,5 %. Также можно заметить, что увеличение величины угловой несоосности приводит к увеличению деформаций зубьев и падению жесткости зуба.

В некоторых исследованиях шлицевых соединений под действием перекоса рассматривается эффект самоцентрирования. Данный процесс происходит при действии крутящего момента, приводящего к возникновению центрирующего момента между поверхностями шлицев, находящихся в контакте. Например, в работе [17] авторами проводится сравнение результатов аналитической, численной и экспериментальной моделей на предмет величины центрирующего момента в перекошенном шлицевом соединении. Разработанная численная модель отличается от аналитических формул, доступных в литературе, итерационным вычислением контактной площадки зуба, а также учетом его жесткости и угла смещения. По результатам проведенного сравнения авторы отмечают значительное расхождение между аналитическими и экспериментальными исследованиями. Данные же численной модели более близки к экспериментальной, однако также имеют несоответствие – авторы связывают это с учетом лишь одной пары зубьев в зацеплении. Улучшение результатов может быть достигнуто путем учета фактического количества контактирующих зубьев.

Влияние шлицевого соединения на динамическое поведение системы

Влияние несоосности в шлицевом соединении не ограничивается жесткостными или прочностными характеристиками. Значи-

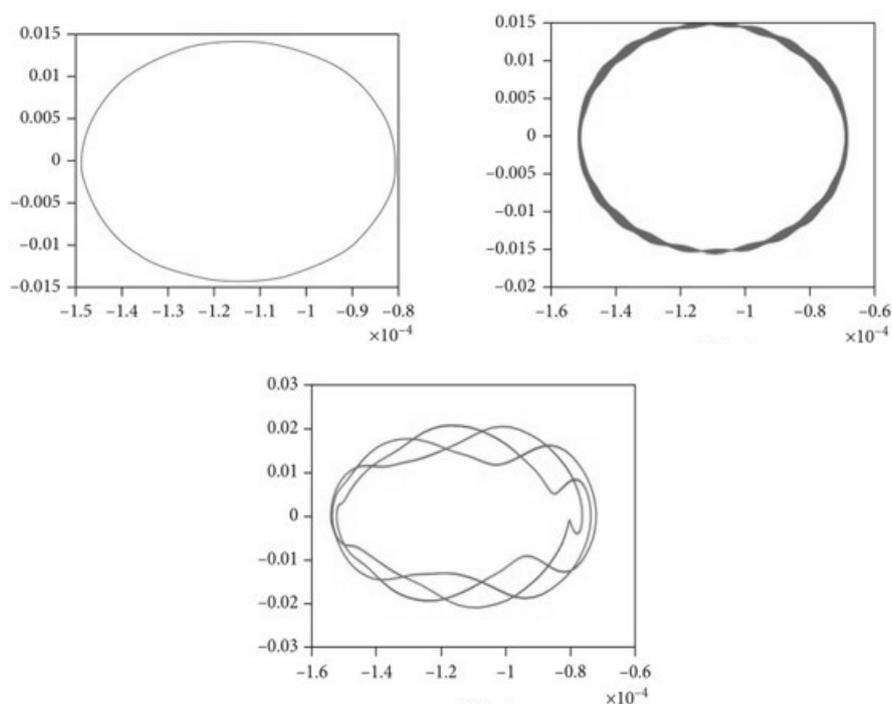


Рис. 2. Орбиты движения роторной системы
Fig. 2. Orbits of the rotor system motions

тельное влияние оказывается и на такие динамические параметры, как положение критических скоростей, амплитуды вибраций, спектр возбуждаемых частот и устойчивость системы.

Особый интерес представляют исследования, связанные с влиянием шлицевой муфты с перекосом на спектр возбуждаемых частот. Работа [18] посвящена анализу двухвальной системы на шариковых подшипниках, соединенной шлицевой муфтой. Возникновение радиального перекоса позволяет увидеть в спектре возбуждаемых частот гармоники x_1 , x_2 в горизонтальном направлении и x_1 и $x_{2,5}$, а также частоту 70 Гц, близкую к четвертой критической скорости системы (69 Гц) в вертикальном направлении. При возникновении углового перекоса на спектре частот присутствуют лишь гармоники x_1 (в обоих направлениях) и x_2 (в вертикальном направлении), а при действии одновременно двух видов несоосности в вертикальном направлении также возбуждается частота 34 Гц.

Например, авторы исследования [19] анализируют модель двух валов, соединенных шлицевым соединением с перекосом. При

постоянном значении скорости вращения и перекоса в вертикальной плоскости (4000 об/мин и $1 \cdot 10^{-5}$ м соответственно) и одновременном увеличении перекоса в горизонтальной плоскости (от 273 до 283 мкм) наблюдается переход к квазипериодическому состоянию системы. Дальнейшее увеличение несоосности до 305 мкм приводит к переходу в мультипериодическое и хаотическое состояние, что делает систему весьма неустойчивой и подверженной высоким нагрузкам (рис. 2). Данные результаты подтверждаются спектром возбуждаемых частот и диаграммами Пуанкаре.

Верификация аналитических моделей может проводиться также с позиции сравнения таких параметров системы, как собственные частоты и спектр возбуждения. Как правило, экспериментальные модели таких работ состоят из двух роторов, соединенных между собой шлицевой муфтой, имеющих две опоры (для каждого вала) и приводящихся во вращение электромотором. В некоторых работах установка состоит из электромотора и вала, соединенных между собой шлицами, которые являются объектом исследования.

Авторы статьи [20] приводят результаты сравнения первых четырех собственных частот, полученных на экспериментальной системе и с использованием аналитической модели, использующей метод матриц перехода Риккати. Разница между полученными данными не превышает 3 %.

Верификация аналитической модели в работе [21] проведена с позиции анализа влияния перекоса на спектр возбуждаемых частот. Как показывают результаты, рост перекоса приводит не только к возбуждению трех дополнительных частот (32, 49 и 66 Гц), но и к росту амплитуд по первой и второй частотам. При сравнении с результатами эксперимента авторами отмечается некоторое расхождение, связанное с упрощением модели, а также учетом процессов трения.

При верификации аналитических моделей и полученных в процессе их расчета данных также часто проводят анализ роторных систем с исследованием типа посадки шлицев на динамику системы. Как правило, рассматриваются три качественных типа посадки – с зазором, с натягом и переходная. Основными зависящими параметрами являются критические скорости и амплитуды вибраций.

Исследования, проведенные в работах [22, 23], показывают, что критическая скорость динамической системы со шлицевой муфтой увеличивается при посадке с натягом или при свободной посадке. Помимо влияния посадки отмечается влияние условий смазывания самого соединения. По результатам исследований авторы заключают, что при использовании жесткой посадки отмечается уменьшение амплитуд вибраций относительно переходной посадки. Однако данные выводы справедливы лишь для соединения без смазки; в случае наличия смазывающего материала амплитуды вибраций распределяются ровно наоборот. Посадка с зазором показывает меньшие вибрации относительно переходной посадки, что указывает на ее целесообразное использование при больших величинах внешнего демпфирования. При наличии смазывающего материала в шлицах критическая скорость системы при посадке с натягом – 3273 об/мин, а для системы с переходной посадкой – 3207 об/мин.

Рассматривая динамические системы со шлицевыми соединениями, нельзя не отметить важность учета и анализа воздействия силы трения на динамику шлицевого соединения. Изучение данного вопроса включает рассмотрение различных моделей трения, их влияние на положение критических частот и амплитуду вибраций, а также возможность возникновения автоколебательных процессов.

Как правило, автоколебательные процессы связывают с характеристикой трения. В работах [24–29] приведены примеры простейших механических систем, показывающих возможность действия силы трения не как диссипативного процесса, а как возбуждающей силы. Одним из условий появления подобного явления указывается наличие участка падения на характеристике трения. Однако в некоторых исследованиях авторами отмечено изменение амплитудно-частотных характеристик системы при переходе от влажного трения к сухому.

Например, в работе [30] исследуется связь между величиной трения и автоколебательными процессами. Рассматривается численная модель роторной системы из двух валов, соединенных шлицевой муфтой, и имеющей три опоры в виде подшипников. Шлицевое соединение описывается как матрица жесткости с коэффициентами радиальных и угловых значений. Используя каскадные диаграммы, авторы показывают, что в случае вязкого трения (коэффициент трения 0,05) присутствует лишь частота вращения. Однако с увеличением трения (рост коэффициента от 0,1 до 0,3) появляется еще одна собственная частота колебаний. При этом амплитуды вибраций по данной частоте и ее положение на каскадной диаграмме напрямую зависели от величины трения. Авторы связывают данный эффект автоколебательного процесса в системе с вращением модели выше критической частоты и достаточной величиной силы трения. Однако при работе ниже критической скорости система остается устойчивой и трение мало влияет на амплитудно-частотные характеристики. Отмечается, что, несмотря на реализацию данного эффекта, его исследование не было достаточным ввиду простоты

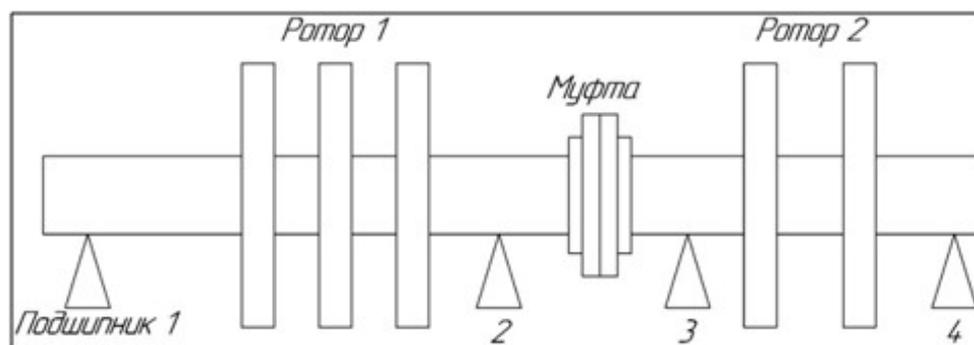


Рис. 3. Схема исследуемой системы
Fig. 3. The scheme of the system under study

модели и нуждается в экспериментальном подтверждении.

В исследовании [31] авторами представлены результаты динамического поведения роторной системы с тремя типами муфт – жесткой, шлицевой и податливой (рис. 3).

Согласно полученным результатам пороговая частота системы находится в окрестности 3450 об/мин. Потеря устойчивости при вращении выше данной частоты может быть вызвана эффектом «масляного вихря» подшипника скольжения 2 или автоколебательным процессом от шлицевой муфты. В результатах проведенного эксперимента отмечается, что при увеличении частоты вращения от 3050 до 3300 об/мин потеря устойчивости ротора связана с возникновением масляного вихря в подшипнике 2. При дальнейшем увеличении частоты вращения вибрации ротора 1 остаются прежними, в то время как для ротора 2 наблюдается рост вибраций по гармонике, равной 0,6875 от частоты вращения. При уменьшении частоты вращения амплитуда данной формы колебаний может достигать больших значений.

Исходя из полученных результатов авторы отмечают, что первая критическая частота, связанная с большими вибрациями ротора 1, равна 1650 об/мин, а вторая, связанная с вибрациями ротора 2, – 2280 об/мин. Следовательно, потеря устойчивости ротора на частоте 3302 об/мин обусловлена появлением автоколебаний шлицевой муфты.

Работа [32] посвящена анализу возникновения автоколебательного процесса вслед-

ствие перекоса из-за различных посадок на центрирующих поверхностях. Разработанная авторами численная модель, учитывающая силу трения между поверхностями зубьев, позволяет определять коэффициент трения и его влияние на частоты системы. Используя для решения β -метод Ньюмарка, авторы реализуют трение между шлицами и как компоненту матрицы демпфирования, и как компоненту матрицы жесткости, что позволяет смоделировать прямое влияние на спектр частот.

По результатам исследований системы с тремя различными типами посадок (натяг на двух поверхностях; натяг на поверхности 1, зазор на поверхности 2 и зазор на двух поверхностях) авторы отмечают, что при появлении посадки с зазором при увеличении числа оборотов ротора в спектре возбуждения можно наблюдать появления субгармонической частоты, а также рост вибраций. Сброс скорости вращения приводит к резкому падению амплитуд, и система возвращается в устойчивое положение.

Заключение

В рассмотренных работах продемонстрированы различные подходы к расчету, анализу и оценке влияния шлицевых соединений в роторных системах на динамические характеристики этих систем. Можно отметить, что в последнее десятилетие количество работ, посвященных математическому моделирова-

нию шлицевых соединений с перекосом, значительно возросло. При рассмотрении различных методов учета всех возможных эффектов авторами проводится верификация создаваемых моделей с результатами экспериментальных исследований, что говорит о достоверности получаемых результатов. Использование аналитических методов анализа зацепления позволяет проектировать динамические системы со шлицевыми муфтами с учетом перераспределения контакта, увеличения давления и нагрузок, влияния посадки и перекоса на амплитудно-частотные характеристики.

Исследуемый эффект возникновения субгармонических частот в спектре также находит экспериментальное подтверждение. Выполненные в данном направлении работы указывают на необходимость учета в моделях законов трения, которое, согласно многим источникам, является одной из основных причин возбуждения таких частот.

Список литературы

1. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: справочник. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1979. 704 с.

2. Dudley D.W. How to design involute splines // Product Engineering, 1957. October. Pp. 75–80.

3. Crease A.B. Forces generated by gear couplings // Proceedings of the International Conference on Flexible Couplings for High Powers and Speeds, 1977. June 29 – July 1. Pp. 572–578.

4. Zhao G., Liu Z., Chen F. Meshing force of misalignment spline coupling and the influence on rotor system [Электронный ресурс] // International Journal of Rotating Machinery. 2008. Vol. 2008. 8 p. DOI: 10.1155/2008/321308 (дата обращения: 03.12.2022).

5. Liu Z., Zhao G. Modeling research on radial force in gear coupling with parallel misalignment [Электронный ресурс] // 12th IFToMM World Congress. Besancon, France, 2007. URL: <https://www.europeana.eu/en/item/>

2020801/dmglib_handler_docum_20363009
(дата обращения: 03.02.2023).

6. Xue X. Nonlinear dynamic load analysis of aviation spline coupling with mass eccentricity and misalignment / X. Xue, Q. Huo, J. Liu, J. Jia [Электронный ресурс] // Advances in Mechanical Engineering. 2021. Vol. 13, no. 2. 19 p. DOI: 10.1177/1687814021996 (дата обращения: 03.02.2023).

7. Hong J., Talbot D., Kahraman A. A stiffness formulation for spline joints [Электронный журнал] // Journal of mechanical design. 2016. Vol. 138, no. 4. 8 p. DOI: 10.1115/1.4032631 (дата обращения: 03.02.2023).

8. Wink C.H., Nakandakar M. Influence of gear loads on spline coupling // Power Transmission Engineering. 2014. Pp. 42–49.

9. Curà F., Mura A., Gravina M. Load distribution in spline coupling teeth with parallel offset misalignment // Journal of mechanical engineering science. 2015. Vol. 227, iss. 10. Pp. 2195–2205. DOI: 10.1177/0954406212471916

10. Hu Y. Study on the meshing force of misaligned gear coupling / Y. Hu, H. Wang, Y. Tan, L. Jiang, S. Jiang // Proceedings of the 2016 International Forum on Mechanical, Control and Automation (IFMCA 2016), 2016. Vol. 113. Pp. 452–458. DOI: 10.2991/ifmca-16.2017.70

11. Bai J. Dynamic simulation analysis on axle spline of high-speed train gauge-change system / J. Bai, W. Wang, P. Zhou, Y. Wang [Электронный ресурс] // Shock and Vibration. 2021. Vol. 2021, ID: 8866405. P. 19. DOI: 10.1155/2021/8866405 (дата обращения: 03.02.2023).

12. Curà F., Mura A. Analysis of a load application point in spline coupling teeth // Journal of Zhejiang University-Science A. 2014. Vol. 15, no. 4. Pp. 302–308. DOI: 10.1631/jzus.A1300323

13. Zhang Q. Study on the stiffness loss and its affecting factors of the spline joint used in rotor system / Q. Zhang, W. Li, Z. Liang, J. Hong [Электронный ресурс] // Proceedings of ASME Turbo Expo. 2014. 11 p. DOI: 10.1115/GT2014-26176 (дата обращения: 03.02.2023).

14. **Wu F.** Bending stiffness and dynamic characteristics of a rotor with spline joints [Электронный ресурс] / F. Wu, Z. Liang, Y. Ma, D. Zhang // Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 4A: Dynamics, Vibration and Control. San Diego, California, USA. November 15–21, 2013. 7 p. DOI: 10.1115/IMECE2013-62657 (дата обращения: 03.02.2023).
15. **Cuffaro V., Curà F., Mura A.** Analysis of the pressure distribution in spline couplings // Journal of Mechanical Engineering Science. 2012. Vol. 226, no. 11. Pp. 2852–2859. DOI: 10.1177/0954406212440670
16. **Curà F., Mura A.** Experimental procedure for evaluation of tooth stiffness in spline coupling including angular misalignment // Mechanical Systems and Signal Processing. 2013. Vol. 40. Pp. 545–555. DOI: 10.1016/j.ymssp.2013.06.033
17. **Curà F., Mura A.** Experimental and theoretical investigation about reaction moments in misaligned splined couplings // Mechanical Systems and Signal Processing. 2014. Vol. 45. Pp. 504–512. DOI: 10.1016/j.ymssp.2013.12.005
18. **Gupta T.C., Gupta K.** Modeling of flexible coupling to connect misalignment flexible rotors supported on ball bearing [Электронный ресурс] // Proceedings of ASME Turbo Expo. 2014. 14 p. DOI: 10.1115/GT2014-26891 (дата обращения: 03.02.2023).
19. **Xue X., Huo Q., Liu J.** Nonlinear vibration characteristic of the involute spline coupling in aero engine with the parallel misalignment [Электронный ресурс] // International Journal of Aerospace Engineering. 2021. Vol. 2021. ID: 6689442. 19 p. DOI: 10.1155/2021/6689442 (дата обращения: 03.02.2023).
20. **Su X.** Analysis of dynamic characteristic for misalignment-spline gear shaft based on whole transfer matrix method / X. Su, H. Lu, X. Zhang, W. Fan, Y. Zhang // Journal of Vibroengineering. 2018. Vol. 20, no. 5. Pp. 1392–1408. DOI: 10.21595/jve.2017.18761
21. **Wei F.** Dynamic Characteristics of gear coupling and rotor system in transmission process considering misalignment and tooth contact analysis / F. Wei, L. Hong, Z. Yongquan, S. Xiangang [Электронный ресурс] // Processes. 2020. Vol. 8, iss. 11. 23 p. DOI: 10.3390/pr8111336 (дата обращения: 03.02.2023).
22. **Jing J., Gao T., Chen Ch.** The study on spline coupling dynamic coefficients and its impact on rotor stability // 23rd International Congress on Sound and Vibration 2016 (ICSV 23). Greece, Athens, 2016. Pp. 3390–3397.
23. **Dai Z.** Extensive experimental study on the stability of rotor system with spline coupling / Z. Dai, J. Jing, C. Chen, J. Cong [Электронный ресурс] // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2018: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2018. Vol. 7A: Structures and Dynamics. Oslo, Norway, 11–15 June 2018. V07AT33A021. ASME. DOI: 10.1115/GT2018-76262 (дата обращения: 03.02.2023).
24. **Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э.** Теория колебаний. М.: Физматгиз, 1959. 915 с.
25. **Харкевич А.А.** Автоколебания. М.: Государственное изд-во технико-теоретической литературы, 1954. 172 с.
26. **Хейл Дж.К.** Колебания в нелинейных системах: пер. с англ. М.: Мир, 1966. 232 с.
27. **Прочность. Устойчивость. Колебания: справочник.** В 3 т. / Под ред. И.А. Биргера, Я.Г. Пановко. М.: Машиностроение, 1968. 1864 с.
28. **Магнус К.** Колебания: Введение в исследование колебательных систем: пер. с нем. М.: Мир, 1982. 304 p.
29. **Попов В.Л.** Механика контактного взаимодействия и физика трения. От нанотрибологии до динамики землетрясений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 352 с.
30. **Zhu H., Chen W., Zhu R. et al.** Modeling and dynamic analysis of spline-connected multi-span rotor system // Meccanica. 2020. Vol. 55. Pp. 1413–1433. DOI: 10.1007/s11012-020-01163-9
31. **Zhao G.** Study of stabilities of rotor-bearing system with different types of couplings / G. Zhao, Z. Liu, Y. Wang, J. Zhang [Электронный ресурс] // Proceedings of the ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air, 2009. Vol. 6: Structures and Dynamics, Parts A and B. Orlando, Florida, USA,

8–12 June 2009. Pp. 919–928. DOI: 10.1115/GT2009-59751 (дата обращения: 03.02.2023).

32. Wang T. Stability analysis of rotor with a spline coupling / T. Wang, Y. Wang, M. Liu, Z. Zhong [Электронный ресурс] // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. 13 p. DOI: 10.1088/1742-6596/2252/1/012001 (дата обращения: 03.02.2023).

References

1. Birger, I.A., Shorr, B.F., Iosilevich, G.B. (1979). Calculation of machine parts strength: Handbook. 3rd ed., pererab. i dop. Moscow: Mashinostroyeniye, 704 p. (in Russian)

2. Dudley, D.W. (1957). How to design involute splines. *Product Engineering*, October, pp. 75–80.

3. Crease, A.B. (1977). Forces generated by gear couplings. In: *Proceedings of the International Conference on Flexible Couplings for High Powers and Speeds*, June 29–July 1, pp. 572–578.

4. Zhao, G., Liu, Z., Chen, F. (2008). Meshing force of misalignment spline coupling and the influence on rotor system. *International Journal of Rotating Machinery*, vol. 2008, 8 p. DOI: 10.1155/2008/321308 (accessed: 03.02.2023).

5. Liu, Z., Zhao, G. (2007). Modeling research on radial force in gear coupling with parallel misalignment. In: *12th IFToMM World Congress*, Besancon, France. Available at: https://www.europeana.eu/en/item/2020801/dmg_lib_handler_docum_20363009 (accessed: 03.02.2023).

6. Xue, X., Huo, Q., Liu, J., Jia, J. (2021). Nonlinear dynamic load analysis of aviation spline coupling with mass eccentricity and misalignment. *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 2, 19 p. DOI: 10.1177/1687814021996 (accessed: 03.02.2023).

7. Hong, J., Talbot, D., Kahraman, A. (2016). A stiffness formulation for spline joints. *Journal of mechanical design*, vol. 138, no. 4, 8 p. DOI: 10.1115/1.4032631 (accessed: 03.02.2023).

8. Wink, C.H., Nakandakar, M. (2014). Influence of gear loads on spline coupling. *Power Transmission Engineering*, pp. 42–49.

9. Curà, F., Mura, A., Gravina, M. (2015). Load distribution in spline coupling teeth with parallel offset misalignment. *Journal of mechanical engineering science*, vol. 227, issue 10, pp. 2195–2205. DOI: 10.1177/0954406212471916

10. Hu, Y., Wang, H., Tan, Y., Jiang, L., Jiang, S. (2016). Study on the meshing force of misaligned gear coupling. In: *Proceedings of the 2016 International Forum on Mechanical, Control and Automation (IFMCA 2016)*, vol. 113, pp. 452–458. DOI: 10.2991/ifmca-16.2017.70

11. Bai, J., Wang, W., Zhou, P., Wang, Y. (2021). Dynamic simulation analysis on axle spline of high-speed train gauge-change system. *Shock and Vibration*, vol. 2021, ID: 8866405, p. 19. DOI: 10.1155/2021/8866405 (accessed: 03.02.2023).

12. Curà, F., Mura, A. (2014). Analysis of a load application point in spline coupling teeth. *Journal of Zhejiang University-Science A*, vol. 15, no. 4, pp. 302–308. DOI: 10.1631/jzus.A1300323

13. Zhang, Q., Li, W., Liang, Z., Hong, J. (2014). Study on the stiffness loss and its affecting factors of the spline joint used in rotor system. *Proceedings of ASME Turbo Expo*, 11 p. DOI: 10.1115/GT2014-26176 (accessed: 03.02.2023).

14. Wu, F., Liang, Z., Ma, Y., Zhang, D. (2013). Bending stiffness and dynamic characteristics of a rotor with spline joints. In: *Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 4A: Dynamics, Vibration and Control*. San Diego, California, USA. November 15–21, 7 p. DOI: 10.1115/IMECE2013-62657 (accessed: 03.02.2023).

15. Cuffaro, V., Curà, F., Mura, A. (2012). Analysis of the pressure distribution in spline couplings. *Journal of mechanical engineering science*, vol. 226, no. 11, pp. 2852–2859. DOI: 10.1177/0954406212440670

16. Curà, F., Mura, A. (2013). Experimental procedure for evaluation of tooth

stiffness in spline coupling including angular misalignment. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 40, pp. 545–555. DOI: 10.1016/j.ymsp.2013.06.033

17. Curà, F., Mura, A. (2014). Experimental and theoretical investigation about reaction moments in misaligned splined couplings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 45, pp. 504–512. DOI: 10.1016/j.ymsp.2013.12.005

18. Gupta, T.C., Gupta, K. (2014). Modeling of flexible coupling to connect misalignment flexible rotors supported on ball bearing. *Proceedings of ASME Turbo Expo*, 14 p. DOI: 10.1115/GT2014-26891 (accessed: 03.02.2023).

19. Xue, X., Huo, Q., Liu, J. (2021). Nonlinear vibration characteristic of the involute spline coupling in aero engine with the parallel misalignment. *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2021, ID: 6689442, 19 p. DOI: 10.1155/2021/6689442

20. Su, X., Lu, H., Zhang, X., Fan, W., Zhang, Y. (2018). Analysis of dynamic characteristic for misalignment-spline gear shaft based on whole transfer matrix method. *Journal of Vibroengineering*, vol. 20, no. 5, pp.1392–1408. DOI: 10.21595/jve.2017.18761

21. Fan, W., Lu, H., Zhang, Y., Su, X. (2020). Dynamic Characteristics of gear coupling and rotor system in transmission process considering misalignment and tooth contact analysis. *Processes*, vol. 8, issue 11, 23 p. DOI: 10.3390/pr8111336 (accessed: 03.02.2023).

22. Jing, J., Gao, T., Chen, Ch. (2016). The study on spline coupling dynamic coefficients and its impact on rotor stability. In: *23rd International Congress on Sound and Vibration (ICSV 23)*. Athens, Greece, pp. 3390–3397.

23. Dai, Z., Jing, J., Chen, C., Cong, J. (2018). Extensive experimental study on the stability of rotor system with spline coupling. In: *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2018:*

Turbomachinery Technical Conference and Exposition, vol. 7A: Structures and Dynamics. Oslo, Norway. June 11–15. V07AT33A021. ASME. DOI: 10.1115/GT2018-76262 (accessed: 03.02.2023).

24. Andronov, A.A., Vitt, A.A., Khaykin, S.E. (1959). Oscillation theory. Moscow: Fizmatgiz, 915 p. (in Russian)

25. Harkevich, A.A. (1954). Self-oscillations. Moscow: Gosudarstvennoye izdatelstvo tekhniko-teoreticheskoy literatury, 172 p. (in Russian)

26. Hale, J.K. (1963). Oscillations in nonlinear systems. McGraw-Hill, 180 p.

27. Birger, I.A., Panovko, Y.G. (Eds.) (1968). Strength. Sustainability. Oscillations: Reference book. In 3 vols. Moscow: Mashinostroyeniye, 1864 p. (in Russian)

28. Magnus, K. (1982). Oscillations: An introduction to the study of oscillatory systems. Translated from German. Moscow: Mir, 304 p. (in Russian)

29. Popov, V.L. (2013). Mechanics of contact interaction and physics of friction. From nanotribochemistry to earthquake dynamics. Moscow: FIZMATLIT, 352 p. (in Russian)

30. Zhu, H., Chen, W., Zhu, R. et al. (2020). Modelling and dynamic analysis of spline-connected multi-span rotor system. *Meccanica*, vol. 55, pp. 1413–1433. DOI: 10.1007/s11012-020-01163-9

31. Zhao, G., Liu, Z., Wang, Y., Zhang, J. (2009). Study on stabilities of rotor-bearing systems with different types of couplings. In: *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2009: Power for Land, Sea, and Air. Volume 6: Structures and Dynamics, Parts A and B*. Orlando, Florida, USA. June 8–12, pp. 919–928. DOI: 10.1115/GT2009-59751 (accessed: 03.02.2023).

32. Wang, T., Wang, Y., Liu, M., Zhong, Z. (2022). Stability analysis of rotor with a spline coupling. *Journal of Physics: Conference Series*, 13 p. DOI: 10.1088/1742-6596/2252/1/012001 (accessed: 03.02.2023).

Сведения об авторах

Николаев Илья Витальевич, аспирант кафедры конструкции и проектирования двигателей Московского авиационного института, nikolka831@mail.ru.

Леонтьев Михаил Константинович, д. т. н., профессор кафедры конструкции и проектирования двигателей Московского авиационного института, lemka@alfatran.com.

Попов Валерий Васильевич, старший преподаватель кафедры прикладной механики МГТУ им. Баумана, vvpopov.bmstu@gmail.com.

Information about the authors

Ilya V. Nikolaev, Postgraduate Student of the Engine Design and Engineering Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), nikolka831@mail.ru.

Michael K. Leontiev, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Engine Design and Engineering Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), lemka@alfatran.com.

Valery V. Popov, Senior Lecturer of the Applied Mechanics Chair, Bauman Moscow State Technical University, vvpopov.bmstu@gmail.com.

Поступила в редакцию	21.04.2023	Received	21.04.2023
Одобрена после рецензирования	23.05.2023	Approved after reviewing	23.05.2023
Принята в печать	21.11.2023	Accepted for publication	21.11.2023

ББК 05
Н 34
Св. план 2023

Научный Вестник МГТУ ГА
Том 26, № 06, 2023
Civil Aviation High TECHNOLOGIES
Vol. 26, No. 06, 2023

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 21.11.2023.

Печать цифровая

Формат 60×90/8

11,0 усл. печ. л.

Заказ № 1008/327

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