

Том 26, № 01, 2023

ISSN 2079-0619

e-ISSN 2542-0119

Научный Вестник МГТУ ГА



Civil Aviation High TECHNOLOGIES

Vol. 26, No. 01, 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, Хуань, 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;

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

К 100-ЛЕТИЮ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

Елисеев Б.П.

Становление отечественной гражданской авиации: юридические аспекты	8
--	---

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Браилко А.А.

Автоматизированная система сокращения потерь от испарения и обводнения авиатоплива в резервуарах топливозаправочного комплекса	22
--	----

Ермаков К.С.

Исследование современных подходов к обучению и разработке квалификационных требований к пилоту/оператору беспилотной авиационной системы в соответствии со стандартами ИКАО	34
---	----

Нечаев В.Н., Кулаков М.В., Гаспарян Г.А., Гончаренко Я.В., Баталов К.А.

Исследование технологии взаимодействия службы обслуживания воздушного движения и орнитологической службы	49
--	----

Obraztsov R.A., Sharov V.D.

On the use of fuzzy neural networks in the framework of a risk-based approach in control and supervisory activities in civil aviation	58
---	----

Samoylenko V.M., Paschenko G.T., Samoylenko E.V., Gnezdilov A.A.

Influence of impurities contained in fuel and air on sulfide corrosion of turbine blades of the gas turbine engine	72
--	----

Шейников А.А., Коваленко А.М., Санько А.А.

Точность определения координат беспилотного летательного аппарата с навигационным комплексом, включающим оптико-электронную систему позиционирования	81
--	----

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Петров Ю.В., Ратенко О.А., Харина В.К.

Методика расчета минимальной скорости ползучести лопаток турбин газотурбинных двигателей, основанная на учете деградации микроструктуры сплава	95
--	----

CONTENTS

ON THE CENTENNIAL OF DOMESTIC CIVIL AVIATION

Eliseev B.P.

The establishment of domestic civil aviation: legal aspects 8

TRANSPORTATION SYSTEMS

Brailko A.A.

The automated system for reducing losses from evaporation and water contamination in jet fuel in the tanks of the refueling complex. 22

Ermakov K.S.

Research of modern approaches to training and developing qualification requirements for a pilot/operator of unmanned aircraft system in accordance with the ICAO standards 34

Nechaev V.N., Kulakov M.V., Gasparyan G.A., Goncharenko Ya.V., Batalov K.A.

Investigation of the technology of the cooperation between the air traffic control and the ornithological service 49

Obraztsov R.A., Sharov V.D.

On the use of fuzzy neural networks in the framework of a risk-based approach in control and supervisory activities in civil aviation 58

Samoylenko V.M., Paschenko G.T., Samoylenko E.V., Gnezdilov A.A.

Influence of impurities contained in fuel and air on sulfide corrosion of turbine blades of the gas turbine engine 72

Sheinikov A.A., Kovalenko A.M., Sanko A.A.

The accuracy of determining the coordinates of an unmanned aerial vehicle with a navigation complex integrating an electro-optical positioning system 81

MECHANICAL ENGINEERING

Petrov Y.V., Ratenko O.A., Harina V.K.

The method of calculating the minimum creep rate of turbine blades of gas turbine engines based on the degradation of the alloy microstructure 95

К 100-ЛЕТИЮ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

УДК 001.92

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-8-21

**Становление отечественной гражданской авиации:
юридические аспекты**

Б.П. Елисеев¹

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

Аннотация: В 2023 году отмечается вековой юбилей отечественной гражданской авиации. На каждом этапе развития отрасли правовое обеспечение ее деятельности дополнялось и трансформировалось, что было обусловлено конкретными историческими реалиями. Публикаций, посвященных истокам и ранним периодам становления воздушного права как самостоятельной отрасли законодательства, немного. В статье в исторической ретроспективе показано развитие системы нормативного регулирования деятельности авиационной отрасли в первые десятилетия ее существования. Отмечается, что впервые нормативный акт, касающийся отечественного воздухоплавания, был издан в Российской империи в конце XVIII века императрицей Екатериной II, обеспокоенной ненадежностью аэростатов. Позднее издавались указы при императорах Александре I и Николае II, который особо покровительствовал развитию воздухоплавания. Начиная с первых лет советской власти были приняты юридически значимые для развития отечественной авиации решения. Среди них судьбоносным стало Постановление Совета Труда и Оборона СССР от 9 февраля 1923 года о создании Совета по гражданской авиации при Главном управлении Рабоче-Крестьянского Красного воздушного флота, поскольку этот день принято считать официальной датой рождения гражданской авиации страны как самостоятельной отрасли народного хозяйства. В юридических документах 1920–40-х годов затрагивались вопросы организации регулярных авиаперевозок; становления первой отечественной авиакомпания «Добролет»; координации работы диспетчерской службы; обеспечения условий и оплаты труда авиаработников и др. Нормативные акты предвоенных лет отличает логика, лаконизм и исчерпывающая ясность юридических формулировок. Уходит из оборота архаичный стиль, характерный для дореволюционных юридических документов. Источники права подчинены принципам иерархии и субординации. Их содержание направлено на повышение эффективности использования авиационной техники, эффективности использования воздушного пространства и безопасности полетов. В годы Великой Отечественной войны на основании «Положения о Главном управлении гражданского воздушного флота на военное время» от 23 июня 1941 года, утвержденного Совнаркомом СССР, введены в действие мобилизационные планы, личный состав гражданского воздушного флота был привлечен к выполнению боевых заданий, основные усилия сосредоточены на оказании всемерной помощи фронту.

Ключевые слова: воздухоплавание, авиация, гражданский воздушный флот, воздушное законодательство, государственное регулирование деятельности в области гражданской авиации.

Для цитирования: Елисеев Б.П. Становление отечественной гражданской авиации: юридические аспекты // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 1. С. 8–21. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-8-21

The establishment of domestic civil aviation: legal aspects

B.P. Eliseev¹

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

Abstract: 2023 is the centenary anniversary year for the domestic civil aviation. At every stage of the branch development, the legal support of its activity was supplemented and transformed which was caused with the specific historical realities. There are few publications dedicated to the early days of the air law as a separate area of legislation. The article presents the historical

retrospective of regulatory regime development throughout the first decades of the aviation industry existence. It is noted, that the first legal act concerning domestic aeronautical industry was published in the late XVIIIth century by Empress Catherine the Great, who was worried about the poor reliability of aerostatic balloons. Later, decrees were published during the reigns of Emperors Alexander I of Russia and Nicholas II of Russia, the latter being the patron of the development of aeronautics. The early Soviet days brought into life the legally relevant resolutions for the development of domestic aviation. Among them, the Resolution of the USSR Council of Labor and Defense dated from February 9th, 1923, about establishing the Council for Civil Aviation at the Main Directorate of the Workers and Peasants' Red Air Fleet became the crucial milestone. Hence, it is generally accepted that this day is the official date of birth of the country's civil aviation as an independent branch of the economy. The legal acts of the 20s-40s touched upon the issues of scheduled air transportation, the foundation of the first national airline Dobrolyot, the air traffic control service coordination, the labor and payment provisions for the aviation personnel. The regulatory acts of the pre-war period are logical and laconic, with clear and comprehensive legal language. The pre-revolutionary period archaic style is no longer in use. The legal sources conform to hierarchy and subordination principles. The document content is intended to increase the aircraft and equipment, airspace and flight safety efficiency. During the Great Patriotic War, the "Statute Concerning the Main Directorate of the Civil Air Fleet during the War Time" of the 23rd of June 1941, established by the Council of People's Commissars of the USSR activated the call-up plans, the manpower of the civil air fleet was involved in combat missions, with the main effort being concentrated on the all possible help to the battlefield.

Key words: aeronautics, aviation, civil air fleet, air law, state regulation of civil aviation activity.

For citation: Eliseev, B.P. (2023). The establishment of domestic civil aviation: legal aspects. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 1, pp. 8–21. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-8-21

Указом Президента Российской Федерации от 31 октября 2022 года № 783 «О праздновании 100-летия отечественной гражданской авиации» предусмотрено в 2023 году провести мероприятия, посвященные празднованию 100-летия отечественной гражданской авиации. Если об истории гражданской авиации периода СССР и современной России изданы научные монографии, воспоминания известных конструкторов и знаменитых пилотов, то о возникновении и развитии законодательства, регулирующего вопросы воздухоплавания и гражданской авиации, особенно в период ее зарождения и становления, написано мало.

Известно, что впервые в истории отечественного воздухоплавания нормативный акт был издан еще во времена Российской империи. Первый демонстрационный полет воздушного шара в России состоялся 5 декабря 1783 года в Санкт-Петербурге на набережной Невы в день именин императрицы Екатерины II. Через некоторое время Екатерина своим указом запретила полеты аэростатов в России «под страхом выплаты пени 20 рублей в Приказ общественного призрения и взыскания вреда, ущерба и убытка тем причиняемого». Причина была в пожарной опасности – императрица узнала о загоревшемся монгольфьере в Париже.

Следующее знаменательное событие произошло 30 июля 1803 года, когда на воздушном шаре с санкции императора Александра I поднялся первый русский – генерал С.Л. Львов. Пилотировал аэростат француз-аэронавт Андре-Жак Гарнерен. Воздухоплатели стартовали в Санкт-Петербурге, поднялись на высоту 3000 метров и перелетели Финский залив [1, 2].

Многие из нас хорошо помнят широко растиражированные в советское время иллюстрации летящего самолета А.Ф. Можайского и восторженно наблюдающих за ним зрителей. Примечательно, что документального подтверждения полета этого аппарата не сохранилось. Все эти картины – не более чем

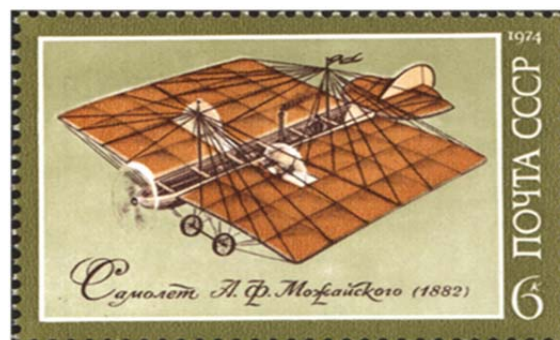


Рис. 1. Самолет Можайского на почтовой марке СССР, 1974 год

Fig. 1. Mozhaysky's airplane on a stamp, USSR, 1974

творческая фантазия художников. А вот само изобретение – факт юридически подтвержденный (рис.1¹)! Изобретатель обратился в Главное инженерное управление за ассигнованием 23 марта 1878 года. Комиссия, рассмотрев проект, рекомендовала оформить его официально. Это было сделано 4 июля 1880 года. 3 ноября 1881 года капитану 1-го ранга Александру Можайскому была выдана привилегия на «воздухоплавательный снаряд» Департаментом торговли и мануфактур. В 1883 году особая комиссия при Воздухоплавательном отделе Императорского русского технического общества постановила ходатайствовать перед правительством о субсидии Можайскому для окончания его работы. Летательный аппарат был оснащен двигателем английской фирмы Ahrbecker Son and Hamkens. Полноценных летных испытаний самолета не производилось.

Развитию воздухоплавания покровительствовал император Николай II. Известно, что он интересовался техническими новинками того времени, в том числе аэропланами. Некоторые шаги предпринимались и до царствования Николая II, но это было связано исключительно с военными нуждами.



Рис. 2. Гатчинская авиашкола, 1913 год
Fig. 2. Officer's aeronautical school in Gatchina, 1913

В 1910 году в России создаются две военные офицерские авиашколы в Гатчине и Севастополе (рис. 2 и 3), проводятся первые опыты по созданию вооруженного самолета. Но это история военной авиации, а мы говорим о гражданской. Известно, что приватная летная школа Первого русского товарищества воздухоплавания аэроклуб «Гамаюн», расположенная с 1910 года в части под Петербургом, занималась подготовкой частных пилотов. Там прошла подготовку первая в России пилотесса Лидия Зверева.

Перед Первой мировой войной появился четырехмоторный аэроплан «Илья Муромец» – первый бомбардировщик в мире. На этом самолете были поставлены мировые рекорды грузоподъемности, числа пассажиров, высоты и времени полета. В военный период предприятия России нарастили выпуск самолетов. Но собственных авиационных двигателей и многих запчастей, например подшипников, в России не производилось.

После революции 1917 года, в первые годы советской власти были приняты юридически значимые для развития отечественной авиации решения. В октябре 1917 года создано Бюро комиссаров авиации и воздухоплавания, которое приступило к формированию в Петрограде новых, красных авиаотрядов. 20 декабря 1917 года бюро было преобразовано во Всероссийскую коллегию по управлению воздушным флотом Республики (Увофлот). Реализуя политику правительства, коллегия отдала приказ, который требовал полностью «сохранить авиацию для трудового народа». В апреле 1918 года при Увофлоте создается отдел по применению авиации в народном хозяйстве. Этому отделу поручили организацию аэрофотосъемки земель и лесных массивов, а также создание воздушной почтово-пассажирской линии между Москвой и Харьковом.

В мае 1918 года Увофлот был преобразован в Главное управление Рабоче-Крестьянского Красного воздушного флота (Главвоздухфлот). В 1919-м создается Комиссия по тяжелой авиации, которая занимается налаживанием отечественной авиационной промышленности для производства своих са-

¹ В статье использованы иллюстрации и фотографии, взятые из общедоступных ресурсов интернета, не содержащих указаний на авторов этих материалов и каких-либо ограничений для их заимствования.

молетов и авиадвигателей. В частности, проектирования двухмоторного транспортного самолета, для смены устаревших «Муромцев». Продолжается подготовка кадров для авиации на базе бывшей школы авиации Московского общества воздухоплавания, переименованной в Московскую авиационную школу с филиалами в Егорьевске и Зарайске [3]. В 1918 году в подмосковный Егорьевск была передислоцирована Гатчинская авиационная школа. Сейчас там расположен филиал нашего МГТУ ГА – авиационный технический колледж им. В. Чкалова, которому в этом году исполняется 105 лет.

Известен еще один из первых правовых актов молодой советской власти – декрет «О конфискации аэропланного завода Анатра в Симферополе», принятый на заседании СНК 9 января 1918 года. Согласно этому акту «ввиду категорического отказа правления завода аэропланов А.А. Анатра в Симферополе подчиниться декрету Совета народных комиссаров о рабочем контроле, нежелание пойти на уступки рабочим, благодаря чему возникла забастовка рабочих Симферополя». Совет Народных Комиссаров постановил конфисковать аэропланый завод со всем его имуществом и объявить его собственностью Российской Республики [4].

Был приказ Московского окружного комитета по военному делу от 26 июля 1918 года о воспрещении полетов над районом расположения Московского склада огнестрельных припасов.

Большевики взялись за авиационное нормотворчество засучив рукава. Уже 17 января 1921 года Советом народных комиссаров был утвержден декрет о воздушных передвижениях. Этот декрет предоставлял большие возможности для ведомственного нормотворчества, в частности Главвоздухфлота. Во исполнение этого в 1922 году были изданы два приказа:

1) Приказ № 136, содержащий правила о выдаче пилотских свидетельств, о регистрации воздушных судов, о выдаче удостоверений, о пригодности воздушного судна к полетам, об опознавательных знаках, об огнях и сигналах и о порядке производства полетов,



Полк, Одинцов и М. Н. Ефимов со своими учениками.

Рис. 3. Севастопольская авиашкола, 1911 год
Fig. 3. Sevastopol Officers Aviation School (Katcha Military Aviation School), 1911

2) Приказ № 142, содержащий правила ведения книг воздушных судов и инструкций о порядке производства таможенного надзора воздушных судов.

В соответствии с приказом Реввоенсовета Республики 1 декабря 1922 года в Главвоздухфлоте была создана Инспекция гражданского воздушного флота, в функции которой входила разработка мероприятий по применению самолетов в народном хозяйстве. Инспекция занималась определением типов пассажирских самолетов и сроков их эксплуатации; порядком пользования аэродромами; отбором в гражданскую авиацию летного и технического состава, осуществлением надзора и общего технического контроля за воздушными линиями и другие функции [5].

Днем рождения нашей гражданской авиации считается 9 февраля 1923 года. Именно в этот день принято Постановление Совета Труда и Оборона (СТО) «О возложении технического надзора за воздушными линиями на Главное управление воздушного флота и об организации Совета по гражданской авиации». Технический надзор за всеми воздушными судами и аэродромами СССР предоставлен Главвоздухфлоту; тем же постанов-



Рис. 4. Аэроплан «Илья Муромец», 1914 год
Fig. 4. Ilya Muromets Airplane, 1914

лением учрежден Совет по гражданской авиации, руководящий гражданским применением воздушного флота. Постановление СТО об организации Совета законодательно закрепило гражданскую авиацию в качестве самостоятельной отрасли народного хозяйства страны, обеспечило единое государственное руководство ее деятельностью в организационном, плановом и административном отношениях² [6, 7]. Была установлена обязательная государственная регистрация и приписка к одному из аэродромов для воздушных судов и пилотов. Нормативный акт устанавливал условия производства полетов советских и иностранных воздушных судов в воздушном пространстве страны. В частности, требовалось, чтобы пилот прошел соответствующие испытания, а воздушное судно имело определенные судовые документы и опознавательные знаки. Определялись условия, при соблюдении которых иностранному воздушному судну могло быть выдано разрешение на полет в пределы страны. Была установлена ответственность владельцев воздушных судов за «все убытки, непосредственно причиненные воздушным судном при подъеме, полете или спуске, подлежат возмещению, за исключением случаев, когда

причинение убытков явилось следствием грубой вины самого потерпевшего»³ [8].

В советский период перевозки гражданским воздушным флотом начались в 1921 году. В соответствии с постановлением СТО с 1 мая 1921 года проводились полеты по трассе Москва – Харьков на самолетах «Илья Муромец» (рис. 4), оставшихся после Первой мировой и Гражданской войн. Выполнялись грузо-пассажирские авиаперевозки по маршрутам Харьков – Киев – Екатеринослав – Севастополь, Харьков – Херсон, Казань – Екатеринбург. За 5 месяцев было выполнено 43 рейса, перевезено 60 пассажиров и более 6 тонн груза. В октябре 1921 года эта линия была закрыта из-за изношенности самолетов и двигателей [9].

В июне 1922 года товарищество «Научно-экспериментальная станция "Авиакультура"» организовала перелеты по маршруту Москва – Нижний-Новгород – Москва в период Нижегородской ярмарки. На линии были задействованы три самолета – «Юнкерс F-13» с немецкими пилотами и техперсоналом. Это был первый отечественный опыт заключения

² Программа празднования «ДНЯ АВИАЦИИ». М.: Полиграф книга, 1934.

³ О воздушных передвижениях. Декрет СНК РСФСР от 17.01.1921 [Электронный ресурс] // Консультант-Плюс. URL: <https://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=ESU&n=9422#RypLsQT2BNEfTdQ31> (дата обращения: 14.12.2022).

договора «мокрого лизинга». Было совершено 57 рейсов, перевезено 209 пассажиров и свыше 2 тонн груза. Свой жизненный цикл «Авиакультура» закончила с закрытием ярмарки.

Первые регулярные перевозки в советской России были организованы с помощью немецкой авиакомпании. Это была организационно-правовая форма, близкая к классическому совместному предприятию. Общество «Дерлуфт» было создано в ноябре 1921 года на основе концессионного соглашения между Советской Россией с одной стороны и германским обществом воздушных сообщений «Аэро-Унион» с другой. Основной капитал общества составил 5 млн марок, половина внесена советской стороной, другая половина – немецкой. При этом все текущие расходы по эксплуатации авиалинии ложились на советскую сторону. Возглавляли общество два директора, по одному от каждой стороны; летчики и технический персонал состоял как из советских, так и из немецких граждан. С 1924 года и немецкая сторона стала оплачивать эксплуатационные расходы в размере 30 %. В 1926 году «Аэро-Унион» влился в только что организованную авиакомпанию «Люфтганза», ставшую таким образом представителем «Дерлуфт» от немецкого партнера⁴ [10].

Весной 1922 года авиапредприятие запустило первую регулярную авиалинию Москва – Смоленск – Ковно – Кенигсберг, по которой перевозились почта и пассажиры (рис. 5). В 1922 году было перевезено около 400 пассажиров, более 18 тонн почты и грузов. В августе 1925 года партнеры торжественно отметили налет первого миллиона километров. По регулярности и безопасности полетов, культуре обслуживания пассажиров линия считалась одной из лучших в Европе. Сеть маршрутов постоянно увеличивалась. Среди пассажиров были «звезды» того вре-

мени – поэты Сергей Есенин и Владимир Маяковский. В 1935 году рейс Берлин – Москва продолжался 10 часов. Билет стоил 160 дойчмарок или 74 рубля. Последним директором общества с советской стороны был М.О. Арнольдов, красный военлет, отличный управленец, прекрасно владевший немецким языком. В 1937 году он был репрессирован и расстрелян, а предприятие прекратило свою операционную деятельность.

Становление первой отечественной авиакомпании – это отдельная, одна из самых замечательных страниц в развитии национального воздушного права – можно так сказать, его корпоративного направления. Устав акционерного общества «Российское общество Добровольного воздушного флота» был одобрен Государственным концессионным комитетом 5 апреля 1923 года, а утвержден 30 апреля 1923 года. Документ подписали зампредседателя Совета народных комиссаров А. Цюрюпа и секретарь Л. Фотиева. Создавался «Добролет» для развития гражданского воздушного флота, организации воздушных линий для перевозки пассажиров, почты и грузов, производства аэрофотосъемок и иных отраслей применения воздушного флота, на основе отечественной авиапромышленности⁵ [6] (рис. 6).



Рис. 5. Рейс Берлин – Москва авиакомпании «Дерулуфт», 1927 год

Fig. 5. Flight Moscow – Berlin Deruluft Airline, 1927

⁴ «Дерулуфт» – русско-германское общество воздушных сообщений [Электронный ресурс] // Википедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B5%D1%80%D1%83%D0%BB%D1%8E%D1%84%D1%82> (дата обращения: 14.12.2022).

⁵ Устав акционерного общества «Российское общество добровольного воздушного флота "Добролет"». М.: Доброзем, 1923. 34 с.

Для реализации означенных уставных целей обществу «в границах существующих законов» предоставляется право приобретать в собственность строения, аэродромы, ангары, воздушные суда всех видов, механические заводы и другие предприятия, «вызываемые» его деятельностью, арендовать и устраивать склады горючих и других материалов, организовывать авиационные и воздухоплавательные курсы и школы, постоянные воздушные линии и разовые полеты, отчуждать, закладывать «свои имущества», заключать всякие имущественные договоры и сделки, выдавать всякие обязательства, и в их числе вексельные, «искать и отвечать» на суде и совершать всякие юридические действия, связанные с деятель-



Рис. 6. Плакат общества «Добролет», 1923 год
Fig. 6. The “Dobrolyot” society poster, 1923

ностью общества и из нее вытекающие, согласно Гражданскому кодексу. Таким добротным и немного «старорежимным» юридическим языком был написан устав «Добролета»⁶. Первыми учредителями общества становятся

Л.М. Краснощеков, М.И. Лацис, Ф.М. Сеньюшкин, В.А. Трифонов, А.Ф. Толоконцев, Б.Ф. Малкин, А.А. Знаменский, К.М. Шведчиков и И.С. Перетерский. Первые акционеры были очень интересными людьми. Старые большевики, хорошо образованные, имевшие большой опыт работы в органах власти и управления молодого советского государства. Некоторые из них успели поработать на дипломатической работе в Китае и Финляндии. Авиаторов среди них не было совсем! Примечательно, что часть из них были юристами. Краснощеков окончил школу права Чикагского университета, Малкин – юридический факультет психоневрологического института в Санкт-Петербурге, Знаменский учился на юридическом факультете Московского института. Перетерский окончил юридический факультет Санкт-Петербургского университета. Он один из немногих людей со счастливой судьбой, ставший профессором, доктором юридических наук. К слову, по его учебнику «Римское частное право» училось мое поколение юристов. Большинство создателей «Добролета» были репрессированы и расстреляны в 1937–1938 годах. Следует отметить, что одновременно с «Добролетом» создаются две компании – «Укрвоздухпуть» и «Закавиа» со штаб-квартирой в Харькове и Баку соответственно. В 1925 году «Укрвоздухпуть» поглощает «Закавиа». В 1930 году «Укрвоздухпуть» вливается в «Добролет». Это понятно, начинается процесс отхода от новой экономической политики, дело идет к централизованному управлению отраслью.

Для молодой советской авиации требовались отечественные самолеты. В 1922 году советское правительство подписало соглашение с фирмой «Юнкерс». Оно называлось «Концессия о производстве металлических самолетов и моторов». Работы развернулись на заводе «Руссо-Балт» в Филях. Ныне это Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева. Но уже в конце 1923 года в ЦАГИ был сконструирован для гражданской авиации первый советский пассажирский четырехместный самолет АК-1. Он развивал скорость до 146 км/ч и имел потолок 2200 м, эксплуатировался на

⁶ Добровольный воздушный флот, его военное и мирное значение. М.: Типография Воздушного флота, 1923. 24 с.

авиалинии Москва – Казань. В 1925 году коллектив, возглавляемый Н.Н. Поликарповым и А.А. Семеновым, сконструировал пятиместный пассажирский полутораплан ПМ-1. Самолеты ПМ-1 эксплуатировались на трассах Москва – Ленинград и Москва – Берлин. По скорости и грузоподъемности они не уступали зарубежным самолетам «Дорнье», «Юнкерс» и «Фоккер». В 1926 году завершились испытания первенца советского тяжелого самолетостроения АНТ-4 (ТБ-1).

Авиационная промышленность постоянно увеличивала выпуск самолетов. В 1923 году их было изготовлено около 150, а в 1924 году – более 200. Знаменательным в истории советской авиации был 1925 год, когда страна стала постепенно отказываться от приобретения иностранных самолетов (рис. 7).

19 октября 1923 года СТО утвердил ориентировочный трехлетний план развития воздушных линий в СССР на 1924–1926 годы, предусматривавший открытие воздушных линий общей протяженностью свыше 6000 км. Это был новый этап в развитии авиaperевозок в индустриальных районах, а также в Сибири, на Дальнем Востоке, в Закавказье. К концу 1924 года начали действовать авиалинии Москва – Нижний Новгород – Казань, Москва – Харьков, Харьков – Одесса, Харьков – Ростов-на-Дону, Евпатория – Севастополь, Тифлис – Баку, Тифлис – Манглы, Хива – Бухара, Бухара – Душанбе. Общая протяженность линий составила более 5000 км. К слову, 10 января 1923 года не случайно издается декрет «О нарушении ответственными лицами транспорта таможенных постановлений», устанавливающий ответственность летчиков за нарушение таможенных правил! За 1923–1928 годы общий налет составил почти 8 млн км, перевезено более 28 тысяч пассажиров, около 700 тонн грузов; протяженность воздушных линий увеличилась в 7 раз, налет в километрах – почти в 10, количество перевезенных пассажиров – в 15, грузов и почты – в 9 раз. В 1926 году линия Москва – Кенигсберг была продлена до Берлина. В 1927 году открылась авиатрасса Ленинград – Берлин. В 1926 году воздушная трасса связала СССР с Монголией [9].



Рис. 7. Плакат СССР, 1933 год
Fig. 7. The USSR poster, 1933

Динамичное развитие авиации нуждалось в организационном, управленческом и правовом обеспечении. 19 октября 1930 года выходит постановление Совета народных комиссаров (СНК) СССР «Об образовании всесоюзного объединения гражданской авиации». Именно СТО поручалось утвердить положение об указанном в ст. 1 объединении, и 29 октября 1930 года СНК СССР принимает очередное постановление «О Всесоюзном объединении гражданского воздушного флота». Во изменение постановления СНК СССР от 19 октября 1930 года об образовании Всесоюзного объединения гражданской авиации СНК СССР постановил: «В непосредственном ведении Совета труда и обороны организовать Всесоюзное объединение гражданского воздушного флота, действующее на началах хозяйственного расчета».

На Всесоюзное объединение гражданского воздушного флота были возложены следующие функции:

- эксплуатация воздушных путей сообщения;
- планирование и регулирование гражданского воздушного флота, находящегося в ведении объединения и других организаций;
- изыскание и организация новых воздушных линий;
- подготовка кадров для гражданского воздушного флота;
- опытное строительство воздушных судов, моторов и приборов к ним; дирижаблестроение.

Главная инспекция гражданского воздушного флота при Народном комиссариате по военным и морским делам с 10 ноября 1930 года упраздняется и функции ее, а также имущество и отпущенные на 1930 год неизрасходованные средства, передаются Всесоюзному объединению гражданского воздушного флота. И, что очень важно, капиталы и имущество акционерного общества «Добролет», согласно решению общего собрания его акционеров, передаются Всесоюзному объединению гражданского воздушного флота. Всесоюзное объединение было обязано до 1 января 1932 года выплатить частным лицам – акционерам «Добролет» стоимость этих акций. Акции, не предъявленные к оплате до 1 января 1932 года, аннулируются⁷ [6].

Постановлением СНК СССР от 25 февраля 1932 года было создано Главное управление гражданского воздушного флота при СНК СССР, 26 марта того же года получившее наименование «Аэрофлот».

Постановлением ЦИК и СНК Союза ССР от 27 апреля 1932 года был утвержден первый Воздушный кодекс Союза ССР. Это был один из первых в мире сводных законов по авиации. В нем нашли свое отражение основные положения советского воздушного права. Воздушный кодекс 1932 года определил правовое положение гражданских воздушных судов, экипажа и урегулировал другие вопросы, относящиеся к деятельности воздушного флота. В Кодексе было дано точное определение воздушного пространства СССР. Четко и определенно выражен принцип полного исключительного суверенитета Союза ССР над его воздушным пространством, установленный еще в первых декретах советской власти по вопросам о воздушном передвижении и использовании воздушного пространства.

Но бурное развитие гражданской авиации в нашей стране, а также необходимость пере-

смотра некоторых положений кодекса о регулировании полетов, условий труда работников ГВФ, воздушных перевозок, работы ведомственной авиации потребовали издания нового кодекса. Новый Воздушный кодекс СССР был утвержден постановлением ЦИК и СНК СССР 7 августа 1935 года⁸.

Была выстроена управленческая вертикаль в гражданской авиации, состоялось юридически оформленное «разделение труда». Управление и регулирование в части, касающейся административно-правовых вопросов, осталось за государственными органами, а хозяйственная, связанная с извлечением прибыли и основанная на гражданском и трудовом праве, легла на Аэрофлот. Именно на середину 1930-х годов приходится пик развития нормативной правовой системы, регулирующей все стороны «крылатой отрасли» народного хозяйства СССР. В сущности, появление новой отрасли права – воздушного. Особое внимание стало уделяться подготовке кадров, регулированию правоотношений в сфере труда и заработной платы, а параллельно – дисциплине персонала на таком сложном и опасном виде транспорта, становящемся все более распространенным и массовым. Например, приказом по Главному управлению ГВФ № 223 от 29 июля 1935 года вводится в действие новая система оплаты труда в летных частях территориальных управлений и учебных заведений. Сразу заключается соглашение с Центральным комитетом Союза авиаработников от 29 июля 1935 года о введении в жизнь новой системы оплаты труда в транспортных, спецприменений и тренировочных отрядах и летных частях учебных заведений⁹. Не скрою, мне, как члену Центрального комитета современного профсоюза авиаработников, было особенно интересно изучать этот архивный документ.

«Поскольку новые системы оплаты труда вводятся в жизнь с 1 сентября с. г., остав-

⁷ О Всесоюзном объединении гражданского воздушного флота. Постановление Совета народных комиссаров. Ст. 574. [Электронный ресурс] // Собрание законов и распоряжений Рабоче-Крестьянского Правительства СССР за 1930 год. С. 1048. URL: <https://istmat.org/node/50718> (дата обращения: 14.12.2022).

⁸ Воздушный кодекс СССР. М.: Редакционно-издательский отдел Аэрофлота, 1935. 58 с.

⁹ Оплата труда в авиаотрядах территориальных управлений и летных частях учебных заведений Аэрофлота. М.: Ред.-изд. отдел Управления делами Аэрофлота, 1935.

шийся промежуток времени должен быть использован хозорганами для подготовки и проведения необходимых мероприятий к переходу на новую систему, а профессиональными организациями – на массово-разъяснительную работу с таким расчетом, чтобы каждый работник "Аэрофлота" знал свою систему оплаты труда». Так был сформулирован один из пунктов отраслевого соглашения того времени^{10,11}.

В целях оказания практической помощи отрядам начальники территориальных управлений, председатели территориальных комитетов и уполномоченные ЦК союза должны командировать в каждый отряд ответственных работников, а также лично оказать непосредственную помощь основным отрядам своего территориального управления. Этот документ был подписан начальником Главного управления ГВФ И.Ф. Ткачевым и председателем ЦК Союза авиаработников СССР П.А. Дурницыным 29 июля 1935 года.

Отрасль развивалась. Сеть воздушных линий союзного значения непрерывно росла и составила в 1929 году – 15 426 км, в 1930 году – 26 310 км, в 1931 году – 27 716 км, в 1932 году – 31 934 км. К началу 1934 года общая протяженность воздушных линий СССР достигла 34 760 км (рис. 8).

В 1936 году поступил в отрасль двухмоторный самолет ПС-35. Машина, оснащенная автопилотом, радиополукомпасом и связной радиостанцией, развивала крейсерскую скорость до 350 км/ч при дальности полетов около 2000 км, брала на борт 12 пассажиров. С 1938 года на трассах «Аэрофлота» появились двухмоторные цельнометаллические самолеты ПС-40. (усовершенствованный вариант «Дугласа ДС-3», его производили в СССР по лицензии).

В 1930-е годы постоянно совершенствовалась служба движения (диспетчерская),



Рис. 8. Сеть воздушных линий СССР, 1934 год
Fig. 8. The network of airlines in the USSR, 1934

призванная обеспечивать безопасность и регулярность полетов. Организация ее работы определялась рядом нормативных документов, одним из которых было «Положение о диспетчерской службе в системе ГУГВФ и категорировании работников службы движения»¹².

С расширением сети внутренних и международных линий, ростом объема транспортных работ совершенствовалась деятельность службы организации перевозок. В ее работе большое внимание уделялось экономике воздушных перевозок, повышению культуры обслуживания пассажиров, своевременности доставки адресатам грузов и почты, их сохранности в пути и аэропортах. Права и обязанности работников службы организации перевозок регламентировались, в частности, «Положением о перевозке почты», введенным в действие 29 апреля 1937 года приказом по Главному управлению ГВФ, и «Положением о службе перевозок» от 4 июня 1937 года¹³ [9].

На основании ст. 33 Воздушного кодекса СССР с 1 марта 1935 года вводится в действие согласованный с ЦК Союза авиаработников обновленный Устав внутренней служ-

¹⁰ Оплата труда в авиаотрядах территориальных управлений и летных частях учебных заведений Аэрофлота. М.: Ред.-изд. отдел Управление делами Аэрофлота, 1935.

¹¹ Сборник важнейших постановлений и приказов, регулирующих вопросы труда в гражданском воздушном флоте. М.: Красный печатник, 1938.

¹² Сборник важнейших постановлений и приказов, регулирующих вопросы труда в гражданском воздушном флоте. М.: Красный печатник, 1938.

¹³ Устав внутренней службы гражданского воздушного флота Союза ССР. М.: Советское законодательство, 1935.

бы гражданского воздушного флота¹⁴. Начальникам всех учреждений, учебных заведений и предприятий гражданского воздушного флота поручено довести содержание устава до сведения всех работников и учащихся, на которых, согласно ст. 6, устав распространяется, и не позднее 1 апреля 1935 года произвести проверку его знания. Именно так. Не просто ввести Устав, но изучить и провести проверку знаний. В гражданской авиации тезис «незнание закона не освобождает от ответственности» не работает! Отсюда основной акцент в ведомственных актах делается, конечно, на подготовку кадров, их техническую грамотность. Это понятно, техника становится все сложнее. Как ректору Московского технического университета гражданской авиации, мне импонируют несколько очень интересных нормативных документов того времени.

Например, Приказ по ГВФ № 1010 от 31 января 1937 года «Основные задачи Аэрофлота в 1937 году в области технической и командирской учебы». По нынешним временам это система дополнительного профессионального образования и повышения квалификации. В другом приказе по ГВФ № 54 от 10 февраля 1936 года отмечается, что совмещение учебных занятий со служебной работой отрицательно отражается на учебе¹⁵. В связи с этим устанавливается запрет студентам учебных заведений «Аэрофлота» на совмещение учебных занятий со штатной служебной работой, за исключением заочников, обучающихся без отрыва от производства. Начальникам втузов рекомендовалось отчислять студентов, совмещающих без исключительной на то необходимости учебу со штатной служебной работой, с работой на предприятиях, в проектных конторах и других организациях. Вводится прямой запрет начальникам подразделений «Аэрофлота» принимать студентов на штатную служебную работу в порядке совмещения с учебными занятиями во

втузе без специального на то персонального разрешения начальника отдела кадров. Приказом по ГВФ № 235 от 2 ноября 1932 года четко определены льготы, права и обязанности учащихся заочных учебных заведений ГВФ. Руководители были обязаны не допускать загрузки учащихся заочников сверхурочной работой, не отрывать заочников от учебы частыми командировками; начальникам предприятий с многосменным режимом переводить из смены в смену учащихся-заочников соответственно с расписаниями очных занятий и консультаций на опорных пунктах и в отделениях, давая возможность принимать участие в обязательных для них занятиях. Все заочники освобождаются от дополнительной техучебы в имеющихся на предприятиях учебных звеньях, так как заочное обучение является основной формой подготовки, переподготовки и повышения квалификации. Предписывалось «проводить в жизнь систему премирования активных заочников» по представлениям учебных заведений, «для чего в сметах на 1933 г. выделить из фондов премирования специальные средства». В дни занятий и консультаций освобождать заочников от всяких собраний и заседаний (в соответствии с постановлением ЦКК ВКП(б) и НК РКК СССР от 23 сентября 1931 года относительно обучения без отрыва от производства).

Приказом по ГВФ № 889 от 5 декабря 1935 года была утверждена «Инструкция о вводе в строй и порядке работы молодых пилотов, инженеров и техников ГВФ в течение первого года службы». Это делалось для правильного и последовательного ввода в строй молодых специалистов и для обеспечения «надлежащей постановки дела подготовки и роста кадров», для безаварийности летной работы. Например, для ввода в производство молодых специалистов-инженеров они обязаны в течение первого года службы пройти стажировку путем последовательного назначения на следующие штатные должности: авиатехника 1-го класса последовательно на всех типах самолетов и моторов, находящихся в эксплуатации в данной эксплуатационной организации; старшего авиатехника звена отряда; исполняющего должность старшего техника или по-

¹⁴ Устав внутренней службы гражданского воздушного флота СОЮЗА ССР. М.: Советское законодательство, 1935.

¹⁵ Сборник важнейших постановлений и приказов, регулирующих вопросы труда в гражданском воздушном флоте. М.: Красный печатник, 1938.

мощника мастера реммастерских, с исполнением работ по дефектации поступающей в ремонт материальной части, а также по ремонту и сборке самолетов и моторов. В свою очередь молодые специалисты-авиатехники должны в течение первого года службы пройти стажировку путем последовательного назначения их на следующие штатные должности: старшего моториста на одномоторных, многомоторных самолетах; исполняющего должность техника реммастерских с непосредственным участием в работе по ремонту и сборке самолетов и моторов. Продолжительность стажировки на каждой из указанных должностей определяется для инженеров главным инженером управления (учебного заведения), для техников – инженером отряда в пределах от 2 до 4 месяцев в зависимости от освоения практики. Во время стажировки молодые специалисты не назначались на выполнение самостоятельных заданий с отрывом от своего подразделения, они должны были оставаться все время под наблюдением старшего руководителя подразделения^{16,17}. Отмечу, что такая система во многом сохранилась и в наше время.

Нормативные акты того времени отличает логика, лаконизм и исчерпывающая ясность юридических формулировок. Уходит из оборота архаичный стиль, характерный для дореволюционных юридических документов. Источники права подчинены принципам иерархии и субординации. Их содержание направлено на повышение эффективности использования авиационной техники, эффективности использования воздушного пространства и безопасности полетов.

Великая Отечественная война заставила «Аэрофлот» ввести в действие мобилизационные планы, сосредоточив основные усилия на оказании всемерной помощи фронту (рис. 9). Уже 23 июня 1941 года СНК СССР утвердил «Положение о Главном управлении гражданского воздушного флота на военное



Рис. 9. Санитарная модификация самолета У-2, «Аэрофлот», 1944 год

Fig. 9. The ambulance variant of Polikarpov Po-2, Aeroflot, 1944

время». В оперативном отношении гражданский воздушный флот подчинили Наркомату обороны, хотя многие функции, присущие отрасли, сохранились за Главным управлением ГВФ. Для участия во фронтовых операциях были сформированы шесть авиационных групп ГВФ особого назначения, авиагруппы были укомплектованы лучшими экипажами и техническим составом. Аэрофлотовцы внесли свой достойный вклад в победу советского народа над гитлеровской Германией. Имея всего лишь около 3 тыс. самолетов, из них 350 Ли-2 и С-47, ГВФ налетал 4,5 млн часов, из них 2,6 млн часов для обслуживания тыла страны. Им было перевезено более 2,3 млн военнопленных, партизан и других пассажиров, 280 тыс. тонн грузов, в том числе боеприпасов [7]. Акт о капитуляции фашистской Германии был доставлен в Москву именно самолетом «Аэрофлота».

Список литературы

1. Франк М. История воздухоплавания. Ч. 2. История авиации. СПб.: Воздухоплавание, 1911. 198 с.
2. Пиджаков А.Ю., Хороших В.А. Зарождение авиационных обществ и авиационного образования в дореволюционной России // Вестник Ленинградского государственного университета им. А.С. Пушкина. 2011. Т. 4, № 2. С. 60–70.

¹⁶ Сборник важнейших постановлений и приказов, регулирующих вопросы труда в гражданском воздушном флоте. М.: Красный печатник, 1938.

¹⁷ Положение о классификации специалистов гражданского воздушного флота. М.: Редакционно-издательский отдел Аэрофлота, 1940.

3. Карпова Л.И. История авиации и космонавтики. Часть I. История воздухоплавания и авиации. М.: МГТУ ГА, 2013. 108 с.

4. Соболев Д.А. Отечественное самолетостроение в первое послереволюционное десятилетие // Вопросы истории естествознания и техники. 2011. Т. 32, № 4. С. 116–146.

5. Штипельман А.А. Основы советского воздушного законодательства: учеб. пособие. М.: Редакционно-издательский отдел Аэрофлота, 1940. 48 с.

6. Ярошенко А.А. Нормативная база деятельности советской гражданской авиации и система управления отраслью (1921–1941 гг.) // Казанская наука. 2010. № 9. С. 128–135.

7. Бакланова И.С. Российская гражданская авиация в годы Великой Отечественной войны (1941–1945) // Наука. Техника. Человек: исторические, мировоззренческие и методологические проблемы: межвузовский сборник научных работ. Москва, 18 ноября 2021 г. М.: МГТУ ГА, 2021. Т. 11. С. 10–12.

8. Романов Н.Н. Правовые основы управления воздушным движением в СССР (1920-е годы) // Актуальные проблемы гуманитарных и социально-экономических наук. 2016. Т. 10, № S2. С. 80–82.

9. Лебедева М.Ю., Пиджаков А.Ю. Воздушный транспорт СССР в довоенные годы // Научный Вестник МГТУ ГА. 2011. № 170. С. 55–59.

10. Соболев Д.А. Хазанов Д.Б. Немецкий след в истории отечественной авиации. М.: Русское авиационное акционерное общество, 2000. 336 с.

References

1. Frank, M. (1911). [*The history of aeronautics. Part 2. History of aviation*]. St. Petersburg: Izdatelstvo “Vozdukhoplavaniye”, 198 p. (in Russian)

2. Pidzhakov, A.Yu. & Horoshih, V.A. (2011). *The origin of aviation companies and aviation education in pre-revolutionary Russia*. Pushkin Leningrad State University Journal, vol. 4, no. 2, pp. 60–70. (in Russian)

3. Karpova, L.I. (2013). [*The history of aviation and astronautics. Part I. History of aeronautics and aviation*]. Moscow: MGTU GA, 108 p. (in Russian)

4. Sobolev, D.A. (2011). *The Russian aircraft industry during the first revolutionary decade*. Studies in the History of Science and Technology, vol. 32, no. 4, pp. 116–146. (in Russian)

5. Shtipelman, A.A. (1940). [*The fundamentals of Soviet air legislation: textbook. Allowance*]. Moscow: Redaktsionno-izdatelskiy otдел Aeroflota, 48 p. (in Russian)

6. Jaroshenko, A.A. (2010). *Standard base of activity of the soviet civil aircraft and control system of branch (1921–1941)*. Kazan Science, no. 9, pp. 128–135. (in Russian)

7. Baklanova, I.S. (2021). [*Russian civil aviation during the Great Patriotic War (1941–1945)*]. Nauka. Tekhnika. Chelovek: istoricheskiye, mirovozzrencheskiye i metodologicheskiye problemy: mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh rabot. Moscow: MGTU GA, vol. 11, pp. 10–12. (in Russian)

8. Romanov, N.N. (2016). *Legal basis of air traffic control in the USSR (1920)*. Aktualnyye problemy gumanitarnykh i sotsialno-ekonomicheskikh nauk, vol. 10, no. S2, pp. 80–82. (in Russian)

9. Lebedeva, M.J. & Pidzakov, A.J. (2011). *Air transport of the USSR in pre-war years*. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, no. 170, pp. 55–59. (in Russian)

10. Sobolev, D.A. & Khazanov, D.B. (2000). [*German trace in the history of domestic aviation*]. Moscow: Russkoye aviatsionnoye aktsionernoye obshchestvo, 336 p. (in Russian)

Сведения об авторе

Елисеев Борис Петрович, доктор юридических наук, профессор, ректор МГТУ ГА, b.eliseev@mstuca.aero.

Information about the author

Boris P. Eliseev, Doctor of Law, Professor, Rector, Moscow State Technical University of Civil Aviation, b.eliseev@mstuca.aero.

Поступила в редакцию 21.12.2022
Принята в печать 26.01.2023

Received 21.12.2022
Accepted for publication 26.01.2023

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

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

2.9.4. – Управление процессами перевозок;

2.9.6 – Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники;

2.9.8 – Интеллектуальные транспортные системы

УДК 621.396.96

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-22-33

Автоматизированная система сокращения потерь от испарения и обводнения авиатоплива в резервуарах топливозаправочного комплекса

А.А. Браилко¹

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

Аннотация: В процессе производственной деятельности топливозаправочного комплекса (ТЗК) аэропорта в результате движения авиакеросина, связанного с опорожнением и заполнением резервуаров при приеме и выдаче авиатоплива на заправку воздушных судов (ВС), неизбежно происходят два негативных явления – обводнение авиакеросина при взаимодействии с воздухом, его испарение и унос в атмосферу. Это влечет за собой экономические потери, повышенный уровень пожаровзрывоопасности и экологический ущерб. Размеры ущерба от потерь естественной убыли авиатоплива в результате неизбежной эмиссии паровоздушной смеси (ПВС) из оборудования резервуарного парка ТЗК достигают 10...14 % от объема перевалки авиакеросина. В свою очередь такой объем испаряемого керосина приводит к серьезной экологической проблеме – загрязнению атмосферы парами авиатоплива, приводящей к затратам на компенсацию и налогообложение природопользования, возможности нанесения вреда здоровью штатного персонала ТЗК, а также к тому, что ТЗК становится пожароопасным объектом, что влечет за собой затраты на пожароохранные мероприятия. В статье проведена оценка количественных и качественных потерь от испарения и обводнения в условиях хранения, приема и выдачи авиатоплива из резервуаров ТЗК аэропорта. На основании анализа механизма ухудшения качества авиатоплива от обводнения и загрязнения механическими примесями, а также потерь легких фракций авиатоплива (ЛУВ), вызванного явлениями больших и малых дыханий резервуарного оборудования, неизбежно сопровождающих процессы хранения, выдачи и приема авиатоплива, установлены причины и механизм образования потерь авиатоплива от малых и больших дыханий, потери от насыщения газового пространства и предложены рекомендации по снижению этих потерь. В статье проведен анализ известных способов снижения (предотвращения) выбросов ПВС и рассматривается задача создания надежных и автоматизированных методов и технологий уменьшения потерь авиакеросина, в частности уменьшения уровня содержания воды в авиакеросине. Актуальной становится автоматизация процессов уменьшения потерь авиакеросина. Приведен расчет потерь авиатоплива от испарений при хранении, приеме и выдаче авиатоплива в ТЗК аэропорта в период наиболее интенсивных полетов, а значит, наибольшего движения авиакеросина, дающие представление о масштабе экономических потерь и экологического ущерба. Рассмотрены существующие системы уменьшения потерь нефтепродуктов, применяемых в настоящее время. В статье представлено техническое решение для сокращения потерь авиакеросина от испарения в резервуарах путем разработки автоматизированной системы, которая обеспечивает снижение уровня обводненности авиатоплива в резервуаре и сокращение потерь легких фракций авиатоплива при хранении, приеме и выдаче авиатоплива, за счет осушения атмосферного воздуха, поступающего в надтопливное пространство резервуара, а также конденсации и отделению ПВС при малых и больших дыханиях резервуара. Предложенная к использованию система сокращения потерь авиакеросина от испарения позволит существенно повысить эффективность улавливания ПВС авиатоплива при хранении в резервуарном парке ТЗК, улучшить экологическую обстановку топливозаправочной деятельности ТЗК, минимизировать экономические потери ТЗК от естественной убыли, а также понизить уровень пожароопасности ТЗК аэропорта. Система предназначена для дооборудования резервуаров приема, хранения и выдачи авиатоплива, резервуарных парков, складов ГСМ ТЗК.

Ключевые слова: топливозаправочный комплекс ТЗК, дыхательная система резервуара, паровоздушная смесь, обводненность авиатоплива, потери авиатоплива, испарение авиатоплива.

Для цитирования: Браилко А.А. Автоматизированная система сокращения потерь от испарения и обводнения авиатоплива в резервуарах топливозаправочного комплекса // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 1. С. 22–33. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-22-33

The automated system for reducing losses from evaporation and water contamination in jet fuel in the tanks of the refueling complex

A.A. Brailko¹

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

Abstract: In the process of the production activity of the airport refueling complex (RC), because of the movement of jet fuel associated with emptying and filling fuel tanks when receiving and supplying jet fuel for aircraft (AC) refueling, two negative phenomena are bound to occur – water contamination in jet fuel with when interacting with air, its evaporation and entrainment into the atmosphere. This entails economic losses, an increased level of fire and explosion hazard and environmental damage. The amount of damage caused by the natural loss of jet fuel, because of the inevitable emission of vapor-air mixture (VAM) from the RC tank farm, reaches 10...14% of the volume of jet fuel transshipment. In turn, such volume of evaporated kerosene leads to a serious environmental problem – pollution of the atmosphere by aviation fuel vapors, escalating the costs for compensation and taxation of environmental management, potential harming the health of the RC full-time staff. The RC becomes a fire-hazardous object, which incurs expenses for fire protection measures. The article evaluates the quantitative and qualitative losses from evaporation and water contamination in fuel in the conditions of storage, reception, and delivery of aviation fuel from the airport RC tanks. Based on the analysis of the mechanism of deterioration of the aviation fuel quality from water contamination and mechanical impurities, as well as losses of light fractions of aviation fuel caused by the phenomena of strong and inconsiderable breathing of tanks of the tank farm facilities, invariably accompanying the processes of storage, delivery, and reception of aviation fuel. The causes and mechanism of formation of aviation fuel losses from strong and inconsiderable breathing of tanks as well as from saturation of the gas space are established. The recommendations for reducing these losses are proposed. The article analyzes the known methods of reducing (preventing) VAM emissions and considers the task of developing reliable and automated methods and technologies for reducing jet fuel losses, particularly, reducing the level of water content in jet fuel. Automation of the processes to minimize jet fuel losses is becoming relevant. The calculation of jet fuel losses from evaporation during storage, reception, and delivery of jet fuel to the airport RC within the heavy air traffic period concerned with the greatest movement of jet fuel, giving an idea of the scale of economic losses and environmental damage, is presented. The currently existing systems for reducing losses of petroleum products are considered. The article presents a technical solution to reduce the loss of jet fuel from evaporation in tanks by developing an automated system that minimizes the level of water content in jet fuel in the tank and reduces the loss of light fractions of jet fuel during storage, reception, and delivery due to the dehumidification of atmospheric air entering the above-fuel space of the tank, as well as VAM condensation and separation under inconsiderable and strong breathing of tanks. The proposed system for reducing losses of aviation kerosene from evaporation will significantly increase the efficiency of capturing VAM of aviation fuel when stored in the RC fuel tank battery, improve the environmental situation of the RC activity, minimize the economic RC losses from natural loss, as well as mitigate the risk for fire hazard of the airport RC. The system is designed for retrofitting tanks for receiving, storing, and delivering jet fuel, fuel tank batteries, fuel, and lubricants warehouses.

Key words: refueling complex, tank breathing system, vapor-air mixture, water contamination in jet fuel, jet fuel losses, aviation fuel evaporation.

For citation: Brailko, A.A. (2023). The automated system for reducing losses from evaporation and water contamination in jet fuel in the tanks of the refueling complex. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 1, pp. 22–33. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-22-33

Введение

Производственная деятельность ТЗК является непрерывной и представляет собой циклические процессы «конвейерного» характера: прием, хранение, подготовка, выдача и заправка ВС авиационным топливом. Технологические процессы деятельности ТЗК по авиатопливообеспечению ВС включают в себя многочисленные перекачки авиатоплива из резервуара в резервуар, наполнение и опустошение резервуаров, а также хранение в

резервуарах, а это неизбежно сопровождается большими и малыми дыханиями резервуаров, насыщением газового пространства и выбросом ПВС, что приводит в свою очередь к испарению, обводнению и загрязнению авиакеросина. В процессе приема авиатоплива в резервуар происходит вытеснение объема надтопливного пространства и унос ПВС в атмосферу окружающей среды. В процессе большого и малого дыхания при выдаче авиатоплива из резервуара или понижении температуры при хранении понижается давление в резервуаре, происходит вдох и поступление

атмосферного воздуха в надтопливное пространство. Влага из атмосферного воздуха конденсируется на стенках резервуара, что приводит к повышению уровня содержания воды в авиатопливе.

Масштабы и размеры экономического ущерба от потерь при испарении авиатоплива красноречиво подтверждаются статистикой 75 : 25 % (рис. 1), расчетно-экспериментальными исследованиями (рис. 2), а также нормативными документами^{1,2}, предписывающими нормы естественной убыли, их учет при хранении, приеме и выдаче авиатоплива на складах ГСМ ТЗК и дающими количественное представление о значительном масштабе потерь топливозаправочного бизнеса и ущерба экологии [1–3]. Основная доля потерь от испарения на протяжении всего пути дви-



Рис. 1. Статистика потерь авиатоплива в ТЗК в результате малых и больших дыханий резервуаров
Fig. 1. Statistics of jet fuel losses in the refueling complex due to “insignificant and strong breathing of tanks”

¹ Приказ Минэнерго РФ № 527, Минтранса РФ № 236 от 1 ноября 2010 г. «Об утверждении норм естественной убыли нефти и нефтепродуктов при перевозке железнодорожным, автомобильным, водным видами транспорта и в смешанном железнодорожно-водном сообщении» [Электронный ресурс] // ГАРАНТ. 2010. 8 с. URL: <https://base.garant.ru/12181410/> (дата обращения: 12.04.2022).

² РД 153-39-019-97. Методические указания по определению технологических потерь нефти на предприятиях нефтяных компаний Российской Федерации (утв. Минтопэнерго РФ 16.06.1997) [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. 1997. 61 с. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_99863/ (дата обращения: 12.04.2022).

жения авиатоплива от нефтезавода до заправки ВС принадлежит технологическим процессам работы резервуарного оборудования [4]³.

Выбросы ПВС, неизбежно сопровождающие транспортировку, прием, хранение и выдачу авиатоплива на заправку ВС, приводят к существенным потерям авиатоплива, загрязнению атмосферы и представляют угрозу безопасности и здоровью обслуживающего персонала ТЗК. Борьба с потерями авиатоплива от испарения является приоритетной экологической деятельностью. Ущерб от испарения выражается не только в стоимости невозвратных потерь авиатоплива, но и в негативных экологических последствиях загрязнения окружающей среды. Таким образом, разработка методов и способов, создание устройств и технологий по минимизации потерь от испарения и обводнения авиатоплива на объектах топливозаправочного комплекса целесообразны и имеют важное значение для экономики бизнеса авиатопливообеспечения, а также для охраны экологии.

Другой вид потерь, обусловленный эмиссией легких фракций авиакеросина в условиях транспортировки авиатоплива и топливозаправочной деятельности, в связи с ужесточением требований нормативно-технической документации (НТД) в части предельно допустимых концентраций (ПДК) загрязняющих и пожароопасных веществ, инициирует необходимость разработки технологий и создания оборудования для предотвращения или сокращения объемов выбросов производства топливозаправочной деятельности ТЗК.

Рассмотрим механизм формирования потерь от испарения и обводнения авиакеросина в технологии работы резервуарного оборудования ТЗК.

1. В процессе приема авиакеросина при наполнении резервуаров происходит большой выдох (большие дыхания) и вытеснение

³ Потери от испарения нефти и нефтепродуктов из наземных резервуаров [Электронный ресурс]: курсовая работа. Уфа: УНИ, 1987. 73 с. URL: <https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=655290> (дата обращения: 10.05.2022).

ПВС, содержащей значительное количество авиакеросина.

2. В процессе хранения и оттаивания авиакеросина при неподвижном хранении происходит малый выдох, который зависит от суточного повышения температуры (малые дыхания), и вытеснение ПВС, содержащей незначительное количество авиакеросина.

3. В процессе выдачи авиатоплива при опорожнении резервуара в результате большого вдоха в надтопливное пространство резервуара поступает атмосферный воздух, влага которого в дальнейшем конденсируется на стенках резервуара, что приводит к обводнению авиатоплива, повышая уровень содержания в нем воды.

4. В процессе хранения и оттаивания авиакеросина при неподвижном хранении происходит малый вдох при суточном понижении температуры (малые дыхания) и заполнении объема резервуара атмосферным воздухом. Влага в дальнейшем конденсируется, и обводняет авиакеросин, ухудшая его параметры качества.

5. В результате больших и малых вдохов в освободившемся от авиакеросина объеме пространства происходит эмиссия паров и последующее насыщение газового пространства резервуара легких фракций углеводородов (ЛУВ).

Качественные и количественные потери авиакеросина, формируемые данным механизмом, зависят от климатических условий эксплуатации резервуара и частоты проводимых циклов приема-выдачи из резервуара авиакеросина.

Концентрация ПВС зависит от давления, и ее можно рассчитать по формуле

$$C_{н.п.} \% = \frac{P_H}{P_H + A} \cdot 100, \quad (1)$$

где $C_{н.п.}$ – концентрация ПВС;

P_H – давление насыщенных паров легких углеводородных фракций в ПВС, кПа;

A – величина атмосферного давления, которую принимают равной 100 кПа.

Величина давления насыщенных паров легких углеводородных фракций зависит от

температуры, которую можно рассчитать согласно уравнению Антуана^{4,5}:

$$\lg P_H = A - \frac{B}{C+t}, \quad (2)$$

где t – температура, °С;

P_H – величина давления насыщенных паров легких углеводородных фракций, мм рт. ст.;

A, B, C – справочные коэффициенты; постоянные, полученные экспериментальным путем.

Результаты проведенных расчетов выбросов ПВС и их сравнение с требованиями НТД представлены на рис. 2, о проведенных работах по «Разработке нормативов технологических потерь ГСМ для ЗАО «Топливо-заправочный сервис», выполненных ЗАО «КИПЭНЕРГО» «Контрольно-измерительные приборы в энергетике» в 2018 году.

В работе проведена оценка потерь авиакеросина в условиях реального ТЗК. Результаты опытно-практической оценки количественных значений потерь авиакеросина из расходных резервуаров ТЗК, проведенных в 2018 году, составили ≈ 100 тонн (рис. 3). Ежемесячно в атмосферу «улетучивается» от 1 до 12 тонн авиакеросина в зависимости от климатических условий эксплуатации резервуара и частоты проводимых циклов приема-выдачи из резервуара [5].

⁴ РД 153-39.2-048-00. Методика определения эффективности применения улавливания легких фракций нефти из резервуаров [Электронный ресурс] // Система нормативных документов «МЕГАНОРМ». 2000. 47 с. URL: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://meganorm.ru/Data2/1/4293816/4293816396.pdf> (дата обращения: 12.04.2022).

⁵ РД 153-39-018-97. Инструкция по нормированию технологических потерь нефти на нефтегазодобывающих предприятиях нефтяных компаний Российской Федерации (вместе с «Техническими требованиями к проведению исследований по определению технологических потерь нефти на нефтегазодобывающих предприятиях и представлению их результатов») (утв. Минтопэнерго РФ 16.06.1997) [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс. 1997. 61 с. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_99862/ (дата обращения: 12.04.2022).

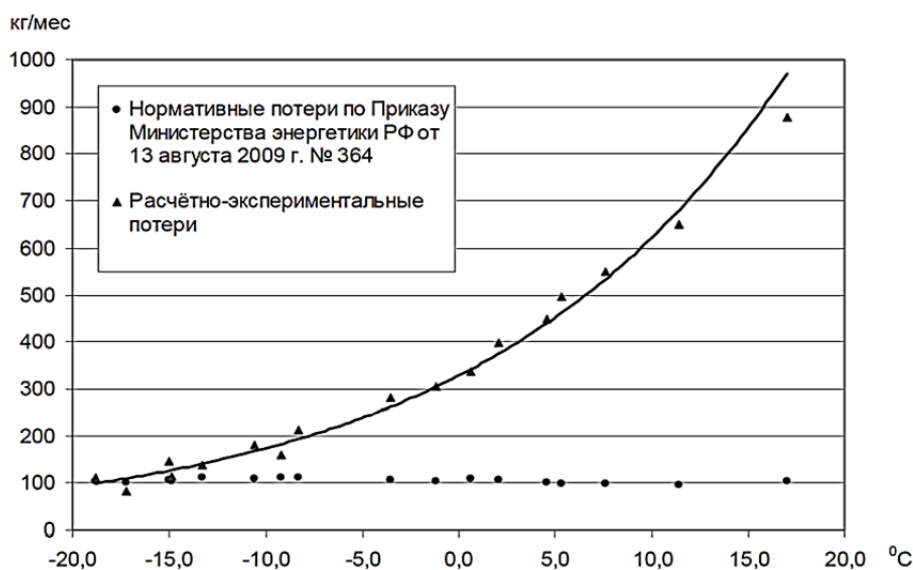


Рис. 2. Выбросы паровоздушной смеси (ПВС) при хранении в резервуаре
Fig. 2. Emissions of vapor-air mixture (VAM) during storage in a tank

Потери авиакеросина также связаны с его обводнением. Присутствие воды даже в весьма малых количествах способно резко повлиять на свойства авиакеросина, что может привести к нежелательным последствиям при эксплуатации авиационной техники [5–7].

Возможность попадания воды в авиакеросин при транспортировании, хранении и заправке ВС очень велика, а удаление ее из

авиакеросина связано со значительными трудностями. Процесс затратный и дорогостоящий и связан с повышенным расходом фильтроэлементов, увеличением длительности отстаивания, что в итоге приводит к существенным потерям и неэффективным затратам бизнеса ТЗК, а также является угрозой безопасности полетов.

Механизм насыщения авиатоплива водой

ПОТЕРИ ОТ ИСПАРЕНИЯ ТС-1 В 2018 г.

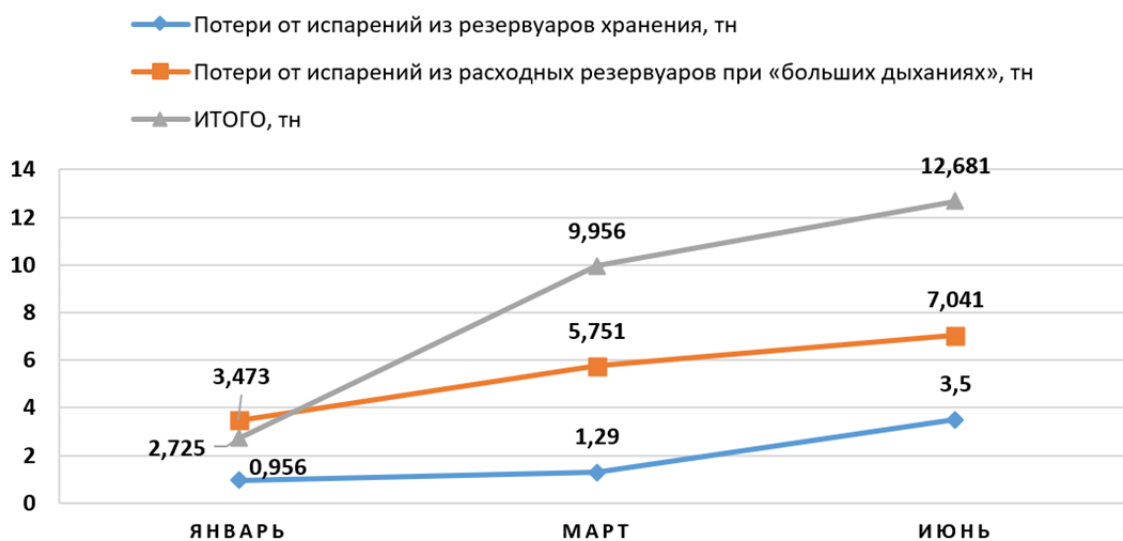


Рис. 3. Результаты опытно-практической оценки количественных значений потерь авиатоплива из расходных резервуаров ТЗК в 2018 году

Fig. 3. Results of the experimental and practical assessment of quantitative values of jet fuel losses from RC feed tanks in 2018

из влаги атмосферного воздуха, присутствующего в надтопливном пространстве резервуаров, упоминается в технической литературе [5, 8]. При высоком уровне влажности воздуха, в пределах 70...100 %, как правило это весенне-летний период, и в особенности при дождливой погоде, в резервуар емкостью 5000 м³ при его большом входе в процессе выдачи авиатоплива может поступить до 50 литров воды, это составляет 1 литр воды на 100 м³ воздуха, влага из воздуха конденсируется на стенках резервуара и приводит к обводнению авиатоплива [5, 9].

Пути попадания воды в авиакеросин характерны для случаев простоя, опорожнения и заполнения резервуаров хранения и транспортировки. Превышение уровня обводненности авиакеросина в оборудовании ТЗК приводит к повышению уровня содержания механических примесей, вовлеченных в поток вместе с примесями воды, а также вероятности развития бактериального заражения авиакеросина в оборудовании ОАТО и топливных системах ВС, поскольку бактерии развиваются на границе раздела вода – керосин [6, 8].

Таким образом, актуальность разработки систем снижения потерь в процессе деятельности ТЗК очевидна, а в связи с современным развитием новых информационных технологий становится целесообразным достижение целей создания этих систем путем автоматизации технологических процессов ресурсосберегающих технологий. Рассмотрим уже существующие устройства и системы сокращения потерь нефтепродуктов.

Обзор аналогов

В настоящее время существует большое многообразие технологических решений по снижению выбросов ПВС в атмосферу при транспортировке и хранении авиатоплива, наиболее эффективным является герметизация резервуарного оборудования, газоуравнительных систем, а также применение систем рекуперации авиатоплива из ПВС.

Актуальным является применение средств рекуперации паров при наливе/сливе нефте-

продуктов в морские суда, вагоны-цистерны и автоцистерны. Также эффективно применение системы рекуперации на АЗС, НПЗ и ГСМ. Установка систем рекуперации обеспечивает предотвращение выбросов вредных паров нефтепродуктов в атмосферу и позволяет получать дополнительную прибыль на возврате нефтепродукта обратно в технологический цикл.

Адсорбционно-абсорбционные установки рекуперации паров на основе сухой вакуумной технологии признаны большинством мировых нефтяных компаний как лучшие.

Система рекуперации легких углеводородов полностью изолирована от окружающей среды и применяется при транспортировке бензинов, газоконденсатов нефти и других нефтепродуктов с давлением насыщенных паров выше 500 мм рт. ст., при этом обеспечивает снижение выбросов легких углеводородов с 1500 до 30 г/м³ в точке выброса.

Система рекуперации ПВС герметично изолирует надтопливное пространство резервуара от атмосферы и используется при транспортировке бензина, газоконденсата и прочих нефтепродуктов с давлением насыщенных паров, превышающим 500 мм рт. ст., уменьшая уровень выбросов ПВС в 50 раз: с 1500 до 30 г/м³ в точке выброса.

Существует метод сокращения потерь нефтепродуктов при хранении [10], который снабжен камерой, расположенной внутри резервуара и представляющей собой гофрированный эластичный бак, внутренняя полость которого сообщается с атмосферой и изменяет свой объем по мере наполнения или опустошения резервуара. Трубопроводы для наполнения и опорожнения резервуара, размещены друг над другом, соединены между собой трубопроводом, водяным насосом, сборником газа и сборником водно-солевого раствора HCl.

Рассматривается конструкция усовершенствования дыхательного оборудования резервуаров хранения легкоиспаряющихся нефтепродуктов [11], представляющая собой сообщающиеся между собой резервуар, конденсор со сборником ЛУВ, адсорбер с сорбирующими гранулами, размещенный в кон-

денсоре, теплообменник состоящий из батареи термоэлементов, расположенный между конденсором и адсорбером и ориентированный холодными спаями к конденсору, а горячими – к адсорберу, конденсор и адсорбер соединены патрубком между собой и атмосферой. Сборник ЛУВ изготовлен из пористого газопроницаемого материала, имеющего ячеистую структуру. Конструкция состоит из двух пластин, размещенных с горячей стороны термоэлементов и соответственно холодной стороны термоэлементов. Пластины изготовлены из пористого газопроницаемого материала, имеющего ячеистую структуру, и размещены на сборнике ЛУВ.

Разработана установка улавливания ЛУВ из средств транспортирования топлива и резервуаров хранения с использованием хладагентов [12], сущность которой, заключается в установке на крышу резервуара или горловину автоцистерны устройства-заборника ПВС, соединенного паропроводом с дополнительным резервуаром. В процессе налива резервуара уровень топлива увеличивается, а объем надтопливного пространства уменьшается. В резервуаре увеличивается давление ПВС. ПВС откачивается насосом через паропровод в дополнительный резервуар. ПВС, проходя через теплообменник, конденсируется, а оставшиеся несконденсированные пары поглощаются низкооктановым топливом.

Запатентована система абсорбции ЛУВ со вспомогательным паросборником и охладителем, предназначенная для дооборудования дыхательных систем резервуаров [13]. В данной конструкции дыхательный клапан сообщается со вспомогательным паросборником, имеющим приемник ПВС и насос для откачки паров в паросборник, снабженный регулирующими клапанами. ПВС насосом перекачивается во вспомогательный паросборник, при достижении давления порога срабатывания клапана ПВС через обратный регулируемый клапан поступает в охладитель, а далее возвращается в резервуар, где окончательно абсорбируются.

Перспективными являются разработки технологий подготовки и осушения воздуха, поступающего в дыхательное оборудование резервуаров хранения авиатоплива, топливоза-

правщиков, топливных систем ВС [14, 15]. Наиболее эффективными являются мембранные технологии разделения загрязненных сред, в связи с этим исследования в данном направлении представляют наибольший интерес.

Наиболее эффективным методом исключения или минимизации потерь от испарения и обводнения авиатоплива является обеспечение герметичной изоляции надтопливного пространства резервуара от атмосферного воздуха. Этот метод имеет высокий экономический эффект для ТЗК с высоким уровнем расхода и оборачиваемости резервуаров, может быть реализован применением установок рекуперации и (или) газоуравнительных систем для хранения и транспортировки авиатоплива. Однако рассмотренное оборудование сложное – требуется внесение изменений в конструкцию штатного оборудования и оборудования дыхательной системы резервуара, а эффективность работы зависит от синхронности приема и отпуска авиатоплива из резервуаров, что не всегда возможно осуществить.

Вместе с тем представляет интерес решение снижения потерь от испарения и обводнения авиатоплива методами подготовки атмосферного воздуха перед поступлением его в резервуар: осушением путем нагрева или охлаждения, а также конденсацией авиакеросина из ПВС, выходящей из резервуара при его наполнении авиатопливом.

Система сокращения потерь от испарения и обводнения авиатоплива в резервуарах ТЗК

Предлагаемое решение для снижения потерь от испарения и обводнения авиатоплива в резервуаре хранения заключается в подготовке атмосферного воздуха путем осушения, подачи осушенного воздуха в надтопливное пространство резервуара через дыхательный клапан и отводе ПВС из этого же дыхательного клапана через предложенное устройство подвода-отвода воздуха, которое выполнено в виде кольцевого воздухопровода и сообщается с окружающей средой.

Принцип действия системы для снижения потерь от испарения и обводнения авиатоплива в резервуаре хранения заключается в подаче подготовленного осушенного атмосферного воздуха через дыхательный клапан в надтопливное пространство резервуара, а также отведении ПВС из дыхательного клапана через кольцевой воздуховод, конденсор и далее в атмосферу окружающей среды.

Принципиальная схема системы (рис. 4) представляет собой модуль подготовки воздуха, блок воздухоочистителя и холодильника-конденсора, поддерживающего низкую влажность воздуха. В качестве холодильника-конденсора может использоваться, промышленный кондиционер, расположенный за пределами резервуарного парка. Уровень энергетических затрат, требуемых для охлаждения паровоздушной смеси, зависит от объема надтопливного пространства, температуры ПВС, оборачиваемости резервуара и КПД холодильника-конденсора.

Кольцевые воздуховоды системы устанавливаются на дыхательные клапаны 6 резервуара 1 (рис. 4), оборудование воздухоподготовки и отведения ПВС располагается за пределами резервуарного парка. Кольцевые воздуховоды системы дыхательных клапанов 6 сообщаются трубопроводами с оборудованием воздухоподготовки и отведения ПВС. Дыхательный клапан 6 может циклически функционировать в режимах подачи в резервуар воздуха, а также и в режиме выпуска ПВС из резервуара при соответствующем изменении давления внутри резервуара, создаваемого наполнением или опорожнением резервуара 1, синхронно повторяя процессы вдоха-выдоха.

Режим выдачи авиатоплива. После воздухозаборника 13 атмосферный воздух, проходя воздухоочиститель-пылесборник 14, нагнетается насосом 18 в холодильник-конденсор, где происходит отделение влаги, т. е. осушение атмосферного воздуха, затем подготовленный воздух поступает в кольцевой воздуховод 8, а далее через «атмосферный зазор» засасывается дыхательным клапаном в надтопливное пространство резервуара, при этом конденсат после осушения из холодиль-

ника-конденсора 15 отводится в цистерну 19. Работа воздушного нагнетающего компрессора 18 синхронизирована с работой насоса выдачи авиатоплива 3 из резервуара и управляется программируемым логическим контроллером PLC 4.

При выдаче авиатоплива из резервуара (при откачке авиатоплива) очищенный и осушенный воздух из системы воздухоподготовки всасывается в резервуар 1. Воздушный компрессор нагнетает очищенный и осушенный воздух с избытком 10 % на компенсацию потерь. Расход воздуха определяется показаниями расходомеров топливоперекачивающих насосов подачи 2 выдачи авиатоплива, при этом алгоритм контроллера на основании данных расхода насосов подачи и выдачи 3 учитывает сообщаемые объемы воздух – ПВС – авиатопливо. Расходомеры дают точные показания количества авиатоплива, соответствующего требуемому расходу воздуха (+10 %), что обеспечивается работающей системой сообщаемых объемов авиатопливо – воздух.

Режим приема авиатоплива. При включении насоса 2 подачи авиатоплива, в резервуар 1 ПВС вытесняется из надтопливного пространства резервуара через дыхательный клапан 6 через «атмосферного зазора» 17 поступает в кольцевой воздуховод 8, далее перекачивается компрессором 22 по воздуховоду 7 в холодильник-конденсор 16. В холодильнике-конденсоре 16 из ПВС в результате охлаждения отделившийся конденсат утилизируется в бак-керосинослив 20, а очищенный воздух выводится наружу через выхлопную трубу 21 в атмосферу окружающей среды (аналогично очистным сооружениям ТЗК).

Работа воздушного откачивающего компрессора 22 синхронизирована с работой насоса подачи авиатоплива 2 в резервуар и управляется программируемым логическим контроллером PLC 4 (по алгоритму потребный расход +10 % в соответствии с расходами объема «ПВС – воздух – авиатопливо»), с целью исключения обратных перетоков ПВС и воздуха при перемене режимов вдоха и выдоха воздуховоды 7 снабжены воздушными заслонками с электроприводом 23 на линиях

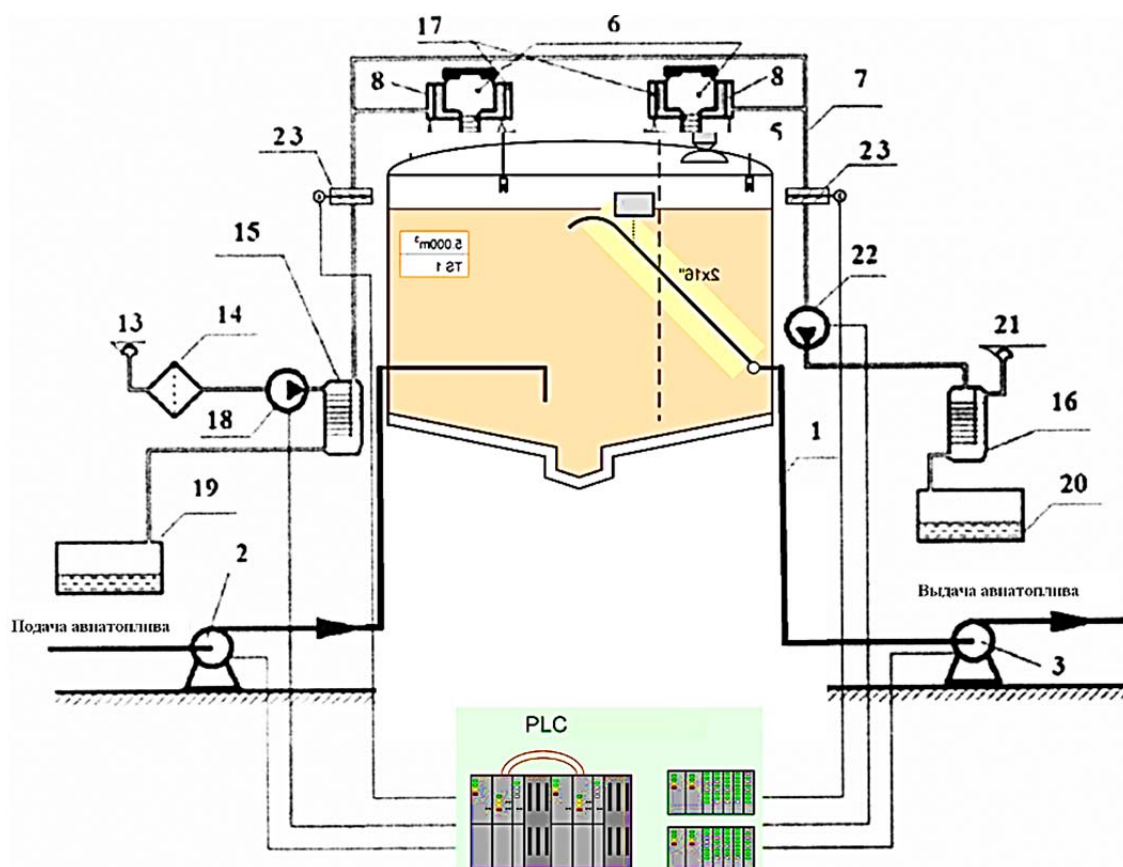


Рис. 4. Принципиальная схема системы сокращения потерь от испарения и обводнения авиатоплива в резервуарах ТЗК:

1 – резервуар; 2 и 3 – насосы; 4 – блок управления; 5 – крыша резервуара; 6 – дыхательный клапан КДС2-1500/250; 7 – воздуховод (подачи воздуха и отвода ПВС); 8 – кольцевой воздуховод; 9 – внутренняя обечайка; 10 – наружная обечайка; 11 – щели; 12 – кольцевая полость; 13 –воздухозаборник; 14 – фильтр-пылесборник; 15 и 16 – холодильник-конденсор; 17 – «атмосферный зазор»; 18 – воздушный компрессор нагнетающий; 19 – цистерна сбора атмосферной влаги; 20 – цистерна для конденсата ПВС; 21 – трубка; 22 – откачивающий воздушный насос; 23 – воздушные заслонки с электроприводом; 24 – основание

Fig. 4. Schematic diagram of the system for reducing losses from evaporation and water contamination in jet fuel in the RC tanks:

1 – reservoir; 2 and 3 – pumps; 4 – control unit; 5 – tank dome; 6 – breathing valve KDC2-1500/250; 7 – single air duct (air supply and VAM exhaust); 8 – ring (hollow) air duct; 9 – inner shell; 10 – outer shell; 11 – slots; 12 – ring cavity; 13 – atmospheric air intake; 14 – filter-dust collector; 15 – refrigerator-condenser; 16 – refrigerator-condenser; 17 – “atmospheric gap”; 18 – pneumatic pump; 19 – tank for collecting atmospheric moisture; 20 – tank for VAM condensate; 21 – tube; 22 – extraction pump; 23 – electrically-actuated air dampers; 24 – base

выдоха и вдоха соответственно. Электропривод каждой заслонки 23 управляется программируемым логическим контроллером PLC 4 по алгоритму вдох-выдох – соответственно подача-выдача авиатоплива. При этом заслонки 23 открываются и закрываются поочередно: при открытии одной синхронно закрывается другая и, наоборот, программируемый логический контроллер PLC 4 открывает одну из заслонок 23 синхронно с включением нагнетающего воздушного ком-

прессора 18 или откачивающего воздушного компрессора 22, в зависимости от приема или выдачи авиатоплива в резервуар и соответственно от режима вдоха или выдоха. В состоянии покоя системы (когда дыхания не происходит) при равенстве давления атмосферы и надтопливного пространства резервуара все заслонки 23 закрыты, исключая любые перетоки воздуха по воздуховоду 7.

При любых неисправностях системы, в т. ч. при отсутствии электропитания, работа штат-

ного дыхательного клапана резервуара не нарушается, в этом случае атмосферный воздух и ПВС беспрепятственно проникают в дыхательный клапан через «атмосферный зазор», таким образом обеспечивается бесперебойная работа дыхательного оборудования резервуара, не требуя вмешательства обслуживающего персонала. После возобновлении электропитания работа системы восстанавливается автоматически.

Заключение

1. Проведенный расчет потерь авиакеросина при больших и малых дыханиях резервуаров в условиях реального ТЗК показал, что в пределах норм естественной убыли потери составляют от 1 до 12 тонн в месяц.

2. Обзорные исследования применяемых систем снижения потерь авиатоплива от обводнения и испарения авиатоплива конструктивно сложны, требуют реконструкции штатного резервуарного оборудования, а также необходимости вмешательства в работу дыхательной системы резервуара.

3. Предложена автоматизированная система сокращения потерь от испарения и обводнения за счет осушения атмосферного воздуха, поступающего в резервуар, и конденсации авиакеросина из ПВС, выходящей из резервуара при больших и малых дыханиях резервуара в процессах хранения, приема и выдачи авиатоплива из резервуаров ТЗК.

4. Монтаж разработанного устройства подготовки воздуха не требует вмешательства в конструкцию штатного оборудования и не затрагивает технологию работы резервуарного парка и оборудования дыхательных систем.

5. Наибольший эффект от внедрения системы сокращения потерь от испарения и обводнения будут иметь ТЗК с высоким расходом авиатоплива, интенсивной оборачиваемостью резервуарного парка и с высокой степенью загазованности.

6. Внедрение системы сокращения потерь от испарения и обводнения в ТЗК и других объектах авиатопливообеспечения (нефтезаво-

ды, терминалы, нефтебазы, склады ГСМ и пр.) будет способствовать получению дополнительной прибыли за счет снижения экономических потерь, улучшению экологической обстановки и повышению уровня пожаро-взрывобезопасности резервуарных парков ТЗК.

Список литературы

1. Сальников А.В. Потери нефти и нефтепродуктов: учеб. пособие. Ухта: УГТУ, 2012. 108 с.

2. Земенков Ю.Д., Пашков М.И., Богатенко Ю.В. и др. Эксплуатация объектов хранения и распределения жидких углеводородов: учеб. пособие. СПб.: Недра, 2007. 534 с.

3. Коршак Ан.А., Коршак А.А. Метод прогнозирования потерь нефти и нефтепродуктов от «больших дыханий» за длительный период // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2018. № 5 (115). С. 79–87. DOI: 10.17122/ntj-oil-2018-5-79-87

4. Цегельский И.Г., Ермаков П.Н., Спиридонов В.С. Защита атмосферы от выбросов углеводородов из резервуаров для хранения и транспортирования нефти и нефтепродуктов [Электронный ресурс] // km.ru. 01.04.2004. URL: <https://www.km.ru/referats/231E364D59744A1F86233F71CF565DA1> (дата обращения: 10.05.2022).

5. Молчанов О.В., Старый С.В., Новиков М.В. Метод определения технологических потерь нефтепродуктов при приеме в резервуары // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 183. С. 88–91.

6. Браилко А.А. Дыхательная система резервуара для легкоиспаряющихся жидкостей / А.А. Браилко, Н.А. Дружинин, Л.А. Дружинин, А.В. Смольский. Патент RU № 2673004 С1, МПК В65D 90/28: опубл. 11.21.2018. Бюл № 33. 13 с.

7. Рыбаков К.В., Жулдыбин Е.Н., Коваленко В.П. Обезвоживание авиационных горюче-смазочных материалов. М.: Транспорт, 1979. 181 с.

8. Браилко А.А. Адаптивная информационно-управляющая система динамического

мониторинга фактической обводненности авиатоплива в технологических процессах авиатопливообеспечения / А.А. Браилко, В.М. Самойленко, Н.А. Дружинин, Л.А. Дружинин // Научный Вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 2. С. 20–29. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-20-29

9. Коваленко В.П., Ильинский А.А. Основы техники очистки жидкости от механических загрязнений. М.: Химия, 1982. 272 с.

10. Бахмат Г.В. Устройство для хранения и сокращения потерь нефти / Г.В. Бахмат, И.М. Ветров, С.Ю. Овчинников, М.Г. Речкалов, В.М. Смоленцев, А.Б. Шабаров. Патент RU № 2328430 C2, МПК B65D 88/34: опублик. 10.07.2008. Бюл № 19. 6 с.

11. Данченко Ю.В., Кулаков С.В. Дыхательная система резервуара для легкоиспаряющихся жидкостей. Патент RU 2181336 C2, МПК B65D90/30 B65D90/28: опублик. 20.04.2002. 4 с.

12. Матвеев Ю.А. Установка улавливания паров нефтепродуктов из автомобильных цистерн и резервуаров с применением охлаждающей смеси / Ю.А. Матвеев, В.А. Кузнецов, А.А. Бутузов, А.Ю. Мулгачев, Е.А. Варнакова. Патент RU № 122994 U1, МПК B65D 88/00: опублик. 20.12.2012. 8 с.

13. Матвеев Ю.А. Установка улавливания паров нефтепродуктов с дополнительным резервуаром сбора паров и системой их охлаждения для наземных вертикальных стальных резервуаров / Ю.А. Матвеев, В.А. Кузнецов, А.А. Бутузов, А.Ю. Мулгачев. Патент RU № 142402 U1, МПК B65D 88/00: опублик. 27.06.2014. 6 с.

14. Мартяшева В.А. Исследование испарения нефтей и нефтепродуктов из резервуаров в условиях интенсификации технологических процессов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа: Уфимский нефтяной ин-т, 1978. 21 с.

15. Александров А.А., Архаров И.А., Емельянов В.Ю. Обзор действующих систем улавливания паров нефтепродуктов // Современная АЗС. 2005. № 10. С. 130–133.

References

1. Salnikov, A.V. (2012). [*Losses of oil and petroleum products: Tutorial*]. Ukhta: UGTU, 108 p. (in Russian)

2. Zemenkov, Yu.D., Pashkov, M.I., Bogatenko, Yu.V. et al. (2007). [*Liquid hydrocarbons storage and distribution facilities operation: Tutorial*]. St. Petersburg: Nedra, 534 p. (in Russian)

3. Korshak, An.A. & Korshak, A.A. (2018). *Method of forecasting losses of oil and petroleum products from "big breaths" over a long period*. Problems of gathering, treatment and transportation of oil and oil products, no. 5 (115), pp. 79–87. DOI: 10.17122/ntj-oil-2018-5-79-87

4. Tsegelsky, I.G., Ermakov, P.N. & Spiridonov, V.S. (2004). [*Protection of the atmosphere from hydrocarbon emissions from reservoirs for storage and transportation of oil and petroleum products*]. km.ru. Available at: <https://www.km.ru/referats/231E364D59744A1F86233F71CF565DA1> (accessed: 10.05.2022). (in Russian)

5. Molchanov, O.V., Starii, S.V. & Novikov, M.V. (2012). *Method for determining the loss of petroleum process for admission to the tanks*. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, no. 183, pp. 88–91. (in Russian)

6. Brailko, A.A., Druzhinin, N.A., Druzhinin, L.A. & Smulsky, A.V. (2018). *Breather system reservoir for easy-fluid liquid*. Patent RU no. 2673004 C1, IPC B65D 90/28: publ. November 21. 13 p. (in Russian)

7. Rybakov, K.V., Zhuldybin, E.N. & Kovalenko, V.P. (1979). [*Aviation fuels and lubricants dehydration*]. Moscow: Transport, 181 p. (in Russian)

8. Brailko, A.A., Samoylenko, V.M., Druzhinin, N.A. & Druzhinin L.A. (2022). *Adaptive information management system of dynamic monitoring of actual water content in jet fuel in technological processes of aviation fuel supply*. Civil Aviation High Technologies, vol. 25, no. 2, pp. 20–29. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-20-29

9. Kovalenko, V.P. & Ilyinsky, A.A. (1982). [*Fundamentals of fluid purification technique from mechanical impurities*]. Moscow: Khimiya, 272 p. (in Russian)

10. Bakhmat, G.V., Vetrov, I.M., Ovchinnikov, S.J., Rechkalov, M.G., Smolentsev, V.M. & Shabarov, A.B. (2008). *Device for storing and reducing oil losses*. Patent RU no. 2328430 C2, IPC B65D 88/34: publ. July 10, 6 p. (in Russian)

11. Danchenko, Ju.V. & Kulakov, S.V. (2002). *Breathing system of reservoir for highly volatile liquids*. Patent RU no. 2181336 C2, IPC B65D90/30 B65D90/28: publ. April 20, 4 p. (in Russian)

12. Matveev, Yu.A., Kuznetsov, V.A., Butuzov, A.A., Mulgachev, A.Yu. & Varnakov, E.A. (2012). [*A unit for trapping vapors of petroleum products from automobile tanks and reservoirs using a cooling mixture*]. Patent RU

no. 122994 U1, IPC, B65D 88/00: publ. December 20, 8 p. (in Russian)

13. Matveev, Yu.A., Kuznetsov, V.A., Butuzov, A.A. & Mulgachev, A.Yu. (2014). [*A unit for trapping vapors of petroleum products with an additional vapor collection tank and their cooling system for ground vertical steel tanks*]. Patent RU no. 142402 U1, IPC B65D 88/00: publ. June 27, 6 p. (in Russian)

14. Martyasheva, V.A. (1978). [*Research of oils and oil products evaporation from reservoirs under conditions of technological processes intensification: Abstract of Candidate of Tech. Sc. Dissertation*]. Ufa: Ufimskiy neftyanoy institute, 21 p. (in Russian)

15. Alexandrov, A.A., Arkharov, I.A. & Emelyanov, V.Yu. (2005). [*Overview of existing oil vapor recovery systems*]. Sovremennaya AZS, no. 10, pp. 130–133. (in Russian)

Сведения об авторе

Браилко Анатолий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, A.brailko@mstuca.aero.

Information about the author

Anatoly A. Brailko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aviation Fuel Supply and Aircraft Repair Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, A.brailko@mstuca.aero.

Поступила в редакцию 30.06.2022
Принята в печать 26.01.2023

Received 30.06.2022
Accepted for publication 26.01.2023

УДК 621.396.96

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-34-48

Исследование современных подходов к обучению и разработке квалификационных требований к пилоту/оператору беспилотной авиационной системы в соответствии со стандартами ИКАО

К.С. Ермаков¹

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

Аннотация: В связи с бурным развитием технологии беспилотных авиационных систем (БАС) во всем мире они становятся все более значимыми для применения как в военной, так и в гражданской областях. Значительный рост числа и расширение сферы использования беспилотных летательных аппаратов привели к увеличению потребности в пилотах/операторах беспилотных летательных аппаратов, и таким образом данная профессия стала набирать популярность в авиации. В настоящей статье вначале дается классификация БАС, в том числе с учетом стандартов ИКАО, а также уникальные характеристики. Затем, учитывая текущие требования к квалификации пилота/оператора БВС авиационных властей США, Великобритании, Китая и России, анализируются общие и специальные квалификационные требования, которые включают профессиональные качества, медицинские требования, психологическую оценку, требования к обучению, опыт эксплуатации и взаимодействия. Кроме того, на основе различий между обучением пилотов пилотируемых воздушных судов и пилотов беспилотных летательных аппаратов рассмотрены содержание и методы обучения, включая человеческий фактор и психологическое здоровье, что имеет важное значение при отборе и обучении пилота/оператора БАС.

Ключевые слова: обучение пилотов/операторов беспилотных авиационных систем, классификация БАС, общие и специальные квалификационные требования к пилоту/оператору БАС.

Для цитирования: Ермаков К.С. Исследование современных подходов к обучению и разработке квалификационных требований к пилоту/оператору беспилотной авиационной системы в соответствии со стандартами ИКАО // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 1. С. 34–48. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-34-48

Research of modern approaches to training and developing qualification requirements for a pilot/operator of unmanned aircraft system in accordance with the ICAO standards

K.S. Ermakov¹

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

Abstract: Due to the explosive development of unmanned aircraft systems (UASs) technology worldwide, the UAS is becoming increasingly relevant for applications in both military and civilian fields. Good progress in the number and scope of unmanned aerial vehicles utilization has led to a high demand for pilots/operators of unmanned aerial vehicles. Thus, this profession began to gain in popularity in aviation. First, this article outlines the UAS classification considering the ICAO standards as well as unique characteristics. Furthermore, taking into consideration the current requirements for the qualification of the UAV pilot/operator issued by the aviation authorities of the USA, Great Britain, China and Russia, general and special qualification requirements, such as professional qualities, medical requirements, psychological screening, training requirements, operation and cooperation experience, are analyzed. In addition, based on the differences between the training of manned aircraft pilots and UAV pilots, the syllabus and methods of training inclusive of a human factor and physiological health are considered, which is of vital importance for selecting and training the UAS pilot/operator.

Key words: training of pilots/operators of unmanned aircraft systems, UAS classification, general and special qualification requirements for the UAS pilot/operator.

For citation: Ermakov, K.S. (2023). Research of modern approaches to training and developing qualification requirements for a pilot/operator of unmanned aircraft system in accordance with the ICAO standards. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 1, pp. 34–48. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-34-48

Введение

В связи с развитием и активным внедрением современных технологий беспилотные авиационные системы (БАС) в военной сфере превратились из вспомогательной в основную силу, которая может осуществлять практически весь спектр операций: наблюдение, разведку, радиоэлектронную разведку и нанесение ударов [1, 2]. В свою очередь беспилотные летательные аппараты (далее – БВС) широко используются в гражданских целях, таких как мониторинг окружающей среды, аэрофотосъемка, метеорология, пожаротушение, пограничное патрулирование, охрана рыболовства, правоохранительная деятельность [3] и пр. Таким образом, БВС стали незаменимыми как в военной, так и в гражданской сферах.

Данные авиационного регулятора США (FAA) показали, что в 2012 году в небе США для проведения авиационной деятельности применялось более 19 000 беспилотных летательных аппаратов. FAA прогнозирует, что в 2030 году в небе США будет летать 30 000 БВС¹. Почти каждый третий самолет, используемый американскими военными, является БВС [4]. Военно-воздушные силы США готовят больше пилотов БВС, чем пилотируемых бомбардировщиков и истребителей вместе взятых. БВС США также готовят больше пилотов БВС, чем любой другой род войск. Ожидается, что в текущем десятилетии индустрия БВС создаст от 100 000 до 200 000 рабочих мест. Между тем такие университеты, как Университет штата Канзас, Университет Северной Дакоты, Авиационный

университет Эмбри-Риддл, предлагают степень бакалавра в области беспилотных летательных аппаратов. Некоторые авиационные предприятия, такие как CAE и Northrop, также предоставляют программу обучения операторов БВС. В Китае администрация гражданской авиации Китая (СААС) подсчитала, что в ближайшем будущем число пилотов БВС превысит 30 000. В настоящее время только 27 органов по сертификации, уполномоченных СААС, были квалифицированы для получения сертификата пилота БВС, который в основном предназначен для небольших БВС.

В Российской Федерации в военной сфере с 2015 году в ВУНЦ БВС «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» открыт факультет беспилотной авиации, а в сфере гражданской авиации только Московский государственный технический университет гражданской авиации с 2022 года предлагает получить степень бакалавра в области БВС. Также внешний пилот-испытатель БВС и оператор-испытатель средств управления целевой нагрузкой БВС – это новые специальности авиационного персонала экспериментальной авиации (ЭА), которые были введены в Перечень специалистов ЭА РФ приказом Минпромторга России от 22 сентября 2016 года № 3366. Первоначальную подготовку и повышение квалификации специалистов-испытателей, входящих в экипаж БВС, по программам профессиональной переподготовки в соответствии ФАП-1570 (утверждены Минпромторгом России) осуществляет авиационный учебный центр научно-исследовательской (испытательной) организации авиационной промышленности Школа летчиков-испытателей АО «ЛИИ им. М.М. Громова». Она является единственным учебным заведением в России, выполняющим государственную функцию по подготовке специалистов авиационного персонала ЭА для предприятий

¹ Department of Defense, FY2011-2036 [Электронный ресурс] // publicintelligence.net. 2011.108 p. URL: <https://publicintelligence.net/dod-unmanned-systems-integrated-roadmap-fy2011-2036/> (дата обращения: 27.07.2022).

и организаций авиационной промышленности, создающих новую отечественную авиационную технику и ВС гражданского и военного назначения, в том числе и беспилотные. Первый выпуск внешних пилотов-испытателей, прошедших обучение в Школе летчиков-испытателей (ШЛИ) ЛИИ им. М.М. Громова и аттестованных Центральной аттестационной комиссией ЭА в количестве 16 человек, состоялся в 2018 году².

По мере роста спроса пилот/оператор БВС станет популярной профессией как в мире, так и в России. Премьер-министром Российской Федерации Михаилом Мишустинным 5 октября 2021 г. утверждена Концепция интеграции беспилотных воздушных судов в единое воздушное пространство³. Программа рассчитана на три этапа и должна быть полностью реализована к 2030 году. Безопасная интеграция пилотируемых и беспилотных воздушных судов в единое воздушное пространство страны является ключевой задачей, что и предусматривает к 2030 году поэтапную интеграцию беспилотников. В рамках Концепции до 2023 года продлится организационный период по упрощению процедур и снятию ряда ограничений для полетов беспилотных воздушных судов, а также планируется внедрение специальных сервисов для электронной регистрации и учета БВС, установления правил подготовки и выполнения полетов. Далее до 2027 года предусматривается разработка и внедрение новых технологий по обеспечению безопасности полетов БВС, создание необходимой инфраструктуры связи, систем навигации и наблюдения. Также необходимо разработать и утвердить, например, технические требования к систе-

мам и оборудованию по обеспечению безопасности полетов, порядок использования сегрегированного воздушного пространства. До 2030 года планируется завершить создание технической инфраструктуры для обеспечения безопасности, внедрить цифровые технологии управления полетами беспилотных и пилотируемых воздушных судов в не-сегрегированном пространстве, принять необходимые нормативные правовые акты. Важным аспектом концепции является использование экспериментальных правовых режимов (ЭПР) как основного механизма по ее реализации для разработки и внедрения инновационных технологий.

Для успешной реализации концепции потребуется разработать дифференцированные нормы летной годности и допуска к выполнению полетов БАС на основе рискориентированного подхода с учетом рекомендаций ИКАО [5] и лучших международных практик^{4,5,6,7}, что необходимо для сертификации БАС и последующей коммерческой эксплуатации. Также необходимо разработать и внедрить типовые программы подготовки персонала и внешних пилотов, согласованные и утвержденные уполномоченными органами.

² История развития и сегодняшний день беспилотной авиации [Электронный ресурс] // Российские беспилотники RussianDrone. URL: <https://russiandrone.ru/publications/istoriya-razvitiya-i-segodnyashniy-den-bespilotnoy-aviatsii/> (дата обращения: 27.07.2022).

³ Правительство утвердило Концепцию интеграции беспилотников в единое воздушное пространство России [Электронный ресурс] // Правительство России. Официальный сайт. URL: <http://government.ru/news/43502/> (дата обращения: 27.07.2022).

⁴ Doc 7300/9: Конвенция о международной гражданской авиации. 9-е изд. // ИКАО, 2006. 116 с.

⁵ Unmanned aircraft systems beyond visual line of sight aviation rulemaking committee [Электронный ресурс] // Final report. 2022. March 10. URL: https://www.faa.gov/regulations_policies/rulemaking/committees/documents/media/UAS_BVLOS_ARC_FINAL_REPORT_03102022.pdf (дата обращения: 27.07.2022).

⁶ European union aviation safety agency acceptable means of compliance (AMC) and guidance material (GM) to commission implementing regulation (EU) 2019/947. Annex I to ED Decision 2019/021/R [Электронный ресурс] // Annex I to ED Decision 2019/021/R. 2019. October 9. Iss. 1. 130 p. URL: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/AMC%20%26%20GM%20to%20Commission%20Implementing%20Regulation%20%28EU%29%202019-947%20%E2%80%94%20Issue%201.pdf> (дата обращения: 27.07.2022).

⁷ Introduction to ICAO model uas regulations and advisory circulars [Электронный ресурс] // icao.int. URL: <https://www.icao.int/safety/UA/Pages/ICAO-Model-UAS-Regulations.aspx> (дата обращения: 27.07.2022).

Таблица 1
Table 1

Классификация БВС (БАС)
UAV(UAS) classification

Категория	Вес, кг	Высота полета, выше уровня земли, м	Дальность, км	Время полета, ч	Применение
Микро	<2	до 60	<5	<1	разведка, инспекция
Мини	2–20	до 900	<25	1–2	разведка, инспекция
Малые	20–150	до 1500	<50	1–5	разведка, инспекция
Тактические	150–600	до 3000	100–300	4–15	разведка, инспекция
Средняя высота, дальнего действия (MALE – Medium Altitude Long Endurance)	>600	до 13500	>500	>24	разведка, инспекция, военное ударное применение
Высотные, дальнего действия (HALE – High Altitude Long Endurance)	>600	до 18 000	Практически неограниченна	>24	разведка, инспекция, военное ударное применение, ретрансляция сигналов

В данной статье нами рассматриваются основные аспекты, связанные с квалификацией и обучением пилотов/операторов БВС. Во-первых, излагаются классификация и эксплуатационные характеристики БВС. Затем, в соответствии с требованиями действующих правил, обсуждаются требования к квалификации пилота/оператора БВС. Наконец, в последнем разделе предлагаются методы и содержание программ обучения, также в области человеческого фактора и психологического здоровья, что имеет важное значение при отборе и обучении пилота/оператора БВС.

1. Классификация и эксплуатационные характеристики БВС (БАС)

1.1. Классификация БВС (БАС)

В настоящее время из-за разнообразия весовых, габаритных, эксплуатационных и летных характеристик не существует единой международной классификации БВС. Как правило, БВС классифицируются по максимальной взлетной массе, высоте, времени полета, виду использования и дальности полета (табл. 1).

В то же время в соответствии с результатами, полученными профильной рабочей группой Международной организации гражданской авиации (ИКАО) и консультативной группой ИКАО по беспилотным авиационным системам (UAS-AG)⁸, нами была составлена следующая обобщенная классификация БВС по максимальной взлетной массе входящих в их состав беспилотных воздушных судов (табл. 2).

Также на основании рекомендаций ИКАО⁹ нами приводится классификация БВС (БАС) гражданского применения по видам авиационных работ:

- транспортные работы;
- авиационные работы по оказанию медицинской помощи и проведению санитарных мероприятий;
- авиационные монтажные и буксировочные работы;

⁸ Unmanned aircraft systems advisory group (UAS-AG) [Электронный ресурс] // icao.int.
URL: [https://www.icao.int/safety/UA/Pages/Unmanned-Aircraft-Systems-Advisory-Group-\(UAS-AG\).aspx](https://www.icao.int/safety/UA/Pages/Unmanned-Aircraft-Systems-Advisory-Group-(UAS-AG).aspx) (дата обращения: 27.07.2022).

⁹ Cir 328: Unmanned aircraft systems (UAS) // ICAO, 2011. 38 p.

Таблица 2
Table 2

Классификация БВС (БАС) ИКАО
ICAO UAV (UAS) classification

Категория	Вес БВС, кг	Уровень регулирования
Малые БВС (БАС)	До 25	Национальный
Легкие БВС (БАС)	От 25 до 150	Национальный
БВС (БАС)	Более 150	ИКАО, наднациональный

- авиационное распределение веществ и биологических объектов (в том числе внесение агрохимикатов, экологические работы, тушение пожаров и пр.);
- воздушные съемочные работы – аэрофото-съемка, киносъемка, многоспектральная съемка, дистанционное зондирование земли;
- воздушное наблюдение (за состоянием сельхозугодий, объектов инфраструктуры, массовыми мероприятиями и пр.) и патрулирование, летные проверки, поисковые работы.

1.2. Эксплуатационные характеристики БВС (БАС)

В связи с тем что большинство БАС управляются через каналы передачи данных, их функционирование имеет специфические особенности. Во-первых, поскольку пилот/оператор БВС управляет БВС по каналу передачи данных со станции дистанционного управления, которая может быть расположена на значительном удалении, в том числе и вне зоны прямой видимости, даже в сотнях или тысячах километров, то очевидно, что необходимо обеспечить высокую пропускную способность каналов обмена данными при минимальной задержке сигнала. Данные требования оказывают существенное влияние на успешное выполнение полета. То есть чем более автономным является управление, тем большие требования предъявляются к оператору. Во-вторых, продолжительность полета может варьироваться от нескольких минут до более чем суток, а также на выполнение по-

лета оказывает влияние целый ряд неблагоприятных обстоятельств внешней среды. Например, для БАС типа HALE пилот/оператор должен следить за экранами, показывающими критически важные параметры всей системы, что для оператора утомительно и рутинно. В-третьих, любой полет для крупных БВС, как правило, не может быть успешно выполнен одним человеком, а требует совместной работы целой команды операторов. Например, чтобы успешно выполнить боевую задачу БВС типа Global Hawk требуется шесть операторов, которые контролируют 13 экранов и работают на шести рабочих местах на станции управления¹⁰.

Кроме того, если сравнивать с выполнением полета пилотом пилотируемого воздушного судна [6, 7], то пилот/оператор БВС: не находится на борту, а непосредственно управляет БВС с наземной станции управления полетом (НСУП), не может получить такое же качество и объем информации о ходе полета.

Это обусловлено тем, что пилот/оператор БВС теряет большую часть сенсорной информации – зрительной, звуковой, кинетические ощущения, а также у него нет прямой обратной связи в зависимости от условий полета, таких как погода, задымление, вибрация летательного аппарата, силы тяжести и ускорения, когда пилот/оператор перемещает органы управления. Он контролирует БВС

¹⁰ Northrop Grumman RQ-4 Global Hawk [Электронный ресурс] // wikipedia.org. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Northrop_Grumman_RQ-4_Global_Hawk#Specifications_\(RQ-4B_Block_30/40\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Northrop_Grumman_RQ-4_Global_Hawk#Specifications_(RQ-4B_Block_30/40)) (дата обращения: 27.07.2022).

только с помощью бортовых датчиков и камеры, получая информацию, отображаемую на экране НСУП. Вся информация и состояние БВС могут быть получены пилотом/оператором БВС исключительно с помощью радиотелеметрии, сотовой или спутниковой связи, а все маневры, которые выполняет пилот, передаются только по линии связи для передачи данных на БВС. Наконец, пилот/оператор БВС чувствует себя изолированным от летательного аппарата и испытывает недостаток в традиционной, физической обратной связи. Таким образом, из-за наличия различных типов БАС имеющих уникальные индивидуальные характеристики к пилоту/оператору БВС должны предъявляться, возможно, даже более высокие требования, чем к пилоту пилотируемого воздушного судна.

2. Квалификационные требования к пилоту/оператору БВС (БАС)

2.1. Обзор текущих требований авиационных властей

В настоящее время авиационные власти по всему миру стремятся законодательно закрепить правила и положения для БВС не только о процессе летной и технической эксплуатации [8], но и о процессе сертификации. Европейское агентство авиационной безопасности (EASA) опубликовало A-NPA 2015-10 «Введение нормативной базы для эксплуатации беспилотных летательных аппаратов» в 2015 году¹¹, в котором говорится, что пилот БВС должен получить сертификат на выполнение полетов. В целях обеспечения безопасности полетов Федеральное авиационное управление (FAA) разработало временное Руководство по выполнению полетов (Interim Operational Approval Guidance) 08-01: Эксплуатация беспилотных авиационных систем в Национальной системе воздушного простран-

ства США в 2008 году¹², впервые предложив требования к пилоту/оператору БВС, в котором говорится, что пилот должен иметь лицензию. В 2011 году FAA опубликовало приказ 8130.34В о сертификации летной годности беспилотных авиационных систем и, возможно, пилотируемых воздушных судов¹³, в котором содержится требование о том, что пилот БАС должен иметь свидетельство как минимум частного пилота FAA и действительный медицинский сертификат летчика второго класса (или выше). В разделе 333 Закона о модернизации и реформе FAA от 2012 года также говорится, что пилот БВС должен иметь лицензию пилота, медицинскую справку или действительные водительские права. Уведомление о предлагаемом нормотворчестве для малых БВС (NPRM), выпущенное FAA в 2015 году¹⁴, четко определяет квалификацию и обязанности пилота, управляющего легкими БВС весом менее 25 кг. Для военных существует Регламент армии США 95-23: Правила полетов беспилотных летательных аппаратов, требующий, чтобы оператор БВС прошел обучение и оценку. В документе DEFSTAN00-970 «Требования к конструкции и летной годности для служебных самолетов», часть 9 «Системы беспилотных летательных аппаратов», выпущенном министерством обороны Великобритании в 2013 году, указывается, что оператор БВС может не иметь опыта управления пилотируемыми самолетами. В 2002 году Управление по безопасности гражданской авиации (CASA) в Австралии

¹¹ Introduction of a regulatory framework for the operation of drones [Электронный ресурс] // easa.europa.eu. URL: <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/A-NPA%202015-10.pdf> (дата обращения: 27.07.2022).

¹² Unmanned aircraft systems operations in the U.S. national airspace system [Электронный ресурс] // hsd.org. URL: <https://www.hsd.org/?view&did=723339> (дата обращения: 27.07.2022).

¹³ 8130.34B – Airworthiness certification of unmanned aircraft systems and optionally piloted aircraft document information [Электронный ресурс] // Federal Aviation Administration. URL: https://www.faa.gov/regulations_policies/orders_notices/index.cfm/go/document.information/documentID/1019693 (дата обращения: 27.07.2022).

¹⁴ Unmanned aircraft systems (UAS) [Электронный ресурс] // Federal Aviation Administration. URL: https://www.faa.gov/regulations_policies/rulemaking/recently_published (дата обращения: 27.07.2022).

опубликовало «Правила безопасности гражданской авиации» (CASR) AC101-1 «Беспилотные летательные аппараты и ракеты: эксплуатация беспилотных летательных аппаратов (БВС), технические характеристики, техническое обслуживание и обучение персонала»¹⁵, в которых содержится требование к оператору, намеревающемуся осуществлять коммерческие операции с использованием БВС, иметь сертификат эксплуатанта. В Китае, рассматривая развитие беспилотных летательных аппаратов¹⁶, СААС еще в 2013 году издал Временное положение об управлении пилотами гражданских беспилотных летательных аппаратов, которое является руководством для пилотов гражданских беспилотных летательных аппаратов и содержит конкретные требования к сертификату пилота, знаниям и эксплуатации. В 2015 году СААС издал Временную административную процедуру для эксплуатации гражданских БВС для коммерческой авиации общего назначения, в которой указано, что оператор, который управляет БВС весом более 7 кг, осуществляющим полеты на высоте более 500 метров, радиусом полета более 500 метров, должен иметь сертификат об обучении или лицензию. С 2016 года Требования к управлению стандартами полетами гражданской авиации обязывают, чтобы оператор БАС обладал соответствующей технической квалификацией и проходил профессиональную подготовку, а БАС должен быть включен в систему управления авиацией общего назначения¹⁷.

Таким образом, действующие международные правила БАС содержат только общие тре-

бования к пилоту/оператору БАС. Не существует согласованных и подробных требований к квалификации пилота/оператора БВС, и отрасли критически важно выработать единые квалификационные требования управления подготовкой пилота/оператора БВС.

2.2. Квалификационные требования

По аналогии с действующими правилами летной годности и взаимодействия между оператором и системой во время эксплуатации воздушных судов для квалификации пилота/оператора БВС следует учитывать несколько факторов, в том числе профессиональные качества, медицинские требования, психологическую оценку, требования к обучению, опыт работы и координация.

2.2.1. Профессиональные качества

Профессиональный и квалифицированный пилот/оператор БВС должен обладать пятью качествами, включая профессиональную преданность делу, чувство долга, самоконтроль, энтузиазм в работе, логичность (рациональность). Кроме того, пилот/оператор БВС должен быть не моложе 18 лет, быть физически подготовленным, хорошо разбираться в теории аэронавигации и действующих авиационных правилах.

2.2.2. Медицинские требования

По сравнению с пилотом пилотируемого воздушного судна в настоящее время пилот/оператор БВС может иметь медицинскую справку, но она не является обязательной¹⁸. Безусловно, необходимо иметь хорошее зрение, но оно может быть хуже, чем у пилота пилотируемого летательного аппарата. Медицинские требования могут отличаться из-за разнообразия типов БВС. Для небольших БВС, эксплуатируемых в прямой видимости, может быть достаточно медицинской справки, как для получения водительских прав. Тем не менее, например, в США для более

¹⁵ Advisory circular (AC) 101-1 [Электронный ресурс] // icao.int. URL: <https://www.icao.int/safety/UA/UAID/Documents/AC%20101-1.pdf> (дата обращения: 27.07.2022).

¹⁶ Low level operation of light and small unmanned aircraft systems [Электронный ресурс] // droneregulations.info. URL: <https://droneregulations.info/China/CN.html> (дата обращения: 27.07.2022).

¹⁷ Management requirements for the translated airworthiness documents of civil aeronautical products and articles [Электронный ресурс] // caac.gov. URL: http://www.caac.gov.cn/en/ZCFG/ZCXWJ/GLWD/201602/t20160226_29239.html (дата обращения: 27.07.2022).

¹⁸ Cir 328: Unmanned aircraft systems (UAS) // ICAO, 2011. 38 p.

крупных беспилотных летательных аппаратов оператор должен иметь действительный медицинский сертификат второго или третьего класса, описанный в 14 CFR, часть 67 «Медицинские стандарты и сертификация»¹⁹. Для операторов, которые отвечают за планирование маршрута выполнения полета, передачу данных и полезную нагрузку, медицинские требования могут быть упрощены в зависимости от должности.

2.2.3. Психологическая оценка

В последние годы число авиационных происшествий, вызванных психологическими проблемами пилотов, растет, но не все авиакомпании уделяют серьезное внимание психологическому здоровью. Международная организация гражданской авиации (ИКАО) уделяет этому много внимания, но по данному вопросу все еще недостаточно разработано нормативных актов или проведено научных исследований. Еще в 2013 году FAA опубликовало отчет о расследовании авиационных происшествий, в котором указано, что в 2758 авиационных происшествиях в период с 2002 по 2012 год произошло 8 несчастных случаев, вызванных самоубийством пилота [9, 10]. Согласно окончательному отчету о расследовании Французского бюро расследований и анализа безопасности гражданской авиации (BEA) крушение рейса 9525 авиакомпании Germanwings было преднамеренно вызвано вторым пилотом, у которого были симптомы психотической депрессии, который лечился от суицидальных наклонностей²⁰. Эти несчастные случаи заставляют авиакомпанию и авиационные власти уделять больше внимания психологическому здоровью пилотов.

¹⁹ Aeronautics and space [Электронный ресурс] // ecfr.gov. URL: <https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-D/part-67?toc=1> (дата обращения: 27.07.2022).

²⁰ Accident on 24 March 2015 at Prads-Haute-Bléone (Alpes-de-Haute-Provence, France) to the Airbus A320-211 registered D-AIPX operated by Germanwings [Электронный ресурс] // Final Report. URL: https://bea.aero/uploads/tx_elydbrapports/BEA2015-0125.en-LR.pdf (дата обращения: 27.07.2022).

Аспекты, касающиеся психологии пилота/оператора БВС, и выпущенные правила БВС не ссылаются на психологические требования в квалификационных требованиях и недостаточно исследованы, что обусловлено малым количеством научных статей по данному вопросу. В 2014 году БВС США провели исследование психологической оценки кандидатов на обучение пилотов дистанционно пилотируемых транспортных средств (RPV) и впервые предложили стандартизированное тестирование личности перед обучением. В тестировании личности использовался метод (NEO-PI-R), который оценивает кандидатов по пяти основным личностным характеристикам: невротизм, экстраверсия, открытость, уступчивость и добросовестность. В исследовании приняли участие 7682 участника, которые прошли обучение пилотируемому или беспилотному пилотированию в период с 2009 по 2013 год [4]. Исследование показало, что кандидаты на обучение пилотов RPV с большей вероятностью сохраняют спокойствие под давлением, медленнее впадают в гнев, менее склонны к чувству грусти и безнадежности, имеют более высокую самооценку и считают себя более способными справляться с трудными ситуациями.

По мере повышения уровня информатизации и автоматизации БВС физическая нагрузка на пилота/оператора БВС снижается, но умственная нагрузка увеличивается, особенно в чрезвычайных, специальных и ответственных миссиях. Если подобные проблемы не будут решаться оперативно, это может оказать влияние на психическое здоровье оператора и, соответственно, на уровень безопасности полетов. Таким образом, при отборе пилота/оператора БВС необходимо оценивать психологическое состояние кандидатов, которое включает ряд следующих факторов: уровень добросовестности, ответственность, ориентацию на достижение результата, коммуникабельность, эмоциональную стабильность, уверенность в себе, самоуважение, самодисциплину, а также регулярное посещение психологических консультаций, все это необходимо для обеспечения безопасности полетов.

2.2.4. Требования к обучению

Общемировой опыт показывает, что для пилота малого БВС необходимо сдать экзамен по теории авиации, пройти простое вариативное обучение и получить сертификат или лицензию в соответствии с национальными требованиями авиационных правил [11, 12]. Согласно, например, правилам авиационных властей США пилот БВС должен иметь водительские права. Для БВС выше тактического уровня пилот/оператор должен иметь образование уровня бакалавра в области авиации или инженерии, пройти профессиональную программу подготовки пилотов, изучить аэронавигационные дисциплины и иметь необходимый налет часов. Для оператора БВС, служащего в армии, полиции и госслужбе, необходимо иметь лицензию пилота с определенным налетом часов, а принимая участие в боевых операциях или будучи связанным с местом преступления, военный или полицейский оператор должен посещать психологические консультации [13] для подтверждения, что его психическое состояние находится на должном уровне для эффективного выполнения поставленной задачи.

2.2.5. Опыт летной и технической эксплуатации

В связи с тем что экипаж БВС не находится на борту, эксплуатационные характеристики и управление БВС отличаются от пилотируемых воздушных судов. Как правило, экипажи беспилотных летательных аппаратов находятся на наземных пунктах управления полетом, которые могут находиться на значительном удалении от БВС. Также, как правило, БВС управляется посредством предварительно загруженной программы полета, а не непосредственно оператором. Таким образом, пилот/оператор БВС должен пройти специальную подготовку, чтобы обеспечить безопасность полета в условиях, когда система управления БВС находится в изолированной среде [14]. Если оператор небольших БВС может не иметь большого опыта выполнения полетов в зоне прямой видимости, то для более крупных БВС, особенно для применения

в военных или служебных целях, оператору необходимо иметь значительный опыт для обеспечения успешного выполнения задания и безопасности полетов.

2.2.6. Координация

Поскольку в последние годы разработка и применение БВС расширяются, то возрастает необходимость их взаимодействия в воздушном пространстве с другими БВС, пилотируемыми летательными аппаратами, беспилотными наземными аппаратами и беспилотными надводными и подводными аппаратами. Очевидно, что пилот/оператор БВС должен быть знаком не только с летной и технической эксплуатацией БВС, но также и с эксплуатационными характеристиками других транспортных средств, проходить систематическую подготовку по взаимодействию с разными типами аппаратов перед выполнением полета.

Полагаем, что квалификационные требования к пилоту/оператору БВС (БАС) и нормативная база требуют постоянной доработки в соответствии с внедрением технологий и изменений в законодательство.

3. Обучение пилотов/операторов БВС (БАС)

В настоящее время в соответствии с приказом Минтранса РФ типовую программу обучения для специалистов по эксплуатации БАС планируется утвердить 1 марта 2023 года. Проект находится на стадии публичных обсуждений²¹. Ключевыми аспектами проекта программы являются следующие.

Выделено три рабочих программы с двумя квалификациями:

- «Специалист по эксплуатации беспилотных авиационных систем, включающих в себя одно беспилотное воздушное судно с максимальной взлетной массой 10 кг и ме-

²¹ Формирование окончательного варианта текста проекта нормативно-правового акта [Электронный ресурс] // Проект. URL: <https://regulation.gov.ru/projects#npa=130645> (дата обращения: 27.07.2022).

нее». Срок обучения – 72 академических часа;

- «Специалист по эксплуатации беспилотных авиационных систем, включающих в себя одно или несколько беспилотных воздушных судов с максимальной взлетной массой 30 кг и менее». Срок обучения – 144 академических часа.

Программа переподготовки с первой квалификации на вторую. Срок обучения – 72 академических часа.

Обучаться по программам смогут лица, имеющие среднее общее образование, среднее профессиональное образование и (или) высшее образование, а также получающие среднее профессиональное и (или) высшее образование.

Весь процесс обучения поделен на три этапа и пять модулей.

1. Теоретическая подготовка, модули: «Общая нормативно-техническая информация», «Устройство и эксплуатация БАС» и «Теоретическая часть наземной подготовки на вид БАС».

2. Наземная практика, модуль «Практическая часть наземной подготовки на БАС».

3. Летная практика, модуль «Летная практика на БАС».

Предполагается, что первый этап может быть пройден в очной или очно-заочной форме с возможностью применения электронного обучения и дистанционных образовательных технологий.

Очевидно, что существует разница в подходе к обучению пилотов БВС и пилотируемых воздушных судов [6, 7]. Во-первых, без наличия человека на борту оператор БВС (БАС), находясь в НПУП, определяет местоположение и управляет БВС (БАС). Во-вторых, у пилота БВС (БАС) нет физических ограничений, навыки управления отличаются, что требует совершенно других требований. В-третьих, БВС (БАС) управляется командой, включая пилота, оператора полезной нагрузки, оператора канала передачи данных, оператора планирования задания и другой вспомогательный персонал, что требует дифференцированного подхода к ответственно-

сти каждого члена команды и содержанию программ обучения. В-четвертых, существуют различные типы БВС (БАС), требующие учитывать разнообразные аспекты обучения. Таким образом, содержание и методы обучения пилотов/операторов БВС (БАС) должны учитываться в каждом конкретном случае.

Как и при обучении пилотов пилотируемых воздушных судов, пилоту/оператору БВС (БАС) также необходима практическая летная подготовка. Использование при обучении только реальных физических БВС имеет два недостатка. Первый из них – повышенный риск авиационного происшествия, так как пилот пилотируемого воздушного судна при появлении неисправности может предпринять определенные физические действия для снижения вероятности возникновения авиационного происшествия. Однако если сбой или неисправность произойдет во время полета БВС, то скорее всего наиболее вероятным последствием будет его крушение. Второй – растущая стоимость БВС (БАС) при постоянно увеличивающейся сложности, особенно это характерно для больших БВС. Таким образом, использование реальных БВС для обучения приведет к значительному увеличению расходов на обучение и потребует привлечения дополнительного количества преподавательского персонала. Также обучение на реальных БВС (БАС) приведет к повышенному износу или повреждению БВС (БАС) из-за возможной неправильной эксплуатации при обучении, что может увеличить расходы на запасные части и на техническое обслуживание БВС (БАС).

Учитывая все эти факторы, обучение пилота/оператора БВС должно включать теоретическую подготовку, обязательное обучение на тренажере, обучение управлению малыми БВС и специализированное обучение, что должно охватывать практически все учебные предметы, снижать риски и затраты на обучение, повышать эффективность и уменьшать ненужный ущерб из-за человеческих ошибок. Основное содержание и методы обучения пилота/оператора БВС (БАС) приведены в табл. 3.

Таблица 3
Table 3

Основное содержание и методы обучения пилотов/операторов БВС (БАС)
Syllabus and methods of training UAV (UAS) pilots/operators

ПП	Курс	Дисциплина	Содержание	Метод и оборудование
1	Теоретическое обучение	Базовые знания	Аэродинамика, принцип полета, управление полетом, управление воздушным движением, правила полета, критические метеорологические условия и т. д.	Теоретические лекции, каждая тема преподается преподавателями/экспертами. Психологическое здоровье преподается профессиональным авиационным психологом, а целенаправленная психологическая подготовка была интегрирована в тренажеры и реальные полеты. Согласно отчетам о расследованиях несчастных случаев, вызванных человеческим фактором, введение проблем с человеческим фактором в эксплуатацию беспилотных летательных аппаратов, предоставление соответствующих рекомендаций при обучении эксплуатации
		Введение в БАС	Разработка, категории и применение БАС, проблемы и развитие технологии	
		Компоненты БВС (БАС)	БАС, наземный пункт управления полетом, каналы передачи данных, полезная нагрузка, вспомогательное оборудование, человеческий фактор	
		Задания БАС	Типичный анализ задач и данных, планирование миссии, процедуры завершения миссии	
		Безопасность полетов	Анализ рисков, управление безопасностью полетов, сценарии аварийных ситуаций	
		Нормативные документы	ИКАО, Росавиация, FAA, НАТО, EASA, Китай, Великобритания и т. д.	
		Расследование АП	Типичные отчеты о расследованиях АП БАС и пр.	
		Психологическое здоровье	Базовые знания авиационной психологии, психологический тренинг, управление стрессом, кейсы (тематические исследования)	
2	Обучение на тренажере	Человеческий фактор	Базовые знания, человеческие ошибки и безопасность, эргономика, кейсы (тематические исследования)	Учебный тренажер, имитация от анализа миссии до планирования пути, от контроля до дебрифинга, под руководством профессионального инструктора
		Вступление	Компоненты, функциональность БАС, эксплуатационные процедуры	
		Летные навыки	Базовые операции, планирование миссии, взлет и посадка, аварийная посадка и т. д.	
		Моделирование типичных задач	Краткие постановки задач и разбор полетов, тренажерная подготовка, анализ данных, электронные/бумажные отчеты	
3	Производство полетов малого БВС	Совместное обучение	Совместная тренировка команды операторов беспилотных летательных аппаратов по выполнению типичного задания	Винтокрылые или небольшие беспилотные летательные аппараты с фиксированным крылом, отчеты о расследованиях военных и гражданских авиационных властей
		Летные навыки	Технические навыки, взлет, набор высоты, полет, посадка и восстановление, аварийная посадка	
4	Специализированное обучение	Взаимодействие	Имитация взаимодействия с командиром, диспетчером УВД и другим персоналом	Использование специальной зоны/площадки, специальных БВС. Использование учебно-тренировочных самолетов, таких как, например, AN-2, Cessna 172 или TB-20
		Специальная предметная подготовка	Нацелено на БВС специального назначения, например на БВС, предназначенные для тушения лесных пожаров (запуск огнетушителей, перезарядка, замена полезной нагрузки, обнаружение пожара и т. д.)	
4	Специализированное обучение	Особенности выполнения полетов	Для оператора более крупного БВС, пилотирующего пилотируемый летательный аппарат, сравнивая разницу в управлении между БВС и пилотируемым воздушным судном	

Согласно статистике и отчетам о расследованиях авиационных происшествий психологическое здоровье и человеческие ошибки являются двумя основными факторами, влияющими на безопасность полетов. Но для обучения пилотов/операторов БВС (БАС) эти факторы еще недостаточно исследованы. Таким образом, психологическое здоровье и человеческий фактор в обучении пилотов/операторов БВС (БАС) требуют дальнейшего изучения.

3.1. Психологическое здоровье

Улучшение психологического здоровья необходимо летному составу, чтобы снять усталость, повысить эффективность работы и лучше справляться с нагрузками. Эксперты отмечают, что наличие психологических проблем при выполнении полета затруднительно определить при психологической оценке на этапе приема на работу [15]. Пилоты пилотируемых воздушных судов регулярно проходят психологические тренинги и посещают консультации. Таким образом, тренинги по психологическому здоровью должны быть включены в программу обучения пилотов/операторов БВС. Тренинги должны проводиться авиационным психологом, учебный план должен формироваться с учетом особенностей выполнения полетов, возраста и текущего психического состояния пилота, для того чтобы помочь освоить необходимые методы по устранению негативных эмоций. Содержание тренинга по психологическому здоровью возможно разбить на три части. Во-первых, авиационные психологи знакомят с основами авиационной психологии и на основе отчетов по расследованию авиационных происшествий БВС, вызванных человеческим фактором, обсуждают с пилотом важность психологических факторов при эксплуатации БВС. Во-вторых, пилоту объясняют современные методы психической тренировки. Необходимо обучать пилота/оператора БВС таким аспектам, как внимание, память и мышление, используя виртуальные тренажеры и реальный полет. Также пилот/оператор БВС должен быть подготовлен к управлению в аварийной ситуации. В-третьих, пилоту/оператору следу-

ет овладеть методами управления стрессом и своими эмоциями, нормализации сна, использования физических упражнений, в том числе и для саморасслабления. Все это необходимо, чтобы пилот/оператор БВС смог эффективно выполнить запланированное задание.

3.2. Человеческий фактор

Статистика показывает, что почти 40 % авиационных происшествий с БВС (БАС) могут быть связаны с человеческими ошибками или нарушением процедур эксплуатации²². Исследования ряда экспертов [15] показывают, что плохая осведомленность о ситуации была связана с ошибками оператора в серии тренировочных заданий. Например, при крушении военных БВС частично причиной аварий становилось сужение фокуса внимания, особенно во время действий по наведению на цель. Одновременно увеличивалась частота сердечных сокращений пилота и умственная нагрузка. Разница между выполнением полета одним и двумя операторами указывает на то, что для эффективного выполнения поставленной задачи только одного оператора БВС (БАС) недостаточно. Таким образом, необходимо включить программу «Человеческий фактор» в программу обучения пилотов/операторов БВС, которая необходима для повышения безопасности полетов и эффективности работы, повышения уровня контроля оператора за полетом и уменьшения количества несчастных случаев из-за несогласованных действий экипажа. Полагаем, что учебная программа по человеческому фактору должна состоять из четырех частей. Во-первых, пилот/оператор БВС должен изучить основные положения дисциплины о человеческом факторе: ограничения при взаимодействии членов экипажа в когнитивных процессах, таких как зрение, слух, осведомленность о ситуации, принятие решений,

²²Drone incident management at aerodromes. Part I: The challenge of unauthorised drones in the surroundings of aerodromes [Электронный ресурс] // icao.int. URL: <https://www.icao.int/safety/UA/Pages/EASA---Drone-Incident-Management-at-Aerodromes.aspx> (дата обращения: 27.07.2022).

внимание и рабочая нагрузка. Во-вторых, с точки зрения проектирования и эксплуатации БВС (БАС) инструктор должен ознакомить пилота/оператора с эргономическими факторами, влияющими на работу БВС (БАС), такими как человеко-машинный интерфейс, система управления, система отображения и внутренняя среда в НПУП. В-третьих, объединив концепцию о человеческой ошибке с отчетами о расследовании авиационных происшествий БВС (БАС), инструктор совместно с пилотом проанализирует, как человеческая ошибка влияет на безопасность полетов, и предложит рекомендации для предотвращения человеческих ошибок. Четвертая часть может быть посвящена анализу проблем человеческого фактора, которые могут повлиять на безопасность полетов и эффективность эксплуатации, таких как рабочая нагрузка, осведомленность о ситуации, распределение функций между человеком и машиной, проблемы с уровнем контроля оператора, а также предоставление соответствующих рекомендаций и обучения по наиболее распространенным кейсам. Целью программы обучения человеческому фактору пилота/оператора БВС является осознание важности человеческого фактора в эксплуатации БВС для снижения вероятности возникновения авиационных происшествий при эксплуатации БВС и повышения безопасности полетов.

Таким образом, нами предложены основные методы и содержание обучения, а также подробно рассмотрены содержание таких дисциплин, как человеческий фактор и психологическое здоровье при эксплуатации БВС (БАС). По мере развития и внедрения технологий БАС и повышения автоматизации определение и ответственность пилота/оператора БАС также потребуют внесения изменений, что приведет к формированию новых требований к обучению пилота/оператора БАС.

Выводы

По мере развития технологий беспилотных летательных аппаратов военная и гражданская авиация будут все больше полагаться

на БВС, и профессия пилота/оператора БВС станет все более распространенной. В настоящее время уделяется все больше внимания изучению квалификационных требований и вопросам обучения пилотов/операторов БВС, что может повысить уровень безопасности полетов и способствовать ускоренной разработке и широкому применению БАС. Тенденция развития БАС заключается в том, что БАС имеет возможность перехода к выполнению полностью автоматического полета, что снизит нагрузку на пилота/оператора БАС, но повысит требования к их квалификации. Поддержание необходимого уровня квалификации и непрерывное обучение пилота/оператора БАС в связи с быстрым развитием и широким применением БАС будет играть ключевую роль в развитии авиации.

Список литературы

1. Синяткин Д.А., Божков А.Ю., Горчаков М.А. Создание многофункциональных беспилотных летательных аппаратов: пути решения проблемных вопросов // Военная мысль. 2018. № 10. С. 86–91.
2. Николаев А.Б., Лопота А.В. Современные тенденции развития роботизированных комплексов. Беспилотные летательные аппараты. СПб.: Государственный научный центр Российской Федерации «ЦНИИ робототехники и технической кибернетики», 2016. 17 с.
3. Быков А.И. К некоторым вопросам правового регулирования полетов беспилотных летательных аппаратов на территории Российской Федерации // Вестник ВГУ. Серия: Право. 2018. № 4 (35). С. 194–199.
4. Chappelle W. Personality test scores that distinguish U.S. air force remotely piloted aircraft “drone” pilot training candidates / W. Chappelle, J. Swearingen, T. Goodman, W. Thompson [Электронный ресурс] // Final Report for October 2013 to February 2014. URL: <https://cryptome.org/2014/09/drone-pilot-personality.pdf> (дата обращения: 27.07.2022).
5. Горобец В.Д., Ермаков К.С. Воздушное право. Часть 1: учеб. пособие для вузов. М.: МГТУ ГА, 2014. 276 с.

6. **Русакова Е.Р., Ермаков К.С.** Организация летной работы: учеб. пособие. М.: МГТУ ГА, 2014. 276 с.

7. **Козлов А.И., Ермаков К.С.** Производство полетов воздушных судов. Подготовка и выполнение полетов: учеб. пособие. М.: МГТУ ГА, 2014. 344 с.

8. **Зевин В.В., Тупик Г.В., Расщепкин И.А.** Опыт подготовки специалистов беспилотной авиации в Вооруженных Силах Российской Федерации // Военная мысль. 2019. № 12. С. 126–132.

9. **Lewis R.J.** Aircraft-assisted pilot suicides in the United States, 2003–2012 / R.J. Lewis, E.M. Forster, J.E. Whinnery, N.L. Webster [Электронный ресурс] // Final Report. 2014. 8 p. URL: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/data_research/research/med_humanfacs/oamtechreports/201402.pdf (дата обращения: 27.07.2022).

10. **Weed D.B.** Identification and comprehension of symbolic exit signs for small transport-category airplanes / D.B. Weed, L.N. Pas-koff, D.J. Ruppel, C.L. Corbett, G.A. McLean [Электронный ресурс] // Final Report. 2014. 16 p. URL: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/data_research/research/med_humanfacs/oamtechreports/201403.pdf (дата обращения: 27.07.2022).

11. **Великанов А.В., Тищенко А.И.** Управляем беспилотником. Система подготовки специалистов беспилотной авиации в военном ВУЗе ВКС // Вестник военного образования. 2020. № 3 (24). С. 30–35.

12. **Ищук К.Н., Великанов А.В.** Стратегия организации учебного процесса по подготовке специалистов беспилотной авиации в ВУНЦ ВВС «ВВА» // Беспилотная авиация: состояние и перспективы развития: сборник научных статей по материалам I Всероссийской НПК. Воронеж, 5–6 марта 2019 г. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2019. С. 47–51.

13. **Ларина Т.В., Кораблин И.И.** Сущность и специфика профессиональной культуры будущих военных специалистов беспилотной авиации // Мир науки, культуры, образования. 2018. № 6 (73). С. 67–69.

14. **Мещеряков С.Д.** Концепция применения беспилотных летательных аппаратов в

интересах Воздушно-космических сил // Беспилотная авиация: состояние и перспективы развития: сборник научных статей по материалам I Всероссийской НПК. Воронеж, 5–6 марта 2019 г. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2019. С. 58–61.

15. **Русакова Е.Р., Ермаков К.С.** Человеческий фактор в авиации: учеб. пособие. М.: МГТУ ГА, 2014. 361 с.

References

1. **Sinyatkin, D.A., Bozhkov, A.Yu. & Gorchakov, M.A.** (2018). *Creation of multi-functional unmanned aerial vehicles: ways to solve problematic issues*. Voennaya mysl', no. 10, pp. 86–91. (in Russian)

2. **Nikolaev, A.B. & Lopota, A.V.** (2016). [Modern trends in the development of robotic systems. Unmanned aerial vehicles]. St. Petersburg: Gosudarstvennyy nauchnyy tsentr Rossiyskoy Federatsii TSNIi robototekhniki i tekhnicheskoy kibernetiki, 17 p. (in Russian)

3. **Bykov, A.I.** (2018). *To some questions of legal regulation of flights of unmanned aerial vehicles on the territory of the russian federation*. Proceedings of Voronezh State University. Series: Pravo, no. 4 (35), pp. 194–199. (in Russian)

4. **Chappelle, W., Swearengen, J., Goodman, T. & Thompson, W.** (2014). *Personality test scores that distinguish U.S. air force remotely piloted aircraft “drone” pilot training candidates*. Final Report for October 2013 to February 2014. Available at: <https://cryptome.org/2014/09/drone-pilot-personality.pdf> (accessed: 27.07.2022).

5. **Gorobets, V.D. & Ermakov, K.S.** (2014). [Air law. Part 1: Tutorial for Universities]. Moscow: MGTU GA, 276 p. (in Russian)

6. **Russakova, E.R. & Ermakov, K.S.** (2014). [Organization of flight work: Tutorial for Universities]. Moscow: MGTU GA, 276 p. (in Russian)

7. **Kozlov, A.I. & Ermakov, K.S.** [Aircraft flight operations. Preparation and performance of flights: Tutorial for Universities]. Moscow: MGTU GA, 344 p. (in Russian)

8. Zevin, V.V., Tupik, G.V. & Raschepkin, I.A. (2019). *The practice of training UAV specialists in the armed forces of the Russian Federation*. Voennaya mysl', no. 12, pp. 126–132. (in Russian)
9. Lewis, R.J., Forster, E.M., Whinnery, J.E. & Webster, N.L. (2014). *Aircraft-assisted pilot suicides in the United States, 2003–2012*. Final Report, 8 p. Available at: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/data_research/research/med_humanfacs/oamtechreports/201402.pdf (accessed: 27.07.2022).
10. Weed, D.B., Paskoff, L.N., Ruppel, D.J., Corbett, C.L. & McLean, G.A. (2014). *Identification and comprehension of symbolic exit signs for small transport-category airplanes*. Final Report, 16 p. Available at: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/data_research/research/med_humanfacs/oamtechreports/201403.pdf (accessed: 27.07.2022).
11. Velikanov, A.V. & Tishchenko, A.I. (2020). *The system of training drone system for training specialists in unmanned aviation in the military high school VKS*. Bulletin of the Military Education, no. 3 (24), pp. 30–35. (in Russian)
12. Ischuk, K.N. & Velikanov, A.V. (2019). [Strategy for the organization of the educational process for the training of unmanned aviation specialists in the VUNC of the Air Force “VVA”]. *Bespilotnaya aviatsiya: sostoyaniye i perspektivy razvitiya: sbornik nauchnykh statey po materialam I Vserossiyskoy NPK*. Voronezh: VUNTS VVS «VVA», pp. 47–51. (in Russian)
13. Larina, T.V. & Korablin, I.I. (2018). *Basics and specifics of professional culture of future military specialists of unmanned aerial vehicles*. Mir Nauki, Kultury, Obrazovaniya, no. 6 (73), pp. 67–69. (in Russian)
14. Meshcheryakov, S.D. (2019). [Concept of the use of unmanned aerial vehicles in the interests of the Aerospace Forces]. *Bespilotnaya aviatsiya: sostoyaniye i perspektivy razvitiya: sbornik nauchnykh statey po materialam I Vserossiyskoy NPK*. Voronezh: VUNTS VVS «VVA», pp. 58–61. (in Russian)
15. Russakova, E.R. & Ermakov, K.S. (2014). [The human factor in aviation: Tutorial for Universities]. Moscow: MGTU GA, 361 p. (in Russian)

Сведения об авторе

Ермаков Константин Сергеевич, начальник учебно-тренажерного центра «Технопарк беспилотных авиационных систем» МГТУ ГА, k.ermakov@mstuca.aero.

Information about the author

Konstantin S. Ermakov, The Head of the Training and Simulation Center “Technopark of Unmanned Aircraft Systems”, Moscow State Technical University of Civil Aviation, k.ermakov@mstuca.aero.

Поступила в редакцию 21.07.2022
Принята в печать 26.01.2023

Received 21.07.2022
Accepted for publication 26.01.2023

УДК 351.814.3

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-49-57

Исследование технологии взаимодействия службы обслуживания воздушного движения и орнитологической службы

**В.Н. Нечаев¹, М.В. Кулаков¹, Г.А. Гаспарян¹,
Я.В. Гончаренко¹, К.А. Баталов¹**

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

Аннотация: В данной статье проанализирована технология взаимодействия службы обслуживания воздушного движения (ОВД) и орнитологической службы (ОС). В рамках анализа были рассмотрены процедуры превентивных мер по предотвращению столкновений воздушных судов (ВС) с птицами между диспетчерами управления воздушным движением (УВД) и специалистами ОС. Рассмотрены процесс руления воздушного судна к взлетно-посадочной полосе (ВПП) и процесс взлета воздушного судна. Для отдельно взятых рейсов определены их задержки. Построены блок-схемы и сетевые технологические графики взаимодействия службы ОВД и ОС. Непосредственное управление воздушным движением в рамках данной работы осуществляют диспетчеры диспетчерского пункта руления (ДПР) и стартового диспетчерского пункта (СДП). Также в работе задействованы руководитель полетов (РП), специалист аэродромно-технической службы (АТС) и специалист ОС. Технология взаимодействия службы ОВД и ОС оценивается по эффективности и безопасности полетов. В качестве показателя эффективности в данном исследовании принята величина, равная отношению предполагаемого времени к реальному времени обеспечения отправления ВС. Время движения, заявленное в плане полета, различается в зависимости от аэродрома, ВПП, рулежной дорожки (РД), типа ВС и многих других факторов. Поэтому для определения предполагаемого времени обеспечения полета ВС были использованы статистические данные, показывающие время полета ВС без воздействия внешних факторов. Изучение технологии взаимодействия службы ОВД и ОС производилось в течение 12 месяцев. Массив исследования получен из суточных планов полетов аэропорта Жуковский – номер рейса, тип ВС, время взлета, посадки, прохождение воздушным судном различных этапов движения по аэродрому.

Ключевые слова: орнитология, обслуживание воздушного движения, воздушное судно, аэродром, пропускная способность, птицы.

Для цитирования: Нечаев В.Н. Исследование технологии взаимодействия службы обслуживания воздушного движения и орнитологической службы / В.Н. Нечаев, М.В. Кулаков, Г.А. Гаспарян, Я.В. Гончаренко, К.А. Баталов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 1. С. 49–57. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-49-57

Investigation of the technology of the cooperation between the air traffic control and the ornithological service

**V.N. Nechaev¹, M.V. Kulakov¹, G.A. Gasparyan¹,
Y.V. Goncharenko¹, K.A. Batalov¹**

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

Abstract: This article analyzes the technology of cooperation between the air traffic control (ATC) and the ornithological service (OS). As part of the analysis, the procedures of preventive measures for air traffic controllers (ATC) and OS specialists to avert bird strikes were considered. The phases of aircraft (AC) taxiing to a runway (RW) and takeoff were considered. For individual flights, delays were determined. Flow charts and network technological charts of the ATC-OS cooperation were built. The direct air traffic management within the framework of this article is carried out by air traffic controllers of the control

units “Ground” and “Tower”. The flight director (FD), ground personnel and the OS specialist are also involved in the work. The technology of the ATC-OS cooperation is evaluated in terms of efficiency and flight safety. As an indicator of efficiency in this study, a value equal to the ratio of the expected time to the real time of AC departure was adopted. The time of movement, denoted in the flight plan, varies depending on an aerodrome, RW, TW, AC type and many other factors. Therefore, to determine the expected time of AC flight support, statistical data, indicating the AC flight time without the impact of external factors, were used. The study of the technology for the ATC-OS cooperation was carried out for 12 months. The research array was obtained from the daily flight plans of Zhukovsky airport – flight number, AC type, takeoff-landing time, various aircraft ground maneuvers at an airfield.

Key words: ornithology, air traffic service, aircraft, airfield, capacity, birds.

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

Введение

Совершенство технологии взаимодействия службы обслуживания воздушного движения (ОВД) с орнитологической службой (ОС) определяет уровень, на котором функционирует весь аэродром в целом [1]. Возможность обеспечить высокую пропускную способность зависит от действий всех элементов системы организации воздушного движения (ОрВД).

Взаимопонимание между дежурным орнитологом с одной стороны и диспетчером УВД с другой исключает опасные для полетов ситуации, возникающие в условиях недопонимания или неправильного толкования указаний и команд. Эффективное руководство начальниками служб аэродрома своими подчиненными возможно только при наличии у них актуальной информации, полученной от других служб. Подчиненные наземных служб аэродрома в свою очередь обеспечивают функционирование аэродрома на должном уровне только при отвечающей реальности технологии взаимодействия между ними и вышестоящими органами [2, 3].

Взаимодействие службы ОВД и орнитологической службы

Важный фактор, влияющий на безопасность полетов, – орнитологическая угроза. ОС аэродрома занимается изучением этого влияния. К сожалению, в большинстве слу-

чаев птицы гнездятся на территории летного поля аэродрома. Для этого есть ряд закономерных причин [4, 5]:

- широкая открытая территория отлично подходит для обустройства гнезд камешкам, полевым жаворонкам, куликам, трясогузкам и другим птицам небольших размеров, так как дикие хищные животные на аэродромах встречаются редко;
- территория аэродрома – это привлекательное место для охоты хищных птиц. Они охотятся на млекопитающих из отрядов грызунов и землеройковых, насекомых и мелких птиц. На каждом аэродроме обитает сразу несколько хищных птиц. Это могут быть совы, лунь, чеглоки, дербenniки. Кроме того, аэродром постоянно посещают орланы-белохвосты, коршуны и канюки. В теплое время года ВПП прогревается солнцем, что создает восходящие потоки теплого воздуха. Хищники используют их для парения над ВПП;
- в весенне-осенний период наступает сезон миграции птиц. Через воздушное пространство аэродрома проходят пути их перелетов, а это значит, что птицы не найдут более подходящего места для отдыха, чем огромная, свободная от диких зверей и наполненная едой территория. Птицы семейств утиных, журавлей, фазановых и чайковых могут отдыхать на летном поле 2–4 дня;
- пропитание. Воздушное судно, выполнив взлет или посадку, оставляет после себя большое количество сбитых насекомых.

Насекомые – ежедневный рацион для многих видов пернатых.

С целью минимизации риска столкновения ВС с птицами на аэродромах применяются следующие процедуры:

- биоакустические установки. Заранее записанные звуки напуганных птиц, крики хищников воспроизводятся через звуковую колонку;
- акустические установки. Принцип работы схож с биоакустическими установками. Установки имитируют звуки выстрелов;
- газовые пушки. Воздействие пушек более эффективно, так как они производят очень громкий и резкий звук. Как правило, устанавливаются на удалении сбоку от торцов и центра ВПП;
- воздушные змеи, напоминающие хищников, не решают проблему орнитологической угрозы в целом, но отгоняют птиц на безопасное расстояние;
- ястребы-тетеревятники. Обученные ловчие птицы состоят на орнитологической службе и охотятся на остальных птиц. Этот способ доказал свою эффективность, т. к. в этом случае у птиц не вырабатывается привыкание;
- непосредственно перед взлетом/посадкой ВС аэродромная служба или орнитолог могут спугнуть птиц посредством выстрела из ракетницы. В этом случае птицы ненадолго взлетят с ВПП или с курса взлета/посадки.

Необходимо отметить, что птицы, постоянно проживающие на аэродроме, к звукам, воспроизводимым биоакустическими и акустическими установками, привыкают и на них практически не реагируют, как и не боятся воздушных змеев, напоминающих хищников. Вместе с тем рассмотрим последнюю из процедур, перечисленных выше, поподробнее.

Орнитологическая угроза ВС может быть уменьшена путем постоянного совершенствования технологии взаимодействия органов ОВД и ОС аэродрома. Существующая на сегодняшний день технология взаи-

модействия не отвечает политике международной организации гражданской авиации (ИКАО) в части Системы управления безопасностью полетов (СУБП). Данное положение дел образовалось вследствие ряда причин.

1. ОС как отдельный самостоятельный элемент системы ОрВД организована неудовлетворительно. На территории 80 % аэродромов РФ функции орнитолога исполняет работник аэродромной службы. Диспетчер УВД визуально или по докладу КВС обнаруживает птиц на ВПП, по радию вызывает машину АТС для осмотра ВПП и отпугивания птиц (рис. 1). Диспетчер УВД не имеет возможности отчетливо наблюдать каждую птицу по всей длине ВПП. Водитель автомобиля АТС отпугивает птиц с помощью ракетницы или путем применения звукового сигнала автомобиля. И тем не менее после того как автомобиль АТС освобождает ВПП, птицы могут вернуться на свои места. И только после устранения препятствий принимает решение о продолжении полетов. ДПР сообщает РП об устранении птиц с ВПП, о чем РП делает соответствующую запись в журнале учета состояния летного поля. На рис. 2 показан алгоритм действий органов ОВД.

Таким образом, диспетчер не видит всех птиц, работник АТС не обеспечивает полностью свободную от птиц ВПП, а ОС в этой схеме носит формальный характер.

2. На территории 20 % аэродромов РФ ОС работает как отдельный элемент, но осуществляет свою функцию по запросу органа УВД. Диспетчер УВД обнаружил птиц – вызвал орнитолога. Обнаружил заблаговременно – орнитолог успеет сделать свою работу. Обнаружил поздно – времени для выезда орнитолога недостаточно, и диспетчеру остается только проинформировать экипаж ВС об опасности столкновения с птицами в районе взлета/посадки и на ВПП [6–8]. Отсутствует превентивный способ работы.

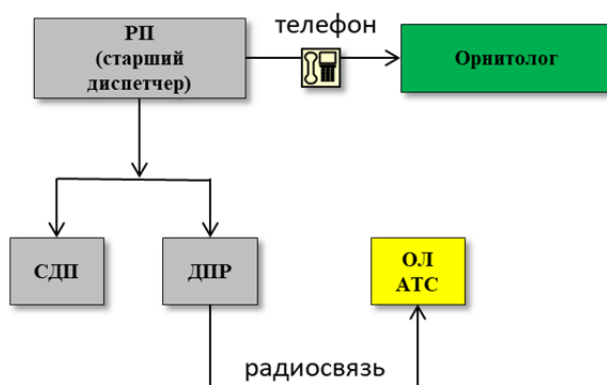


Рис. 1. Блок-схема взаимодействия органов ОВД и ОС при обнаружении птиц на ВПП
Fig. 1. Flow chart of the cooperation between the ATC and OS authorities when birds are detected on the RW



Рис. 2. Алгоритм действий органов ОВД и ОС при обнаружении птиц на ВПП
Fig. 2. Algorithm of actions for the ATC and OS authorities in case of bird detection on the RW

3. Перед каждой сменой РП и диспетчеры УВД получают доклады от АТС о готовности аэродрома к полетам, от метеорологической службы о погоде на предстоящую смену, от службы эксплуатации радиотехнического оборудования и связи о готовности оборудования и любые особенности от всех служб обеспечения полетов. Как правило, от ОС нет доклада. Служба УВД не в полной мере получает информацию об активизации мигрирующих птиц, направлении их перелетов касательно ВПП и РД, скопления чаек в торцах ВПП (лишь в некоторых случаях эта информация поступает от метеорологической службы), применяемых

способах по их отпугиванию и о планируемых орнитологами работах на аэродроме [9, 10].

Материалы и методы

В настоящей работе технология взаимодействия органов ОВД и ОС оценивается по эффективности и безопасности полетов ВС [11, 12].

В данном исследовании в качестве показателя эффективности принята величина, равная отношению предполагаемого времени к реальному времени обеспечения от-

правления ВС. Эффективность движения ВС выражается формулой

$$E = \left(\frac{T_{\text{обесп}} - \sum_{n=1}^N (x_n)}{t_{\text{взл}} - t_{\text{у.к.}}} \right) \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $T_{\text{обесп}}$ – фактическое время обеспечения движения ВС;

$\sum_{n=1}^N (x_n)$ – время задержки ВС;

$t_{\text{взл}}$ – время взлета ВС;

$t_{\text{у.к.}}$ – время убора колодок ВС.

Максимальная эффективность технологии взаимодействия служб ОВД и ОС будет при обеспечении движения ВС согласно поданному плану его полета, т. е. когда $T_{\text{обесп}} = t_{\text{пред}}$.

Аэродром представляется как модель, в которой нам известны $t_{\text{у.к.}}$, $t_{\text{взл}}$ и $T_{\text{обесп}}$ (рис. 3).

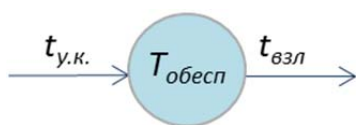


Рис. 3. Процесс отправления ВС
Fig. 3. Aircraft departure process

Время обеспечения отправления ВС выражено формулой

$$T_{\text{обесп}} = t_{\text{взл}} - t_{\text{у.к.}} \quad (2)$$

В общем случае $T_{\text{обесп}}$ можно представить как

$$T_{\text{обесп}} = t_{\text{пред}} + t_{\text{зад}}, \quad (3)$$

где $t_{\text{зад}}$ – время задержки взлета ВС;

$t_{\text{пред}}$ – предполагаемое время движения ВС (движение ВС без задерживающих факторов).

Время движения, заявленное в плане полета, будет различаться в зависимости от аэродрома, ВПП, РД, типа ВС. Поэтому для определения предполагаемого времени обеспечения движения ВС $t_{\text{пред}}$ были использованы статистические данные, показывающие время движения ВС без воздействия внешних факторов.

Время задержки ВС зависит от многих случайных факторов и выражено формулой

$$t_{\text{зад}} = \sum_{n=1}^N (x_n), \quad (4)$$

где x_n – различные задержки движения ВС, выраженные во времени и оказывающие влияние на время движения ВС $T_{\text{обесп}}$ (причинами задержек могут быть птицы на ВПП, ВПП занята ОС и т. д.).

При отсутствии факторов, создающих задержку, время обеспечения движения ВС равно предполагаемому, а показатель эффективности движения ВС равен 100 %:

$$T_{\text{обесп}} = t_{\text{пред}}, \text{ при } x_1; x_2; x_n = 0. \quad (5)$$

В процессе исследования был проведен сбор статистической информации по затраченному времени органами ОВД и ОС ($t_{\text{пред}}$, $T_{\text{обесп}}$, $t_{\text{зад}}$). С помощью собранной информации были определены эффективность взаимодействия органов ОВД и ОС E и события, влияющие на появление задержки (x_n). Выборка исследования составила 12 месяцев.

Результаты

Для оценки эффективности взаимодействия органов ОВД и ОС при вылете ВС были произведены хронометрические исследования ситуаций, связанных с орнитологической опасностью для ВС.

Для рейса SVR2426, имеющего максимальную $t_{\text{зад}}$, были построены таблица параметров технологического графика (табл. 1) и сетевой график (рис. 4). Исследовались восемь различных работ по взаимодействию органов ОВД и ОС. Перечень исследуемых работ показан в табл. 1. Данные получены в процессе выполнения полетов на аэродроме Раменское.

Время задержки ВС равно (сумма временных отрезков, нарушивших стандартную технологию взаимодействия)

$$t_{\text{зад}} = \sum_{n=1}^N (x_n) = (x_1 + x_2) = 7 \text{ мин } 50 \text{ с},$$

Таблица 1
Table 1

Параметры технологического графика взаимодействия органов ОВД и ОС
Parameters of the network technological chart of the cooperation between the ATC and OS authorities

Наименование работы	Событие		Продолжительность, мин, с
	нач.	кон.	
Руление ВС на ИС	0	1	3 мин 10 с
Доклад ЭВС о птицах	1	2	10 с
Связь СДП и ДПР	2	3	10 с
Связь ДПР и АТС	3	4	10 с
Выезд АТС на ВПП	4	5	2 мин
Устранение препятствий	5	6	5 мин 50 с
Освобождение ВПП	6	7	15 с
Связь ДПР и СДП	7	8	15 с
Доклад ЭВС о свободной ВПП	8	9	10 с

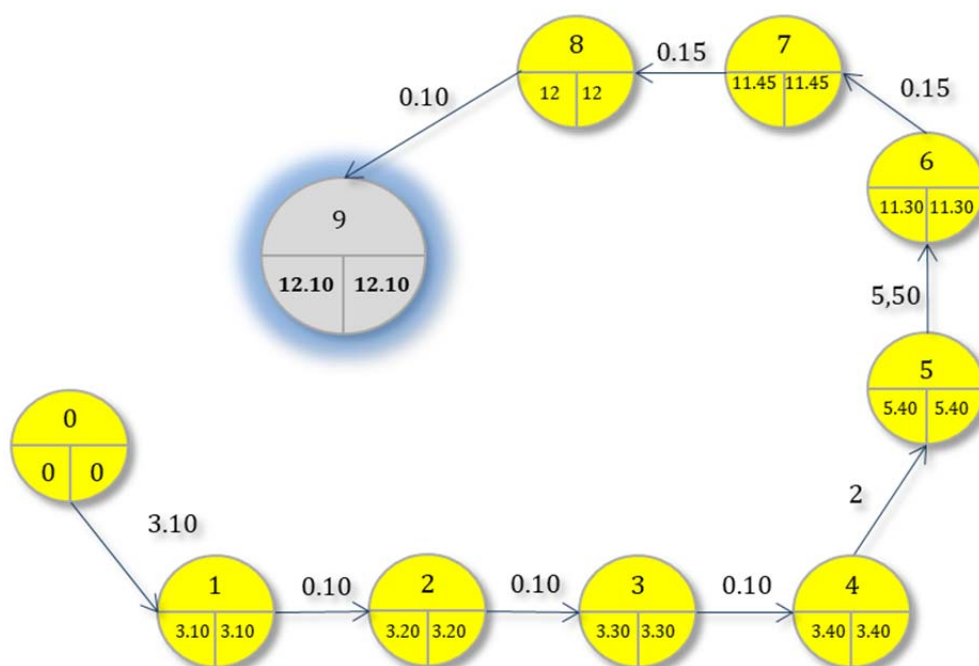


Рис. 4. Сетевой технологический график взаимодействия органов ОВД и ОС
Fig. 4. Flow chart of the cooperation between the ATC and OS authorities

где x_1 – 2 мин (затяжной (долгий) выезд машины АТС);

x_2 – 5 мин 50 с (длительный осмотр ВПП).

Время обеспечения отправления ВС равно

$$T_{\text{обесп}} = t_{\text{взл}} - t_{\text{у.к.}} = 12 \text{ мин } 10 \text{ с.}$$

Предполагаемое (планируемое) время вылета ВС определяется по формуле

$$t_{\text{пред}} = T_{\text{обесп}} - t_{\text{зад}} = 4 \text{ мин } 20 \text{ с.}$$

Таблица 2
Table 2

Факторы, влияющие на эффективность взаимодействия органов ОВД и ОС
Factors influencing the efficiency of the cooperation between the ATC and OS authorities

Обозначение	Название
x_1	длительный выезд машины АТС
x_2	длительный осмотр ВПП

Эффективность взаимодействия:

$$E = \left(\frac{t_{\text{обесп}} - \sum_{n=1}^N (x_n)}{t_{\text{окон}} - t_{\text{нач}}} \right) \cdot 100 \% = 35,6 \%$$

Полученное значение E является неудовлетворительным, т. к. в технологии взаимодействия органов ОВД и ОС присутствуют факторы, снижающие E . Не выполняется требование $T_{\text{обесп}} = t_{\text{пред}}$, при котором $E = 100 \%$ (1).

В табл. 2 представлены основные факторы, выявленные в процессе исследования технологии взаимодействия органов ОВД и ОС и негативно влияющие на ее эффективность.

Заключение

Выполнено исследование технологии взаимодействия службы ОВД и ОС при отправлении ВС.

В процессе исследования рейса SVR2426 было определено, что критический путь обеспечения отправления ВС составляет 12 мин 10 с. Задержка разрешения на взлет составляет 7 мин 50 с. Эффективность взаимодействия службы ОВД и ОС составила $E = 35,6 \%$.

Исследование показало, что существующая технология взаимодействия службы ОВД и ОС имеет ряд существенных недостатков, влияющих на пропускную способность аэродрома, расход топлива ВС, а также на безопасность полетов. Низкая эффективность обусловлена отсутствием превентивных мер работы ОС с орнитологической угрозой и отсутствием орнитолога в алго-

ритме действий органов ОВД и АТС. Появление птиц на аэродроме легко отследить. Как правило, птицы или живут на аэродроме и улетают за пропитанием в другую часть региона, или проживают за территорией аэродрома, находят пропитание также за территорией, но пути следования проходят через ВПП [13]. С аэродромной диспетчерской вышки открывается хороший обзор на все летное поле и прилегающие территории. Органы ОВД имеют возможность передавать ОС информацию о частых скоплениях птиц в определенных местах. Взаимодействие орнитологической и диспетчерской служб поможет заблаговременно исключить причины появления птиц в зоне взлета и посадки [14].

Технологию взаимодействия органов ОВД и ОС необходимо совершенствовать в плане большей взаимной информативности и согласованности. Находясь в постоянном рабочем контакте, диспетчеры и орнитологи смогут минимизировать риски событий, указанных в табл. 2, до приемлемого уровня.

Список литературы

1. Кулаков М.В. Исследование технологии взаимодействия органов обслуживания воздушного движения // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2021. № 36. С. 29–38.
2. Kuznetsova N.B. Transmission of information and communication as a human factor crucial in aircraft maintenance // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2017. № 2. С. 240–246.
3. Степнова А.И. Анализ эффективности программы совместной тренажерной

подготовки авиадиспетчеров и пилотов / А.И. Степнова, С.М. Степанов, В.В. Борсоева, В.А. Борсоев // Научный Вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22, № 5. С. 32–42. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-5-32-42

4. **Козлов А.С.** Человеческий фактор и система обеспечения безопасности полетов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 182. С. 84–88.

5. **Шумилов И.С.** Авиационные происшествия. Причины возникновения и возможности предотвращения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 328 с.

6. **Плотников Н.И.** Ресурсы пилота. Надежность: монография. Новосибирск: ЗАО ИПЦ «АвиаМенеджер», 2013. 264 с.

7. **Борисов В.Е.** Определение вероятности безошибочной работы диспетчера / В.Е. Борисов, В.В. Борсоев, С.М. Степанов, А.И. Степнова // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 3. С. 47–55. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-47-55

8. **Борсоев В.А.** Принятие решения в задачах управления воздушным движением. Методы и алгоритмы / В.А. Борсоев, Г.Н. Лебедев, В.Б. Малыгин, Е.Е. Нечаев, А.О. Никулин, Тин Пхон Чжо; под ред. Е.Е. Нечаева. М.: Радиотехника, 2018. 432 с.

9. **Анодина Т.Г., Кузнецов А.А., Маркович Е.Д.** Автоматизация управления воздушным движением: учебник для вузов / Под ред. А.А. Кузнецова. М.: Транспорт, 1992. 279 с.

10. **Зубков Б.В., Рыбалкин В.В.** Человеческий фактор и безопасность полетов: учеб. пособие. М.: МГТУ ГА, 1994. 68 с.

11. **Лебедев А.М.** Метод расчета ожидаемого предотвращенного ущерба от авиационных происшествий: монография. Ульяновск: УВАУ ГА, 2007. 155 с.

12. **Кузьмина Н.М., Ридли М.К.** Об автоматическом построении в информационных системах гражданской авиации онтологий предметной области по корпусу текстов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2018. № 21. С. 122–131.

13. **Далецкий С.С., Далецкий С.В., Плешаков А.И.** Терминологическое обеспечение технической эксплуатации гражд-

данской авиационной техники // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2016. № 15. С. 40–47.

14. **Кошкин Р.П.** Математические модели процессов создания и функционирования поисково-аналитических информационных систем гражданской авиации // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2014. № 5. С. 39–48.

References

1. **Kulakov, M.V.** (2021). *Research of technology of interaction between the air traffic controllers*. Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA), no. 36, pp. 29–38. (in Russian)

2. **Kuznetsova, N.B.** (2017). *Transmission of information and communication as a human factor crucial in aircraft maintenance*. Crede Experto: Transport, Society, Education, Language, no. 2, pp. 240–246.

3. **Stepnova, A.I., Stepanov, S.M., Borsoeva, V.V. & Borsoev, V.A.** (2019). *Analysis of effectiveness of the program of joined air traffic controllers and pilots training*. Civil Aviation High Technologies, vol. 22, no. 5, pp. 32–42. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-5-32-42 (in Russian)

4. **Kozlov, A.S.** (2012). *The human factor like the main element in system of safety of flight*. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, no. 182, pp. 84–88. (in Russian)

5. **Shumilov, I.S.** (2006). [Aviation accidents. Causes and possibilities for prevention]. Moscow: Izdatelstvo MGTU im. N.E. Bauman, 328 p. (in Russian)

6. **Plotnikov, N.I.** (2013). [Resources of a pilot. Reliability: Monography]. Novosibirsk: ZAO IPTS «AviaMenedzher», 264 p. (in Russian)

7. **Borisov, V.E., Borsoeva, V.V., Stepanov, S.M. & Stepnova, A.I.** (2018). *The probability determination of error-free air traffic controller operation*. Civil Aviation High Technologies, vol. 21, no. 3, pp. 47–55. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-47-55 (in Russian)

8. **Borsoev, V.A., Lebedev, G.N., Malygin, V.B., Nechayev, Ye.Ye., Nikulin, A.O. & Tin Pkhon Chzho.** (2018). [Deci-

sion making in tasks of the air traffic control. Methods and algorithms], in Nechaev Ye.Ye. (Ed.). Moscow: Radiotekhnika, 432 p. (in Russian)

9. **Anodina, T.G., Kuznetsov, A.A. & Markovich, E.D.** (1992). [*Automation of air traffic control*], in Kuznetsov A.A. (Ed.). Moscow: Transport, 280 p. (in Russian)

10. **Zubkov, B.V. & Ribalkin, V.V.** (1994). [*Human factor and flight safety: Tutorial*]. Moscow: MGTU GA, 68 p. (in Russian)

11. **Lebedev, A.M.** (2007). [*The method of calculating the expected avoided damage from the accident: Monography*]. Ulyanovsk: UVAU GA, 155 p. (in Russian)

12. **Kuzmina, N.M. & Ridley, M.K.** (2018). *About automatic construction in information systems of civil aviation ontology of the*

subject field on the corps of texts. Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA), no. 21, pp. 122–131. (in Russian)

13. **Daletskiy, S.S., Daletskiy, S.V. & Pleshakov, A.I.** (2016). *Terminological providing technical operating civil aviation*. Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA), no. 15, pp. 40–47. (in Russian)

14. **Koshkin, R.P.** (2014). *The mathematical models of the processes with establishment and operation of search and analytical information systems in the field of civil aviation*. Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA), no. 5, pp. 39–48. (in Russian)

Сведения об авторах

Нечаев Владимир Николаевич, кандидат исторических наук, доцент, заведующий кафедрой управления воздушным движением МГТУ ГА, v.nechaev@mstuca.aero.

Кулаков Михаил Викторович, инструктор УТЦ МГТУ ГА, mihail-sev@mail.ru.

Гаспарян Григорий Арменович, аспирант МГТУ ГА, grigory.rw@gmail.com.

Гончаренко Яна Викторовна, аспирант МГТУ ГА, goncharenko.ya.v@yandex.ru.

Баталов Кирилл Александрович, аспирант МГТУ ГА, kirbatalov@mail.ru.

Information about the authors

Vladimir N. Nechaev, Candidate of Historical Sciences, The Head of the Air Traffic Management Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, v.nechaev@mstuca.aero.

Mikhail V. Kulakov, Instructor of the Simulation Training Centre, Moscow State Technical University of Civil Aviation, mihail-sev@mail.ru.

Grigory A. Gasparyan, Post Graduate Student, Moscow State Technical University of Civil Aviation, grigory.rw@gmail.com.

Yana V. Goncharenko, Post Graduate Student, Moscow State Technical University of Civil Aviation, goncharenko.ya.v@yandex.ru.

Kirill A. Batalov, Post Graduate Student, Moscow State Technical University of Civil Aviation, kirbatalov@mail.ru.

Поступила в редакцию 01.07.2022
Принята в печать 26.01.2023

Received 01.07.2022
Accepted for publication 26.01.2023

УДК 629.735.33:004.021

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-58-71

On the use of fuzzy neural networks in the framework of a risk-based approach in control and supervisory activities in civil aviation

R.A. Obratsov¹, V.D. Sharov²

¹*Central Interregional Territorial Administration Office of Air Transport of Central Regions of the Federal Air Transport Agency, Ministry of Transport of the Russian Federation, Moscow, Russia*

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

Abstract: A risk-oriented approach implemented in conducting control and supervisory activities in Civil Aviation organizations makes it possible to increase the effectiveness of such activities, the objectivity of assessments, to reduce costs and the additional burden on business. The main provisions, regulating the activities of control and supervision bodies, including the issues of risk assessment, are generally specified in regulatory documents. However, uncertainty remains regarding the use of so-called risk indicators, which are designed to forecast risks for flight safety. Currently, there are no guidelines on the number and composition of such indicators, there are no methods to use them for the intended purpose. The article proposes a solution to this problem using elements of artificial intelligence. Based on the example of risk indicators distinctive for air traffic service organizations, the feasibility of forecasting the level of risk through a fuzzy (hybrid) neural network is shown. As is well known, such hybrid structures, combining neural networks and fuzzy logic, collect the best properties of both methods. The formation of a set of risk indicators and initial data for network training is carried out with the involvement of qualified experts with extensive experience in flight safety management and control and supervisory activities. The trained network allows us to quantify a forecasted level of risk in an airline based on the identified risk indicators considering the degree of their manifestation. All the stages of building and using the network in the ANFIS editor of the MATLAB software package are shown. The proposed method can also be used in the flight safety management systems for various providers of aviation services.

Key words: safety risk, air traffic service, risk-oriented approach, risk indicator, fuzzy neural network.

For citation: Obratsov, R.A. & Sharov, V.D. (2023). On the use of fuzzy neural networks in the framework of a risk-based approach in control and supervisory activities in civil aviation. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 1, pp. 58–71. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-58-71

О применении нечетких нейронных сетей в рамках рискориентированного подхода к контрольно-надзорной деятельности в гражданской авиации

Р.А. Образцов¹, В.Д. Шаров²

¹*Центральное межрегиональное территориальное управление воздушного транспорта Центральных районов Федерального агентства воздушного транспорта. Министерство транспорта Российской Федерации, г. Москва, Россия*

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

Аннотация: Рискориентированный подход, реализуемый при проведении контрольно-надзорных мероприятий в организациях гражданской авиации, позволяет повысить эффективность таких мероприятий, объективность оценок, снизить расходы и дополнительную нагрузку на бизнес. Основные положения, регулирующие деятельность органов контроля и надзора, в том числе и в вопросах оценки рисков, в целом указаны в нормативных документах. Однако остается неопределенность в части использования так называемых индикаторов риска, которые предназначены для

прогнозирования рисков для безопасности полетов. В настоящее время нет каких-либо указаний по количеству и составу таких индикаторов, отсутствуют методики их использования по назначению. В статье предлагается решение этого вопроса с использованием элементов искусственного интеллекта. На примере индикаторов риска, характерных для организаций обслуживания воздушного движения, показана возможность прогнозировать уровень риска посредством нечеткой (гибридной) нейронной сети. Как известно, такие гибридные структуры, объединяющие в себе нейронные сети и нечеткую логику, собирают наилучшие свойства обоих методов. Формирование набора индикаторов риска и исходных данных для обучения сети проводится с привлечением квалифицированных экспертов с большим опытом управления безопасностью полетов и контрольно-надзорной работы. Обученная сеть позволяет количественно оценить прогнозируемый уровень риска на авиапредприятии на основании выявленных индикаторов риска с учетом степени их проявления. Показаны все этапы построения и использования сети в редакторе ANFIS программного пакета Matlab. Предлагаемый метод может использоваться также и в системах управления безопасностью полетов различных поставщиков авиационных услуг.

Ключевые слова: риск для безопасности полетов, обслуживание воздушного движения, рискориентированный подход, индикатор риска, нечеткая нейронная сеть.

Для цитирования: Образцов Р.А., Шаров В.Д. О применении нечетких нейронных сетей в рамках рискориентированного подхода к контрольно-надзорной деятельности в гражданской авиации // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 1. С. 58–71. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-58-71

Introduction

Currently, the supervising activity is based on a risk-oriented approach which can be considered generally and properly [1, 2].

By reference to Civil Aviation (CA), its application generally assumes including the proactive management of risks into a state program (system) of flight safety. This long-term objective was delegated by the ICAO to states in the long run up to 2027¹. Mitigating operational risks was announced as a top priority in the current ICAO conception over a period of 2020–2022². This state activity is aimed at ensuring the fulfillment of the Standard from the ICAO Appendix 19³ according to critical element 8 of the National Civil Aviation Safety Program and refers to the implementation of the requirements of the Russian Federation Government Resolution № 1215⁴ (void) and later-issued Resolution

№ 642⁵ in accordance with data acquisition and processing about the hazard factors (HF) and risks associated with major providers of aviation services.

The risk-oriented approach towards the state-regulated CA activity is, in narrow sense, based on the provisions of the FL-248⁶, construing the risk management as “the implementation of preventive actions and control (supervising) activities, based on the risk assessment of the damaging event, for the purpose of ensuring the permissible level of damage risk in the respective sphere of activity” (p. 22, p. 4). The frequency, volume, and scale of actions depend on a risk category to which a specific object of central or local government oversight is attributed.

The law formulates the general recommendations with respect to identifying a risk category for various objects of oversight. Some details of the procedure with respect to the activity of the CA oversight body (State Aviation Safety Inspectorate) is encapsulated in the Russian Feder-

¹ Doc. 10004. (2014). ICAO global aviation safety. ICAO 2014–2016. ICAO, 76 p.

² Doc. 10004. (2020). ICAO global aviation safety. ICAO 2020–2022. ICAO, 162 p.

³ Flight safety management. Appendix 19 to the Convention about the International Civil Aviation. (2016). 2nd ed. ICAO, 48 p.

⁴ The Russian Federation Resolution № 1215 of 18.11.2014, 6 p. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_171133/92d969e26a4326c5d02fa79b8f9cf4994ee5633b/ (accessed: 15.08.2022).

⁵ The Russian Federation Resolution № 642 of 12.04.2022, 7 p. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_414577/92d969e26a4326c5d02fa79b8f9cf4994ee5633b/ (accessed: 15.08.2022).

⁶ The FL-248. About the Central control (oversight) and Local Government oversight in the Russian Federation. (2020). 78 p. Available at: <https://base.garant.ru/74449814/> (accessed: 15.08.2022).

ation Government Resolution № 1064⁷ of 30.06.2021. However, while conducting inspections and developing preventive actions, it is always advisable for an oversight body to have quantitative assessments (indicators) of risk.

Currently, guidelines regarding the description, composition, and the number of such indicators to make a risk forecast are not available while conducting inspections in those cases when HF have not manifested themselves yet in the form of events. It means that the “pro-activity” of risk management in the ICAO conception⁸ while conducting inspections is not sufficiently implemented. Scientifically valid methods to fulfill these forecasts are not provided as well.

It is obvious that a variety of indicators will be different for various providers of aviation services but approaches to forecast risks can be general.

For the solution to the given problem, the use of artificial intellect elements in the form of neural networks, specifically, fuzzy (hybrid) as the most relevant to the distinctive nature of solvable problems, seems perspective.

1. Basic provisions of a risk-oriented approach and their applicability to supervising and control activities in Civil Aviation

The risk-oriented approach is the technique of arranging for oversight which assumes reducing the number of state inspections of business where the risk of violations is lower. Such an approach is used for the optimal use of organization assets, reduction of entity costs and the enhancement of activity efficiency of the state regulatory authorities.

The risk-oriented approach concept originally rose to view in 2015 with the enforcement of the FL-246, Article 8.1. The list of types of government control, using the risk-oriented approach and the rules for assigning activity to

a category of risk, were formalized by Government Resolutions № 806⁹ and № 245¹⁰ in 2016–2017. Nevertheless, as [3] notes, the similar system of the risk management has been used much earlier—since 2003 in the customs and tax control. It stems from the domination of the fiscal managerial functions of the State over the specified time and from the necessity of tightening the financial discipline of regulated subjects when their activity is simultaneously boosted.

The risk-oriented approach is based on widely and long-discussed ideas of *Responsive regulation* [4–6] involved in search of the optimal ratio between the strict government control of business activity and the independent enterprise and entity performance.

The approach relies on the research results and the international practice which proved its efficiency. The article [7] provides several examples. For example, in Denmark, the control over the food market is exercised by five groups of hazards, and a normative frequency of inspections occurs twice a year. If there were not penal sanctions in the last four reports on inspections, a company is granted a top-class status, and the number of inspections reduces from five to three in the highest group of risk and from three to one in the lowest one.

The document¹¹ illustrates how the risk-oriented approach contributes to countering money laundering and corruption.

In the FL-248, Chapter 5 is dedicated to the risk-oriented approach issues. A concept is not given but it is stated that a probability of event occurrence, the consequence of which can be damage of different scale and severity to assets protected by law, is interpreted as the damage risk within the framework of the present Federal

⁷ The Russian Federation Resolution № 1064 of 21.06.2021, 20 p. Available at: <https://base.garant.ru/401423120/> (accessed: 15.08.2022).

⁸ Doc. 9859. (2018). Safety Management Manual. 4th ed. ICAO, 218 p.

⁹ The Russian Federation Resolution № 806 of 17.08.2016, 14 p. Available at: <https://base.garant.ru/71473944/> (accessed: 15.08.2022).

¹⁰ The Russian Federation Resolution № 245 of 2.03.2017, 6 p. Available at: <https://base.garant.ru/71625910/> (accessed: 15.08.2022).

¹¹ Manual of the risk-oriented approach in the supervisory activity application. FATF. Paris. Convenience translation by ANCO ITMCFM // FATF. Paris. March 2021, 124 p. Available at: https://www.fedsfm.ru/content/files/documents/fatf/2021/nadzor_web.pdf (accessed: 15.08.2022).

Law. This definition complies with a “technocratic concept of risk” [8] and the interpretation of risk for flight safety in conformity with the ICAO Standard from Appendix 19.

Six categories of risk, varying from low to exceptionally high, are established, a concept of the risk criterion as an assessing factor for the probability of negative event occurrence and its severity is defined. The determination of probability and severity criteria is carried out considering information about preceding events, caused by specified causes, as well as their observed frequency and the severity of consequences. While defining the criteria, the relevance of assessing inspectors’ fair practices, taking into consideration the accomplishment of their actions to mitigate risk, availability of control systems, providing information access, undergoing voluntary certification, and procuring agreements of insurance, is highlighted.

Under the government control, the federal body of executive authority, exercising the functions regarding the legal and regulatory framework in the stated sphere, categorizes an object in terms of risk. In CA, the State Aviation Safety Inspectorate, which has been implementing the transition for a risk-oriented model since 2017, is engaged in the activity, as the article [9] indicates. Concurrently, among others, the following summarized tasks have been posed:

- categorizing subjects of control by risk categories in accordance with the methodology approved by the Russian Federation Government Resolution № 806 of 17.08.2016;
- formulating requirements to develop a “dynamic model” of categorizing subjects of control based on statistics data and performance indices of activity for control subjects;
- developing the methodology of performance evaluation of final publicly significant results for the branches of activity under control.

It is necessary to note that the methodology of Government Resolution № 806 along with the FL-248 stipulated six categories of risk or hazard classes. Hence, special aspects of conducting supervisory activities were specified. However, later-enacted Resolution № 1064 reduced the number of risk categories up to four: high, high/medium, medium, low.

Categorizing an object is carried out depending on the combination of risk components – the probability of a negative event and its severity according to the Table of Appendix 1 of this Resolution. This Table can be easily transformed into a matrix (fig. 1) corresponding to the method of “consequences and probabilities” under GOST P-58771-2019¹², often called the “ICAO matrix” in aviation, since this method of risk management is recommended by the ICAO Safety Management Manual.

		Группа вероятности			
		1	2	3	4
Группа тяжести	А	Высокий	Значительный	Средний	Средний
	Б	Высокий	Значительный	Средний	Средний
	В	Значительный	Значительный	Средний	Средний
	Г	Средний	Средний	Низкий	Низкий

Fig. 1. Matrix of risk categories for control (oversight) of objects in CA

In addition, to take a decision concerning the type of unannounced control activity, a regulatory body establishes risk indices of violating the compulsory requirements. The indices are discrepancies or deviations from the parameters of object under control according to which we can assess a risk level. Such an approach is close to the “proactive methodology” of identifying HF in the ICAO Safety Management System.

An emphasis [9] is given to the supervising activity in the air traffic management sphere which encompasses air traffic organization and service, radio-technical support of flights and aeronautical telecommunication service, providing aeronautical and meteorological information, aerospace search and rescue in all the flight phases.

¹² GOST R 58771-2019 (ISO 3110–2019 NEQ). (2020). Risk Management. Technologies of Risk Assessment. Moscow: Standartinform, 85 p.

Table 1

Risk indicators and their characteristics

№	Indicator	Possible consequences	Regulation
1	Lack of radar control	1. Risks of collisions between A/C and A/C collisions with obstacles are increased. 2. Control of air traffic is complicated. 3. Control to follow the use of air space regulations is reduced	The Air Code of the Russian Federation regarding the control to follow the use of air space regulations. FAR №216, non-compliance with the Certificate concerning available observation facilities
2	Violation of the requirements during the probational period and personnel inspection	1. Systemic failures during the air traffic service. 2. Conducting the specific procedures with failures	The Order of the Russian Federation Ministry of Transport № 93 ¹³ of 14.04.2010 with respect to functioning the system of training, certifying, period of probation
3	Flight Safety Management does not comply with the Air Laws and Regulations requirements	Risks of information lack regarding actual or potentially hazardous situations for Flight Safety or ATM-related drawbacks are increased	FR-642 and FAR-293 concerning the analysis on a regular and systematic basis by qualified specialists and ensuring flight safety while servicing air traffic
4	Drawbacks in maintaining the performance capabilities of flight radio-engineering support and aeronautical telecommunication facilities	Partial and/or incomplete issuance of information to a controller, aeronautical telecommunication facilities and equipment failures are possible	FAR-297 concerning maintenance of objects and flight radio-engineering support and aeronautical telecommunication facilities

Within the framework of the present study by experts of territorial bodies of the Federal Air Transport Agency and the Federal Transportation Inspection Service, four risk indicators were proposed for ATM organizations which are stated in Table 1.

The use of a fuzzy neural network is proposed for developing the method of forecasting risk, provided, manifestation of the given indicators is established during an inspection.

2. Building a fuzzy neural network to forecast risks

2.1. Features of fuzzy neural networks

For solving risk-related problems, including the aviation sphere, due to a high degree of uncertainty, the applications of the fuzzy-set theory are used which is expressed in a variety of academic papers on the given subject [10–12].

However, there are problems, the basic of which, emerge due to the necessity of determin-

ing a priori components of models (membership functions (MF) of fuzzy rule base). It makes the adaptation and training of the system impossible [13].

Neural networks have training and adaptation properties and can be trained how to control an object without possessing complete data about it such as a mathematical model. They comprise a big number of interrelated elements (neurons), each of which performs signal processing which allows for immense computation power and fault tolerance. At the same time, there is no definite algorithm to compute the required amount of network layers and the number of neurons in

¹³ The Russian Federation Order of the Ministry of Transport № 93 of 14.04.2010 “About the Approval of the Procedure of functioning the continuous system of the professional training, including the issues of the certification, internship, the order of permit-to-work system, periodicity of upgrading skills of managerial and traffic control personnel”. System GARANT. 2010. 15 p. Available at: <https://base.garant.ru/199197/> (accessed: 15.08.2022).

each layer which results in designing a network intuitively. Moreover, knowledge, accumulated by a network, is distributed among all its elements which makes it difficult to present a functional dependence between the object input and output in an explicit form [14, 15].

The Adaptive Network-based Fuzzy Inference System – ANFIS was proposed by J-S. R. Jang in 1992 to combine the advantages and counterbalance the disadvantages of these two methods. The system is described in detail in his work [16]. This is an artificial neural network based on the fuzzy inference system by Sugeno.

Such hybrid structures, integrating neural networks and fuzzy logic, acquire the best properties of both methods, and at the same time, they are released from their problems. On the one hand, they activate the computation power and the capacity of neural networks for training, on the other hand, the intellectual capacity of neural networks is intensified with fuzzy rules of making solutions appropriate for a “human” manner of thought. In fuzzy neural networks, the inference is made based on the apparatus of fuzzy logic, and MF settings are configured using algorithms of the neural network training.

Let us briefly consider the features of building the network under [15–17]. It is common knowledge that in an “ordinary” network (fig. 2) input signals x_i “interface” with weights w_i , and the sum of their products p_i forms input *net* of neuron:

$$p_i = x_i w_i; \text{net} = p_1 + p_2; i = 1, 2.$$

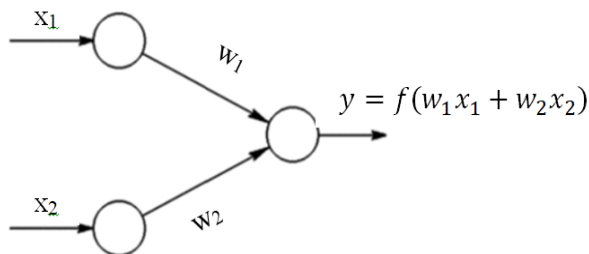


Fig. 2. The simplest single-layer neural network

The output neural signal is the transformation of input *net* with some activation function f .

$$y = f(\text{net}) = f(w_1x_1 + w_2x_2).$$

The fuzzy (hybrid) neural network is that one in which settings x , w , p are connected using not the ordinary addition and multiplication but by means of t-norm, t-co-norm¹⁴ or other continuous operations. The fuzzy neural network is usually built on a multilayer one using AND, OR neurons.

For the fuzzy neuron AND (fig. 3), signals x_i and weights w_i are combined by means of t-co-norm $p_i = S(x_i w_i)$, $i = 1, 2$. Input is formed using a t-norm:

$$y = (p_1 \cdot p_2) = T(p_1 \cdot p_2) = T(S(w_1 \cdot x_1), S(w_2 \cdot x_2)).$$

If to assign $T = \min$, $S = \max$, the fuzzy neuron AND realizes the composition min-max:

$$y = \min(w_1 \vee x_1, w_2 \vee x_2).$$

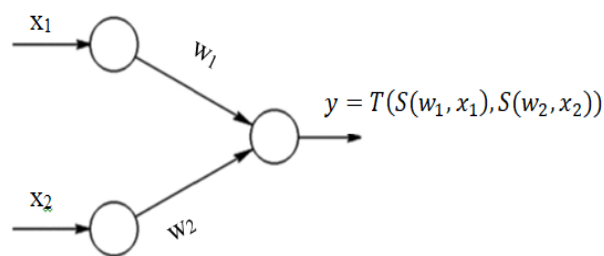


Fig. 3. The structure of the fuzzy neuron AND

In the fuzzy neuron “OR” (fig. 4), signals are also combined using t-norm $p_i = T$, $i = 1, 2$, and output is formed using t-co-norm.

$$y = (p_1 \cdot p_2) = S(p_1 \cdot p_2) = S(T(w_1 \cdot x_1), T(w_2 \cdot x_2)).$$

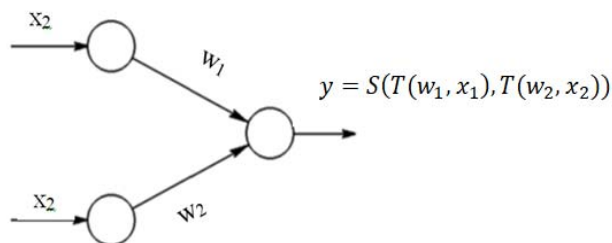


Fig. 4. The structure of the fuzzy neuron OR

¹⁴ Determination of concepts “t-norm”, and “t-co-norm”. Available at: https://science.fandom.com/ru/wiki/Т-нормы,t-ко-нормы_и_порядковые_суммы (accessed: 15.08.2022).

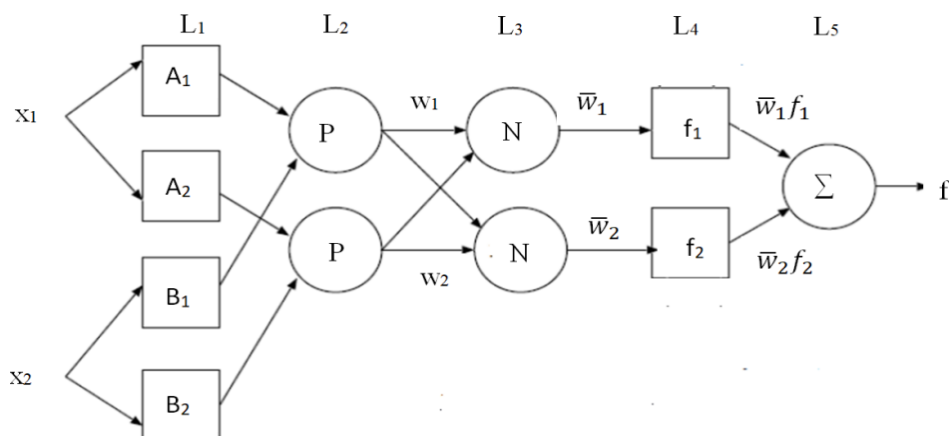


Fig. 5. Fuzzy (hybrid) neural network architecture

If to assign $T = \min$, $S = \max$, then the fuzzy neuron OR realizes the composition of max-min type.

Let us explain the network structure on the example of the system with two inputs x_1, x_2 and one output. The model of fuzzy inference by Sugeno uses the following rule:

– if x_1 is A_1 and x_2 is B_1 , we have $y = f_1 = p_1x_1 + q_1x_2 + r_1$,

– if x_1 is A_2 and x_2 is B_2 , we have $y = f_2 = p_2x_1 + q_2x_2 + r_2$.

ANFIS, realizing the given model, is presented in Figure 5.

Typically, the fuzzy network consists of five layers (L_1 – L_5). Neurons in the network have the various structure and purpose. Let us denote $V_{L,i}$ as output of i -neuron of layer L .

The neurons of the first layer calculate Membership Function (MF) of fuzzy terms:

$$V_{1,i} = \mu_{A_i}(x_1), \text{ for } i = 1, 2; V_{1,i} = \mu_{B_{i-2}}(x_2), \text{ for } i = 3, 4.$$

Each neuron of the second layer calculates the product:

$$V_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x_1) \cdot \mu_{B_i}(x_2) \text{ for } i = 1, 2.$$

Neuron output presents the rule activation level.

Layer 3 normalizes the levels of rule activation:

$$V_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2} \text{ for } i = 1, 2.$$

Layer 4 calculates the conclusion of rules:

$$V_{4,i} = \bar{w}_i f_i = w_i(p_i x_1 + q_i x_2 + r_i) \text{ for } i = 1, 2,$$

where p_i, q_i, r_i are parameters of the node.

Layer 5 calculates the result of fuzzy inference as a sum of arguments:

$$V_{5,1} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i}.$$

Layers 1 and 4 are adaptive and provide the network training, the rest of the layers are fixed.

2.2. Methodology of building ANFIS network to solve the formulated problem

The network ANFIS can be built by means of the package Matlab. The purpose is to obtain a tool of forecasting organization risk under identified signs of one or several available indicators with different severity levels of their manifestation during inspections.

In order to organize a training data set, experts were proposed to assess the probable level of organization risk with various combinations of indicators manifestation from Table 1. For this purpose, a table was drawn up, four columns of which were corresponding to indicators, in

Table 2

Fragment of the expert survey table

№	INDICATORS				Risk level
	1. Lack of radar control	2. Violation of the probation period and inspection requirements	3. Flight Safety Management does not comply with the requirements	4. Drawbacks in maintaining the condition of flight radio-engineering support, communication	
1	Yes	No	Yes	Yes	
2	No	No	Yes	Yes	
3	No	Yes	No	No	

Table 3

Fragment of a data matrix for training a neural network

INDICATORS				RISK
1	2	3	4	
1	0	1	1	4
0	0	1	1	2
0	1	0	0	2

each line, one of combinations of their manifestations was assigned: “Yes” means that an indicator became apparent, “No” means an indicator is not available.

The expert task was copying an anticipated risk level appropriate for the combination of indicators manifestations in the given line, using the cells of column 5.

The risk level should be denoted according to the Russian Federation Government Resolution № 1064: “High”, “High/Medium”, “Medium”, “Low”.

The survey fragment is provided in Table 2.

The general number of combinations “Yes-No” with four indicators equals $2^4 = 16$. Five qualified specialist experts participated in the survey, thus, $16 \times 5 = 80$ risk assessments were obtained depending on the indicators under observation.

While building the network in Matlab, the manual [18] was used. For downloading into the ANFIS editor, the acquired data were transformed into the matrix 80×5 , the fragment of which is given in Table 3. In the matrix, one unit corresponds to the version “Yes” (indicator

available), null does the version “No” (indicator not available).

The indicators were enumerated in conformity with Table 1, experts-assigned risk levels were given numeric values: ‘High’ – 4, “High/Medium” – 3, “Medium” – 2, “Low” – 1.

The set of databases for training is assigned by the command *edit* and saved by expanding *.dat*. The editor window of hybrid systems is called using the command *anfisedit* (fig. 5) and, we download the matrix of the training kit. Furthermore, we generate the structure of fuzzy inference FIS of Sugeno type by selecting the number of MF for the terms of input variables equal 2 and the type of Gauss’s MF.

We assign settings of network training. Default Error Tolerance is 0 and changing is not advised. Let us determine the number of training cycles (*Epochs*) 20.

A hybrid method of training is selected, which presents a combination of the least-squares method and the method of gradient decreasing. We conduct the network training (fig. 6).

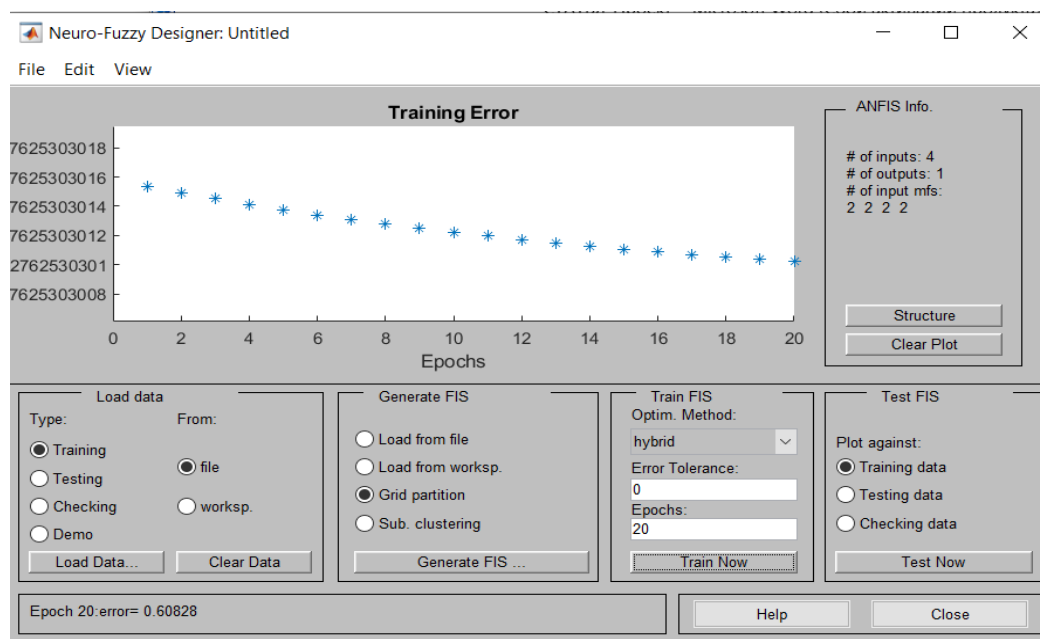


Fig. 6. Results of the network training in the Hybrid Systems Editor window

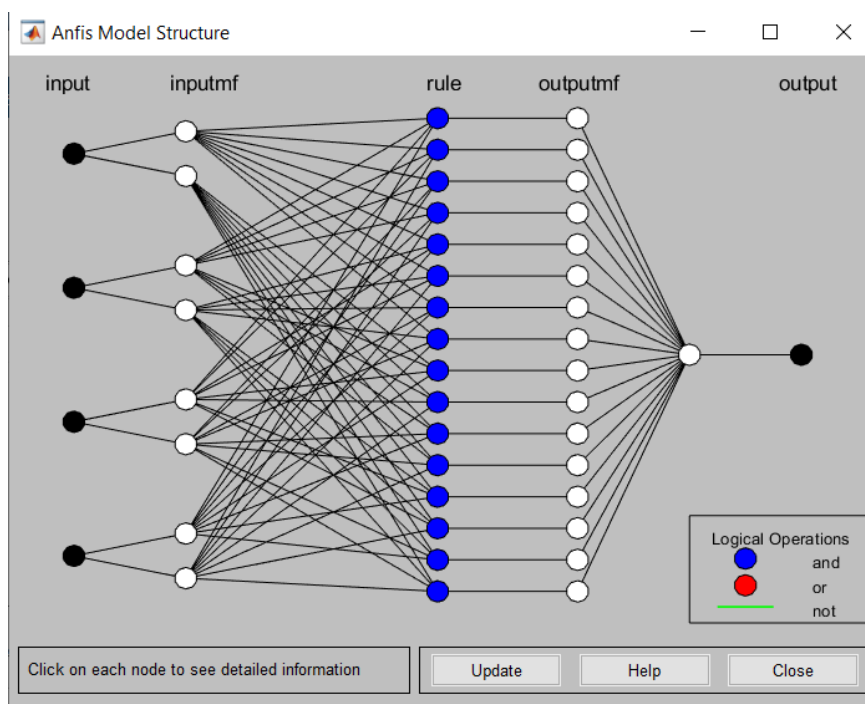


Fig. 7. The structure of the generated fuzzy neural network

The structure of the built network (fig. 7) is called by a key *Structure*.

The Figure shows the number of neurons in each layer, the neural type (in this case, neurons AND not available), and neurons and layers links are visible.

The use of interface to view the rules of the generated system of fuzzy inference, which is shown in Figure 8, allows for the solution to the formulated problem of risk forecasting with any combinations of indicators and any degree of their manifestation.

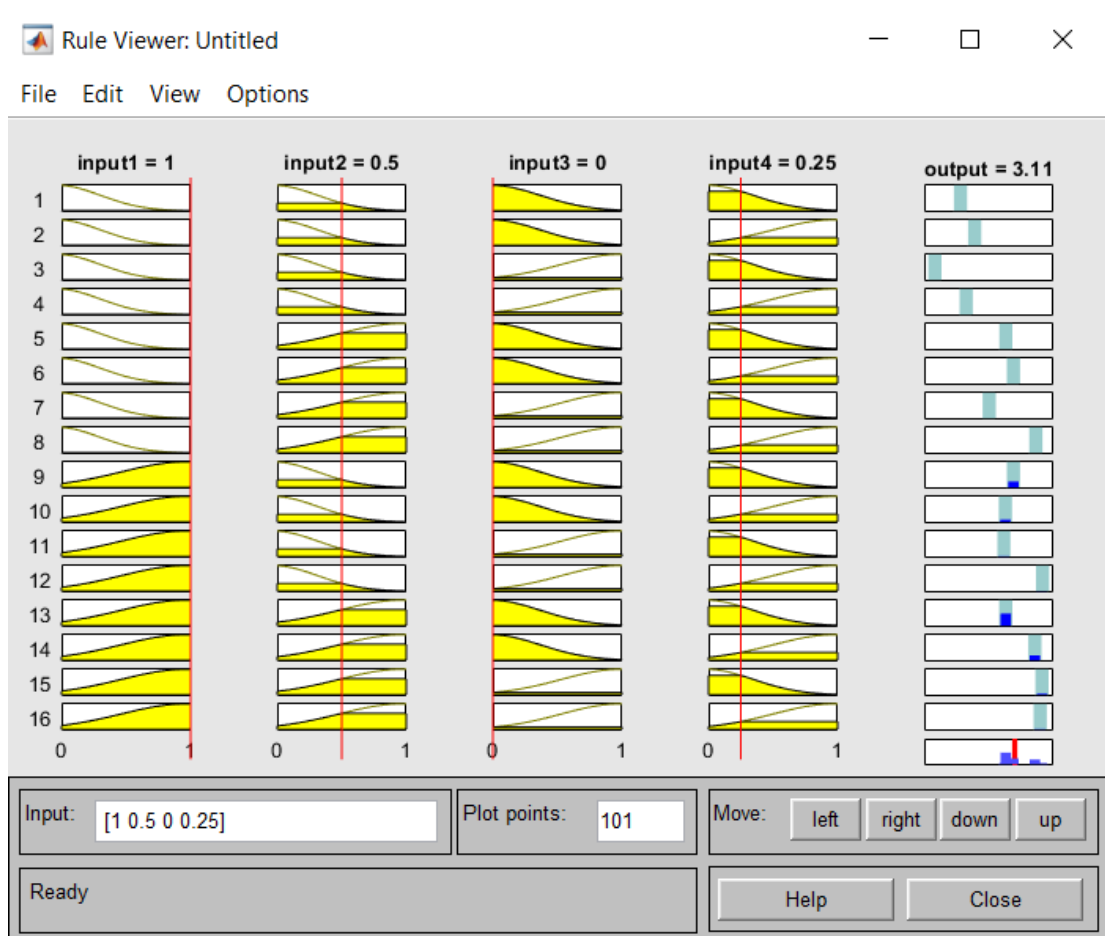


Fig. 8. Output of the results of forecasting risks for the object based on the identified manifestations of risk indicators

Let us introduce an exponent “Degree of risk indicator X manifestation” as a real number from 0 to 1, which shows the degree of the given indicator manifestation based on the control results. For example, if indicator 1 is clearly and uniquely observed, we reckon $X_1 = 1$. If the availability of indicator 2 can be considered as manifesting to the extent of 50%, then $X_2 = 0.5$, etc. The indicator X value for each observed risk indicator is established by an inspector. The different degree of manifestation, frequently available in practice, therefore, the different hazard degree of defective features and discrepancies, their “fuzziness” is also taken into consideration.

The generated and trained fuzzy neural network allows us, assigning values of all $X_i = 1-4$, to obtain a quantitative assessment of R risk forecast varying from 1 to 4, i.e., from low up to high. To complete this task, it is necessary to assign values X_i for indicators from 1 to 4 in

succession, using white space, in the window *Input* in the lower left-hand side of the configuration *Rule Viewer* or relocate red cursors to the respective positions in the MF columns.

For example, $X_1 = 1$; $X_2 = 0.5$; $X_3 = 0$; $X_4 = 0.25$ are assigned in Figure 8. These values (Input 1, 2, 3, 4) can be viewed over the respective MF columns. We have the system-computed risk assessment $R = 3.11$ over the rightmost column of results (*Output*). It means that in the given case, a forecasted risk is slightly greater than high/medium, however, substantially less than high.

In general, the interpretation of the result obtained is an expert task carrying out control and supervisory functions. It is obviously essential to take into consideration a system fault in this context.

Matlab makes it possible to obtain a graphic interface to view the surface of the generated

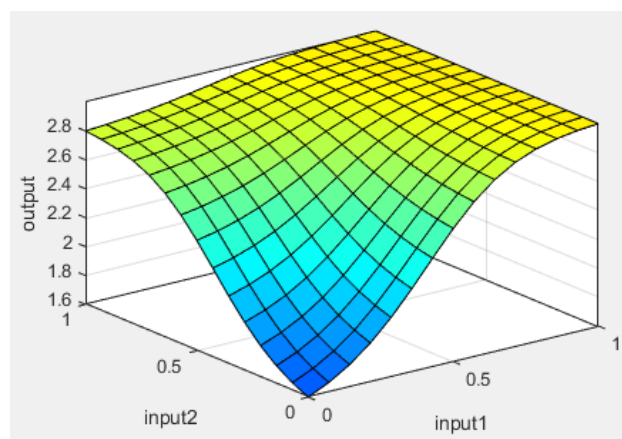


Fig. 9. The surface of the risk level in coordinates X_1/X_2 if $X_3 = X_4 = 0$

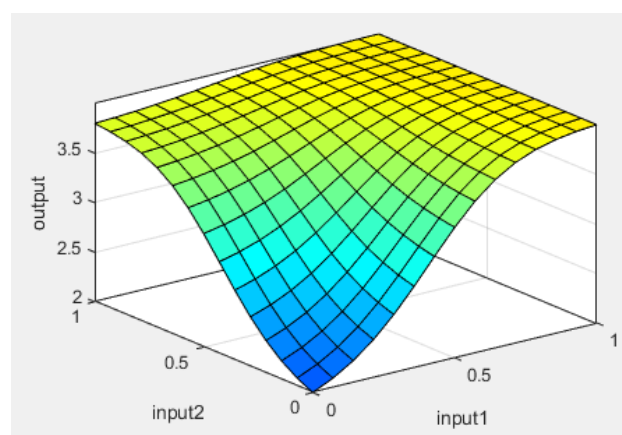


Fig. 10. The surface of the risk level in coordinates X_1/X_2 if $X_3 = X_4 = 1$

system as an additional option. Figures 9 and 10 illustrate the surfaces of the risk forecast result in coordinates X_1/X_2 under different fixed values X_3 и X_4 .

Conclusion

While conducting control and supervisory activities in airlines to assess a risk level of an object, it is necessary to take into consideration manifestations of risk indicators. It will boost the “proactive” (in ICAO conception) component of the risk-oriented approach towards inspections of organizations.

The neural networks can be the tool of forecasting. The feasibility of using the adaptive neural fuzzy inference system (ANFIS), possessing the advantages to solve the given task

compared to other networks, is shown. The method allows us to obtain substantiated quantitative risk assessments depending on “the degree of risk indicator manifestation”. The network training can be conducted based on expert survey data similar to the stated study, also on actual results of inspections and investigations of aviation events as they accumulate.

The applicability of the network is shown as an example of risk indicators for the air traffic management organization, but the methodology can be used in any entity of Civil Aviation not only during an inspection but also during the self-control within the framework of the valid Flight Safety Management System.

The generation and applicability of the network in the software package Matlab can be conducted by specialists of control authorities and inspections (departments) on flight safety of

airlines which do not have specialized mathematical knowledge and skills in the software domain.

References

1. Soloviev, A.I. (2017). *Risk-oriented approach in the system of government control and supervision in the tax sphere*. Ekonomika. Nalogi. Pravo, vol. 10, no. 6, pp. 139–146. (in Russian)
2. Avdiyskiy, V.I. & Bezdenzhnykh, V.M. (2016). *The economic security of modern Russia: the risk-based approach to its assurance*. Ekonomika. Nalogi. Pravo, vol. 10, no. 3, pp. 6–13. (in Russian)
3. Agamagomedova, S.A. (2021). *Risk-oriented approach in the implementation of control and supervision activities: theoretical justification and problems of application*. Siberian Law Review, vol. 18, no. 4, pp. 460–470. DOI: 10.19073/2658-7602-2021-18-4-460-470 (in Russian)
4. Ayres, I. & Braithwaite, J. (1992). *Responsive regulation. transcending the deregulation debate*. Oxford: Oxford University Press, 216 p.
5. Braithwaite, J. (2006). *Responsive regulation and developing economies*. World Development, vol. 34, no. 5, pp. 884–898. DOI: 10.1016/j.worlddev.2005.04.021
6. Ahmad, N. (2018). *Responsive regulation and resiliency: the renewable fuel standard and advanced biofuels*. Virginia Environmental Law Journal, vol. 36, issue 2, p. 40. Available at: <https://ssrn.com/abstract=3106907> (accessed: 11.08.2022).
7. Kunien, V.A. & Uvarova, I.V. (2019). *Towards a risk-orientated model of control and supervision activities in the civil aviation sphere*. Economics and Management, no. 2 (160), pp. 59–68. (in Russian)
8. Mahutov, N.A., Pulikovskiy, K.B. & Shoygu, S.K. (2008). *[Safety of Russia. Legal social economical scientific and technical aspects. Risk analysis and security management. (Guidelines)]*. Moscow: MGF «Znaniye», 672 p. (in Russian)
9. Chertok, V.B. (2017). *Towards a risk-orientated model of control and supervision activities in the civil aviation sphere*. Transport Rossiyskoy Federatsii, no. 6 (73), pp. 27–30. (in Russian)
10. Hadjimichael, M. (2009). *A fuzzy expert system for aviation risk assessment*. Expert Systems with Applications, vol. 36, no. 3, pp. 6512–6519. DOI: 10.1016/j.eswa.2008.07.081
11. Jenab, K. & Pineau, J. (2018). *Automation of air traffic management using fuzzy logic algorithm to integrate unmanned aerial systems into the national airspace*. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), vol. 8, no. 5, pp. 3169–3178. DOI: 10.11591/IJECE.V8I5.PP3169-3178
12. Sharov, V.D. & Vorobyov, V.V. (2017). *Fuzzy risk assessment of aviation events*. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 3, pp. 6–12.
13. Borisov, V.V., Kruglov, V.V. & Fedulov, A.S. (2007). *[Fuzzy models and networks]*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 284 p. (in Russian)
14. Osovskiy, S. (2002). *[Neural networks for information processing]*. Translated from Polish I.D. Rudinsky. Moscow: Finansy i statistika, 344 p. Available at: <https://bookree.org/reader?file=555814&pg=4> (accessed: 12.08.2022). (in Russian)
15. Rutkovskaya, D., Pilinsky, M. & Rutkovsky, L. (2006). *[Neural networks for information processing]*. Translated from Polish I.D. Rudinsky. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 452 p. (in Russian)
16. Jang, J.-S.R. (1993). *ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system*. IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics, vol. 23, no. 3, pp. 665–685. DOI:10.1109/21.256541
17. Gorbachenko, V.I., Akhmetov, B.S. & Kuznetsova, O.Yu. (2019). *[Intelligent systems: fuzzy systems and networks: Tutorial]*. Moscow: Izdatelstvo Yurayt, 105 p. (in Russian)
18. Bogatkov, V.N., Dranishnikov, L.V. & Prorokov, A.E. (2011). *[Construction of control systems based on neural networks: study*

guide]. Apatity: Izdatelstvo KF PetrGU, 41 p. (in Russian)

Список литературы

1. **Соловьев А.И.** Риск-ориентированный подход в системе государственного контроля и надзора в налоговой сфере // Экономика. Налоги. Право. 2017. Т. 10, № 6. С. 139–146.
2. **Авдийский В.И., Безденежных В.М.** Экономическая безопасность современной России: риск-ориентированный подход к ее обеспечению // Экономика. Налоги. Право. 2016. Т. 9, № 3. С. 6–13.
3. **Агамагамедова С.А.** Риск-ориентированный подход при осуществлении контрольно-надзорной деятельности: теоретическое обоснование и проблемы применения // Сибирское юридическое обозрение. 2021. Т. 18, № 4. С. 460–470. DOI: 10.19073/2658-7602-2021-18-4-460-470
4. **Ayres I., Braithwaite J.** Responsive regulation. Transcending the deregulation debate. Oxford: Oxford University Press, 1992. 216 p.
5. **Braithwaite J.** Responsive regulation and developing economies world development // World Development. 2006. Vol. 34, no. 5. Pp. 884–898. DOI: 10.1016/j.worlddev.2005.04.021
6. **Ahmad N.** Responsive regulation and resiliency: the renewable fuel standard and advanced biofuels [Электронный ресурс] // Virginia Environmental Law Journal. 2018. Vol. 36, iss. 2. P. 40. URL: <https://ssrn.com/abstract=3106907> (дата обращения: 11.08.2022).
7. **Куниен В.А., Уварова И.В.** Риск-ориентированный подход в контрольно-надзорной деятельности: международный опыт и особенности применения в российских условиях // Экономика и управление. 2019. № 2 (160). С. 59–68.
8. **Махутов Н.А., Пуликовский К.Б., Шойгу С.К.** Безопасность России. Правовые социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ рисков и управление безопасностью: методические рекомендации. М.: МГФ «Знание», 2008. 672 с.
9. **Черток В.Б.** Риск-ориентированная модель контрольно-надзорной деятельности в сфере гражданской авиации // Транспорт Российской Федерации. 2017. № 6 (73). С. 27–30.
10. **Hadjimichael M.** A fuzzy expert system for aviation risk assessment // Expert Systems with Applications. 2009. Vol. 36, no. 3. Pp. 6512–6519. DOI: 10.1016/j.eswa.2008.07.081
11. **Jenab K., Pineau J.** Automation of air traffic management using fuzzy logic algorithm to integrate unmanned aerial systems into the national airspace // International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE). 2018. Vol. 8, no. 5. Pp. 3169–3178. DOI: 10.11591/IJECE.V8I5.PP3169-3178
12. **Sharov V.D., Vorobyov V.V.** Fuzzy risk assessment of aviation events // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 3. С. 6–12.
13. **Борисов В.В., Круглов В.В., Федюлов А.С.** Нечеткие модели и сети. 2-е изд., стер. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 284 с.
14. **Осовский С.** Нейронные сети для обработки информации / Пер. с пол. И.Д. Рудинского. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.
15. **Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.** Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Пер. с пол. И.Д. Рудинского. М.: Горячая линия – Телеком, 2006. 452 с.
16. **Jang J-S.R.** ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system // IEEE Transactions on System, Man, and Cybernetics. 1993. Vol. 23, no. 3. Pp. 665–685. DOI: 10.1109/21.256541
17. **Горбаченко В.И., Ахметов Б.С., Кузнецова О.Ю.** Интеллектуальные системы: нечеткие системы и сети: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2019. 105 с.
18. **Богатиков В.Н., Дранишников Л.В., Пророков А.Е.** Построение систем управления на основе нейронных сетей: учеб.-методическое пособие. Апатиты: Изд-во КФ ПетрГУ, 2011. 41 с.

Information about the authors

Roman A. Obraztsov, The Head of the Department for the Organization of the Use of Airspace and Radio Engineering Support of Flights of the Central Interregional Territorial Air Transport Department of the Central Regions of the Federal Air Transport Agency, Ministry of Transport of the Russian Federation, obrazcov1311@mail.ru.

Valeriy D. Sharov, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Life and Flight Safety Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, v.sharov@mstuca.aero.

Сведения об авторах

Образцов Роман Александрович, начальник отдела организации использования воздушного пространства и радиотехнического обеспечения полетов Центрального межрегионального территориального управления воздушного транспорта Центральных районов Федерального агентства воздушного транспорта. Министерство транспорта Российской Федерации, obrazcov1311@mail.ru.

Шаров Валерий Дмитриевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры безопасности полетов и жизнедеятельности МГТУ ГА, v.sharov@mstuca.aero.

Поступила в редакцию 28.08.2022
Принята в печать 26.01.2023

Received 28.08.2022
Accepted for publication 26.01.2023

УДК 621.438-226.739.6

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-72-80

Influence of impurities contained in fuel and air on sulfide corrosion of turbine blades of the gas turbine engine

**V.M. Samoylenko¹, G.T. Paschenko², E.V. Samoylenko¹,
A.A. Gnezdilova¹**

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

²*Experimental Design Bureau named after A. Lyulka – Branch of PJSC “UEC-UMPO”,
Moscow, Russia*

Abstract: In the process of improving gas turbine engines (GTE), increasing the resource and efficiency, there is a constant increase in temperature and pressure of the working fluid. Turbine elements are subjected to high thermomechanical loads and continuous exposure from the aggressive environment. These impacts are especially significant for the working blades of the first stages of the turbine, located in the area of the highest temperatures. One of the most serious types of damage in this case is the corrosive effect on the working blade from the combustion gases entering the flow part of the turbine. The TS-1 fuel used on an aircraft contains sulfur compounds in its composition – elemental sulfur and mercaptans, which in the combustion process, together with sodium and potassium in the air, leads to an aggressive effect on the material of the turbine blade. To ensure the long-term operation of the turbine blades of the turbine at the gas temperature at the turbine inlet up to 800...850 °C, the content of these products in both fuel and air is limited according to the regulatory and technical documentation. However, it is not yet possible to exclude them completely. The presence of sulfur compounds on the turbine blades of the GTE causes sulfide corrosion. Therefore, the article considers the influence of impurities in fuel and air on the process of sulfide corrosion of the turbine blades material of the turbine. The mechanism of sulfur dissolution in metal oxides or protective coating is presented, as well as the diffusion of sulfur oxide from the coating surface into its depth. The reason for the influence of sodium chloride contained in the air on the corrosion of nickel alloy or the protective coating applied on it has been established. The influence of vanadium in the fuel on the corrosion rate is given. In order to increase the efficiency of the turbine blades when exposed to such an aggressive environment, it is proposed to use a new coating formed from an aqueous suspension and allowing the introduction of chromium into the coating, which provides a higher durability of such a coating in comparison with serial aluminide coatings. The introduction of chromium is ensured by an exothermic reaction occurring during the formation of the coating during heat treatment.

Key words: sulfur, sulfide corrosion, atomic lattice, protective coating, corrosion processes, impurities, nickel alloy.

For citation: Samoylenko, V.M., Paschenko, G.T., Samoylenko, E.V. & Gnezdilova, A.A. (2023). Influence of impurities contained in fuel and air on sulfide corrosion of turbine blades of the gas turbine engine. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 1, pp. 72–80. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-72-80

Влияние примесей, содержащихся в топливе и воздухе, на сульфидную коррозию лопаток турбины газотурбинных двигателей

**В.М. Самойленко¹, Г.Т. Пашенко², Е.В. Самойленко¹,
А.А. Гнездилова¹**

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

²*Опытно-конструкторское бюро имени А. Люльки – филиал ПАО «ОДК-УМПО»,
г. Москва, Россия*

Аннотация: В процессе совершенствования газотурбинных двигателей (ГТД), повышения ресурса и коэффициента полезного действия (КПД) происходит постоянный рост температуры и давления рабочего тела. Элементы турбины

подвергаются высоким термомеханическим нагрузкам и непрерывному воздействию со стороны агрессивной среды. Эти воздействия особенно существенны для рабочих лопаток первых ступеней турбины ГТД, находящихся в области наиболее высоких температур. Один из самых серьезных видов повреждений в данном случае – коррозионное воздействие на рабочую лопатку со стороны газовых продуктов сгорания, поступающих в проточную часть турбины. Применяемое на воздушном судне (ВС) топливо ТС-1 содержит в своем составе сернистые соединения –элементарную серу и меркаптаны, что в процессе сгорания совместно с находящимися в воздухе натрием и калием приводит к агрессивному воздействию на материал рабочей лопатки турбины ГТД. Для обеспечения длительной работы лопаток турбины ГТД при температуре газа на входе в турбину до 800...850 °С содержание данных продуктов как в топливе, так и в воздухе, согласно нормативной технической документации, ограничивают. Однако исключить их полностью пока нет возможности. Присутствие соединений серы на лопатках турбины ГТД вызывает протекание сульфидной коррозии. Поэтому в статье рассматривается влияние примесей в топливе и воздухе на процесс протекания сульфидной коррозии материала лопаток турбины ГТД. Представлен механизм растворения серы в оксидах металла или защитного покрытия, а также диффузия оксида серы с поверхности покрытия в его глубь. Установлена причина влияния содержащегося в воздухе хлористого натрия на коррозию никелевого сплава или применяемого на нем защитного покрытия. Приводится влияние находящегося в топливе ванадия на скорость коррозии. С целью увеличения работоспособности рабочих лопаток турбины ГТД при воздействии такой агрессивной среды предлагается применение нового покрытия, формируемого из водной суспензии и позволяющего ввести в состав покрытия хром, что обеспечивает более высокую долговечность такого покрытия в сравнении с серийными алюминидными покрытиями. Введение хрома обеспечивается за счет экзотермической реакции, протекающей в процессе формирования покрытия при термической обработке.

Ключевые слова: сера, сульфидная коррозия, атомная решетка, защитное покрытие, коррозионные процессы, примеси, никелевый сплав.

Для цитирования: Самойленко В.М. Влияние примесей, содержащихся в топливе и воздухе, на сульфидную коррозию лопаток турбины газотурбинных двигателей / В.М. Самойленко, Г.Т. Пашенко, Е.В. Самойленко, А.А. Гнездилова // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 1. С. 72–80. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-72-80

Introduction

Different types [1, 2] of coating are developed and used in purpose of GTE turbine performance increase.

Analysis of the gas turbine engine blade protective coating use, along with laboratory tests allows us to distinguish the two specific areas of their damage while use and testing, depending on the temperature – that is 650...850 °C and up to 1050 °C [2–6]. There are moderate corrosion

processes in 900...1050 °C temperature interval due to use of protective coating and Al_2O_3 – Cr_2O_3 , highly protective from gas corrosion, on it.

Combustion products and ash sediment corrosion impact [4, 6, 7, 8] (fig. 1) is a type of turbine engine blade protective coating damage, which decreases their performance.

External inspection of blades after running hours shows us, that there is a blast of pinpoint lodgment mainly on blade pressure side (colour

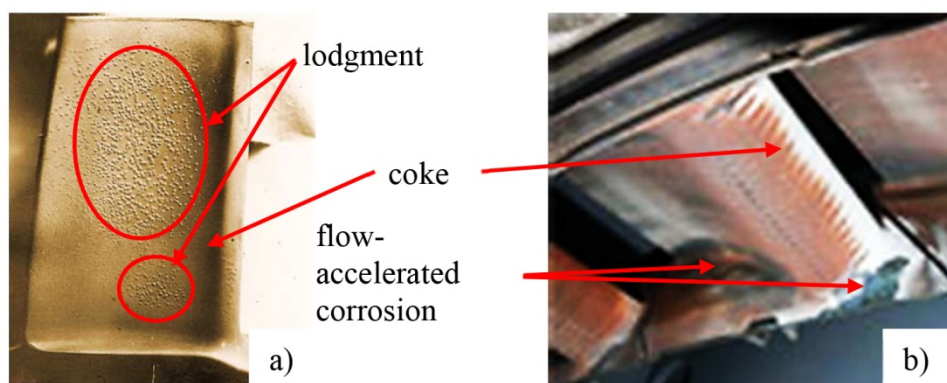


Fig. 1. The appearance of the working (a) and nozzle (b) blades after operating time 10671 hours

from light up to dark brown) (fig. 1, *a*) on the blade web surface. Flow-accelerated damage of protective coating, along with coke ash lodgment (fig. 1, *b*) is detected on nozzle cluster blades due to aggressive gas flow.

There is local lodgment on blasts, which work on fuel of high sulfur concentration, generally consisting of Na_2SO_4 ($\approx 74\%$). Such lodgment is a basic sulfide corrosion reagent, whether there is no lodgment, then there is no corrosion.

It should be mentioned, that due to high temperature impact turbine gas atmosphere and impurities on GTE turbine blades, which lead to their intensive corrosion, are highly oxidizing, increasing the corrosion rate [9–11].

Presence of sulfur compounds in combustion gases or in turbine blade lodgment is a main condition for sulfide corrosion. Thus, it is meaningful to observe the mechanism of sulfur introduction in metal crystalline grid or oxides on its surface, which will help us understand, what actions it is necessary to take in order to decrease sulfide corrosion impact.

Results and discussion

Let us consider approximate impurities, which lead to corrosion, and their sources in combustion chamber, in order to understand turbine blade sulfide corrosion mechanism while maintenance.

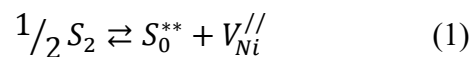
Sodium chloride is a basic compound, which leads to sulfide corrosion, invading combustion chamber along with the air [4, 6, 12]. This is particularly evident while aircraft operation in coastal areas and above the sea [13].

Sulfur and alkalic metals, as main corrosion agents, may invade GTE combustion chamber along with the fuel. Fuel may be polluted with sodium chloride whether water invades it. Vanadium, chlorum, lead, hydrocarbon or their compound [6, 12, 14] may also occur in GTE combustion chamber along with the fuel, which accelerates corrosion processes.

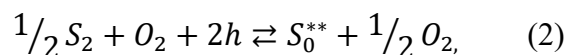
Covering, which protective feature is aluminum and chrome oxide – Al_2O_3 and Cr_2O_3 cyclization, is applied onto turbine blades in order

to prevent high temperature oxidation. Therefore, sulfur invades oxide crystalline grid while combustion in finely crushed forms and influences the hole cyclization, in other words, defect balance [15].

Nickel oxides [1, 5] are cycled on blade surface while operation when covering protective features are exhausted and nickel is diffused into covering. In this case sulfur is implied into anion nickel oxide subarray decreasing vacant electron hole concentration and increasing hole concentration. This can be described with an equation:



or



where S_0^{**} – is an electropositive sulfur atom, entered in place of oxygen ion;

h – vacant electron hole;

$V_{Ni}^{//}$ – bivalent cation tie-up.

Besides that, sulfur can be entered in interstitialcy oxide space, not influencing crystalline grid defects.

Wagner presented the oxidation theory in 1930s [16] and found out, that sulfur diffusion rate in polycrystal nickel and cobalt oxides is an order of magnitude higher than in monocrystals of 1000 °C temperature and more [17, 18].

It is necessary to find out diffusion of sulfur and sodium chloride, in other words, mechanism of their dilution in oxides, in purpose of protective coating development, with ability of long-term work in their aggressive impact conditions.

Condition which should be complied in purpose of sulfur diffusion:

$$P_{S_2}^{//} > P_{S_2}^/ \quad (3)$$

where $P_{S_2}^{//}$ и $P_{S_2}^/$ – partial sulfur pressures on calx-gas and calx-metal faze border respectively. Equation (3) will be complied in case of complying the following inequation:

$$P'_{S_2} > \exp\left(\frac{2\Delta G_3^0}{RT}\right), \quad (4)$$

where, ΔG_3^0 – thermodynamical potential, R – gas constant, and T – absolute temperature.

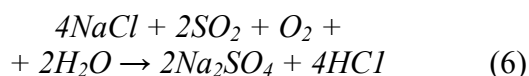
It can be said, that alloy-determined sulfur diffusion is possible whether:

$$P'_{S_2} > \exp\left(\frac{2\Delta G_3^0}{RT}\right). \quad (5)$$

Sulfur dioxide SO_2 molecule diffusion runs on bead borders, through micro-breaks, cavings in a calx. While diffusion sulfur dioxide reacts with calx metal and metal activity will increase with moving further. Therefore, partial oxygen pressure will decrease with moving further to metal border. Consequently, sulfur compound may cycle under the calx even while low sulfur steam pressure [18]. Such a process shows us the opportunity of the rapid nickel alloy damage, containing the traces of sulfur dioxide.

Water steams invade the GTE gas track along with sulfur combustions, containing sea salt, which sodium chloride $NaCl$ [12] is a basic component of, leading to nickel alloy corrosion rate increase.

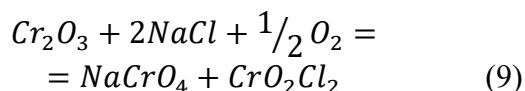
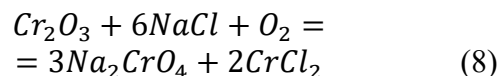
In case of sodium chloride presence in a fuel or in air, invading GTE, and in sulfur oxide presence with $t_m \approx 885^\circ C$ there are the compounds in combustion products:



While GTE operation the sodium natrium particles collapse on turbine blades surface and sulfate.

Protective coverages [1, 5] on GTE turbine blades cycle the aluminum and chrome dioxides – Al_2O_3 and Cr_2O_3 . Sodium natrium practically does not interact with aluminum dioxide. It cycles volatile products, leading to slick bulbing and damage, with chrome dioxide, along with chrome-containing alloys. Nevertheless, coverages with chrome oxide Cr_2O_3 are sodium chloride resistant.

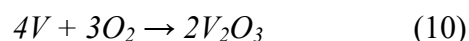
The main reason of sodium natrium influence is chemical reactions running:



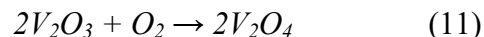
Volatile chloride and oxychloride cycling increases with higher temperatures, leading to more chloride natrium impact on nickel alloy corrosion.

Vanadium impurity influences on corrosion rate increase. Compounds, which can cycle while vanadium-containing fuel combustion, depending on temperature:

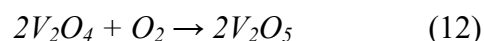
– vanadium trioxide (melting point $t_m = 1970^\circ C$):



– vanadium tetroxide ($t_m = 1970^\circ C$):



– vanadium pentoxide ($t_m = 675^\circ C$):



Mechanism of vanadium impact on corrosion process in common is in oxide slick damage, increasing its porosity and oxidation rate due to V_2O_5 influence, along with diffusion flow increase through chrome oxide and sodium natrium influence.

The following protective coating damage mechanism on turbine blades is confirmed with the research conducted by the authors. The blades (fig. 1, a) of GTE turbine at gas-pumping station were analyzed. The metallographic research of working blades in maximum lodgment areas (fig. 1, a) after operation and baseline protective coating (fig. 2).

As we can see, there is a corrosion of AZH-8 coverage surface in local lodgment areas. Protective coating corrosion is of frontal (areal) character at 500...700 mkm distance under local saline lodgment layers. In case of pitting layer affection

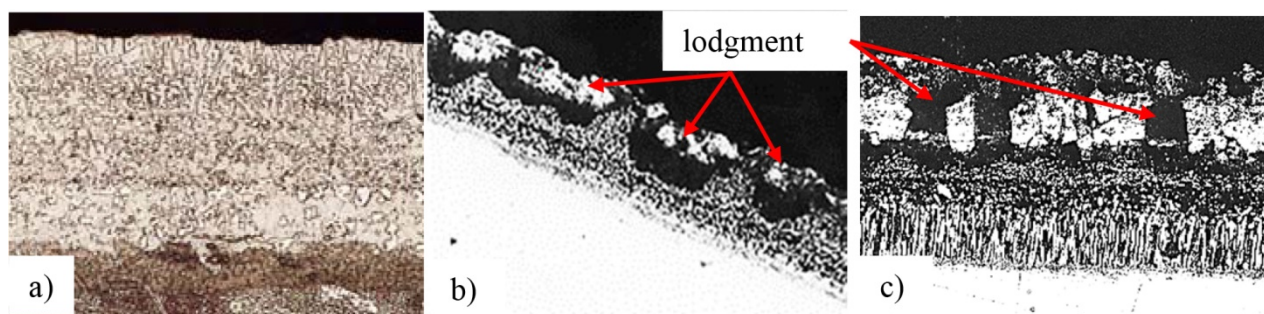


Fig. 2. The microstructure of the coating AZH-8 on the blade before operating time (a) and with an operating time of 10671 hours on the side of the trough (b) and the back (c)

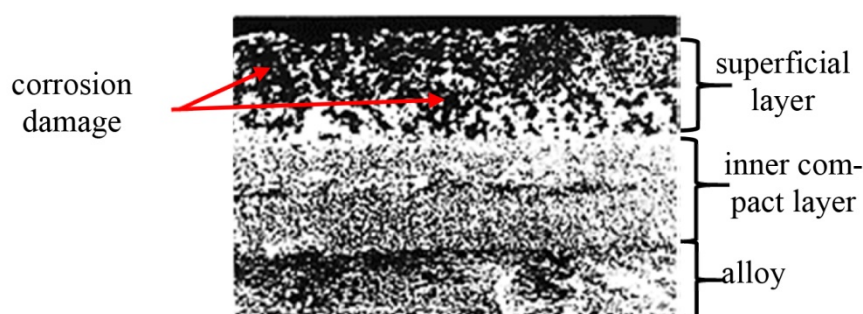


Fig. 3. Microstructure of AZH-8 coating after laboratory tests for sulfide corrosion

there is a wedge shaped corrosion spreading in depth of the coverage.

Such a character of AZH-8 coverage corrosion is also confirmed with sulfide corrosion laboratory tests (fig. 3).

As we can see in Figure 3, saline corrosion has invaded only 50% of coverage depth and stopped before the NiCrTaWAlSiHfY pattern, which is more corrosion resistant, than the outside zone of β - and γ -fazes, formed while chrome aluminizing.

The results of the research confirm the above-mentioned mechanism of protective coverage damage due to impurities combustion products impact in fuel and air and aggressive atmosphere impact on GTE working blades.

The laboratory tests for sodium sodium impact on differently gained protective coverages were conducted. Chrome aluminized (ChA) coverage, mass used in aircraft construction, formed in bulk solid with gas circulation (CCA) method was applied on nickel alloy samples. The research of the new coverage, formed of a water suspension of excessive chrome content – 10...13% was conducted as an alternative to the

following coverages. There is an exothermal reaction while thermo vacuum annealing in a new coverage, which has allowed us to imply chrome in coverage [19, 20].

The sea salt water dilution, containing 58% NaCl, 26,5% $MgCl_2$, 9,8% Na_2SO_4 , 2,8% $CaCl_2$, 1,6% KCl, 0,5% $NaHCO_3$, 0,2% KBr was applied on ZhS6U samples. Every sample was soaked in the following dilution for no less than 3 times and was dried outdoors within 15 minutes. Afterwards the samples were weight in purpose of salt mass overweight, which was about $5 \pm 1 \text{ mg/cm}^2$. The tests were conducted with 1100 °C temperature, and the calx quantity in crucibles (fig. 4).

The results of the research showed us, that the coverages may be set in the following sequence from the resistance (change of the appearance) up to corrosion (in descending order): NPH, CCA, HA (fig. 4). The samples were weight along with the crucibles in purpose of estimation by calx quantity in a crucible. There was a insignificant white-coloured calx quantity in NPH crucible. Apparently, this is a crumbled salt with a insignificant quantity of corrosion

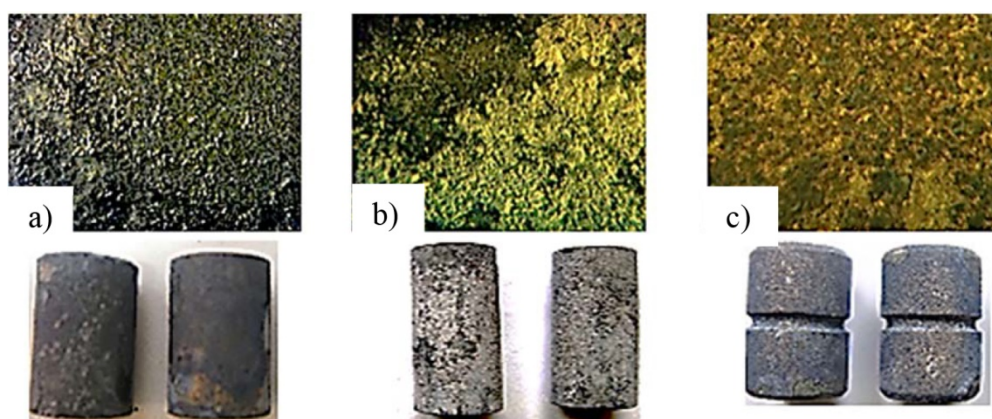


Fig. 4. Surface structure and general appearance of samples from the alloy ZhS6U with protective coatings: *a* – HA, *b* – CCA, *c* – NPH after salt corrosion for 100 hours at a temperature of 1100 °C

products. There is more dark and large size calx in CCA and HA coverage crucibles.

The research confirms the above-mentioned (formula 8 and 9) sodium natrium impact on protective coverage. Implication of about 10% of chrome allows to increase its resistance to gas corrosion, due to Cr_2O_3 protective oxide slick cycling, along with aggressive combustion products resistance.

Conclusions

1. It is possible to increase GTE turbine blade working capacity, working in an aggressive gas flow for a long time, using the protective coverage, allowing to decrease their tendency to corrosion. The working capacity of coverages on the blades depends on many factors and first of all on their pattern.

2. The mechanism of protective coverage and metal destruction due to dilution and diffusion of sulfur, invading the turbine blade protective coverage from fuel, in the coverage depth is presented according to the conducted research.

3. The laboratory tests allowed us to determine the impact of sodium natrium in the air, invading the turbine blade surface along with the combustion products, on the corrosion destruction of the protective coating.

4. The presence of sulfur, sodium natrium and vanadium in combustion products leads to corrosion rate increase.

5. Chrome alloy addition to coverage increases corrosion resistance, consequently, allowing us to increase their longevity while working with aggressive combustion products.

References

1. **Abraimov, N.V. & Eliseev, Yu.S.** (2001). [*Chemical and thermal treatment of heat-resistant steels and alloys*]. Moscow: Intermet Inzhiniring, 622 p. (in Russian)
2. **Muboyadzhyan, S.A., Lesnikov, V.P. & Kuznetsov, V.P.** (2008). [*Complex protective coatings for turbine blades of aircraft gas turbine engines*]. Yekaterinburg: Kvist, 208 p. (in Russian)
3. **Nikitin, V.I.** (1987). [*Corrosion and protection of gas turbine blades*]. Leningrad: Mashinostroyeniye, 272 p. (in Russian)
4. **Gishvarov, A.S.** (2014). [*Damage rate of power plants materials in a corrosive environment*]. Moscow: Mashinostroyeniye, 297 p. (in Russian)
5. **Kolomytsev, P.T.** (1991). [*Protective coatings for nickel alloys*]. Moscow: Metallurgiya, 154 p. (in Russian)
6. **Davydov, M.N., Gishvarov, A.S. & Rahimov, A.H.** (2016). *Modeling of durability of turbine blades in the corrosive environment*. Vestnik UGATU, vol. 20, no. 1 (71), pp. 71–80. (in Russian)
7. **Kachanov, E.B. & Tamarin, Yu.A.** (2005). [*Coatings to protect turbine blades from*

sulfide corrosion]. Tekhnologiya legkikh splavov, no. 1–4, pp. 171–180. (in Russian)

8. Karpinos, B.S., Barilo, V.G. & Samuleev, V.V. (2004). [*Destruction of elements of the hot path of aviation gas turbines*]. Vestnik dvigatelestroyeniya, no. 1, pp. 4–10. (in Russian)

9. Yushchenko, K.A. & Savchenko, V.S. (2005). [*High-temperature gas corrosion of nickel alloy turbine blades during operation*]. Automatic welding, no. 5, pp. 25–34. (in Russian)

10. Mahobia, G.S., Paulose, N., Mannan, S.L., Sudhakar, R.G., Chattopadhyay, K., Santhi Srinivas, N.C. & Singh, V. (2014). *Effect of hot corrosion on low cycle fatigue behavior of superalloy IN718*. International Journal of Fatigue, vol. 59, pp. 272–281. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.08.009

11. Yang, X., Li, S. & Qi, H. (2015). *Effect of high-temperature hot corrosion on the low cycle fatigue behavior of a directionally solidified nickel-base superalloy*. International Journal of Fatigue, vol. 70, pp. 106–113. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.08.011

12. Matrelov, V.N. & Piskunov, V.A. (1986). [*Jet engines and fuel*]. Moscow: Mashinostroyeniye, 293 p. (in Russian)

13. Khimich, V.L. & Kuznetsov, Yu.P. (2015). *About the mechanism of salt scaling in the flow section of a gas turbine engine operating in the marine environment*. Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya, no. 1-1, pp. 99. (in Russian)

14. Gryadunov, K.I. (2021). [*Chemmotology of aviation fuels and lubricants: lecture texts*]. Moscow: ID Akademii Zhukovskogo, 184 p. (in Russian)

15. Bokshstein, B.S. (1978). [*Diffusion in metals*]. Moscow: Metallurgiya, 248 p. (in Russian)

16. Wagner, C. (1933). *Beitrag zur theorie des anlaufvorgangs*. Zeitschrift für Physikalische Chemie, vol. 21B, no. 1, pp. 25–41. DOI: 10.1515/zpch-1933-2105

17. Chaug, R., Stewart, W. & Wagner, C. (1972). *Diffusion of sulfur 35 NiO and CoO*. Proceedings of the International Symposium on Reactivity of Solids. Bristol, 17–21 July. Chapman and Hall, Ltd., p. 231.

18. Gilder, X. & Merbiola, R. (1981). [*Sulfide corrosion of alloys based on nickel and cobalt*]. Zharoprochnyye splavy dlya gazovykh turbin: materialy mezhdunarodnoy konferentsii, in D. Kotsoradis, P. Felix, H. Fishmeister et al. (Eds.). Moscow: Metallurgiya, pp. 59–79. (in Russian)

19. Ivanov, E.G., Zorichev, A.V., Samoylenko, V.M. & Pashchenko, G.T. (2008). [*New heat-resistant coating*]. Defense Industry Achievements – Russian Scientific and Technical Progress, no. 3, pp. 22–24. (in Russian)

20. Ivanov, E.G., Samoylenko, V.M., Ravilov, R.G. & Petrova, M.A. (2015). *Application of the aqueous coating suspension for the protection of gas turbine engine parts from corrosion*. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, no. 217, pp. 46–50. (in Russian)

Список литературы

1. Абраимов Н.В., Елисеев Ю.С. Химико-термическая обработка жаростойких сталей и сплавов. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 622 с.

2. Мубояджян С.А., Лесников В.П., Кузнецов В.П. Комплексные защитные покрытия турбинных лопаток авиационных ГТД. Екатеринбург: Квист, 2008. 208 с.

3. Никитин В.И. Коррозия и защита лопаток газовых турбин. Л.: Машиностроение, 1987. 272 с.

4. Гишваров А.С. Повреждаемость материалов энергетических установок в условиях коррозионно-активной среды. М.: Машиностроение, 2014. 297 с.

5. Коломыцев П.Т. Защитные покрытия для никелевых сплавов. М.: Metallurgiya, 1991. 154 с.

6. Давыдов М.Н., Гишваров А.С., Рахимов А.Х. Моделирование долговечности лопаток турбин в условиях коррозионно-активной среды // Вестник УГАТУ. 2016. Т. 20, № 1 (71). С. 71–80.

7. Качанов Е.Б., Тамарин Ю.А. Покрытия для защиты лопаток турбин от сульфидной коррозии // Технология легких сплавов. 2005. № 1-4. С. 171–180.

8. Карпинос Б.С., Барило В.Г., Самулев В.В. Разрушение элементов горячего тракта авиационных газовых турбин // Вестник двигателестроения. 2004. № 1. С. 4–10.

9. Ющенко К.А., Савченко В.С. Высокотемпературная газовая коррозия лопаток турбин из никелевых сплавов в процессе эксплуатации // Автоматическая сварка. 2005. № 5. С. 25–34.

10. Mahobia G.S. Effect of hot corrosion on low cycle fatigue behavior of superalloy IN718 / G.S. Mahobia, N. Paulose, S.L. Mannan, R.G. Sudhakar, K. Chattopadhyay, N.C. Santhi Srinivas, V. Singh // International Journal of Fatigue. 2014. Vol. 59. Pp. 272–281. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2013.08.009

11. Yang X., Li S., Qi H. Effect of high-temperature hot corrosion on the low cycle fatigue behavior of a directionally solidified nickel-base superalloy // International Journal of Fatigue. 2015. Vol. 70. Pp. 106–113. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2014.08.011

12. Зрелов В.Н., Пискунов В.А. Реактивные двигатели и топливо. М.: Машиностроение, 1986. 293 с.

13. Химич В.Л., Кузнецов Ю.П. О механизме солеотложения в проточной части газотурбинного двигателя, работающего в условиях морской среды // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1-1. С. 99.

14. Грядунов К.И. Химмотология авиационных горюче-смазочных материалов: тексты лекций. М.: ИД Академии Жуковского, 2021. 184 с.

15. Бокштейн Б.С. Диффузия в металлах. М.: Металлургия, 1978. 248 с.

16. Wagner C. Beitrag zur theorie des anlaufvorgangs // Zeitschrift für Physikalische Chemie. 1933. Vol. 21B, no. 1. Pp. 25–41. DOI: 10.1515/zpch-1933-2105

17. Chaug R., Stewart W., Wagner C. Diffusion of sulfur 35 NiO and CoO // Proceedings of the International Symposium on Reactivity of Solids. Bristol, 17–21 July 1972. Chapman and Hall, Ltd., 1972. p. 231.

18. Гильдер Х., Мербиола Р. Сульфидная коррозия сплавов на основе никеля и кобальта // Жаропрочные сплавы для газовых турбин: материалы международной конференции / Под ред. Д. Котсорадиса, П. Феликса, Х. Фишмайстера и др. М.: Металлургия, 1981. С. 59–79.

19. Иванов Е.Г. Новое жаростойкое покрытие / Е.Г. Иванов, А.В. Зоричев, В.М. Самойленко, Г.Т. Пащенко // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2008. № 3. С. 22–24.

20. Иванов Е.Г. Применение покрытий из водной суспензии для защиты деталей ГТД от коррозии / Е.Г. Иванов, В.М. Самойленко, Р.Г. Равилов, М.А. Петрова // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 217. С. 46–50.

Information about the authors

Vasily M. Samoylenko, Doctor of Technical Sciences, Professor, The Head of the Aviation Fuel Supply and Aircraft Repair Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, v.samoilenko@mstuca.aero.

Gennady T. Paschenko, Candidate of Technical Sciences, The Head of the ACS Department of the A. Lyulka Experimental Design Bureau – a branch of PJSC UEC-UMPO, gennadij.paschenko@okb.umpo.ru.

Elizaveta V. Samoylenko, Student of the Mechanical Department, Moscow State Technical University of Civil Aviation, elizavetta.samojlenko@mail.ru.

Anastasia A. Gnezdilova, Student of the Mechanical Department, Moscow State Technical University of Civil Aviation, nastik.gnez02@gmail.com.

Сведения об авторах

Самойленко Василий Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, v.samoilenko@mstuca.aero.

Пашенко Геннадий Трофимович, кандидат технических наук, начальник управления САУ опытно-конструкторского бюро имени А. Люльки – филиала ПАО «ОДК-УМПО», gen-nadij.paschenko@okb.umpro.ru.

Самойленко Елизавета Васильевна, студентка механического факультета МГТУ ГА, elizavetta.samojlenko@mail.ru.

Гнездилова Анастасия Александровна, студентка механического факультета МГТУ ГА, nastik.gnez02@gmail.com.

Поступила в редакцию 09.10.2021
Принята в печать 26.01.2023

Received 09.10.2021
Accepted for publication 26.01.2023

УДК 629.7.05

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-81-94

Точность определения координат беспилотного летательного аппарата с навигационным комплексом, включающим оптико-электронную систему позиционирования

А.А. Шейников¹, А.М. Коваленко¹, А.А. Санько²

¹Военная академия Республики Беларусь, г. Минск, Беларусь

²Белорусская государственная академия авиации, г. Минск, Беларусь

Аннотация: В статье предложены подходы к коррекции бесплатформенной инерциальной навигационной системы по информации от бортовой оптико-электронной системы беспилотного летательного аппарата. При этом оптико-электронная система представлена как датчик навигационной информации. Приводится обоснование целесообразности такого подхода, особенно в условиях отсутствия или подавления сигналов спутниковых радионавигационных систем. Точность автономной навигации предлагается обеспечить за счет организации маршрута беспилотного летательного аппарата, включающего промежуточные пункты маршрута с размещенными в них наземными навигационными ориентирами. При этом видовая информация, связанная с наземными навигационными ориентирами, заранее записана в память бортового компьютера. Система автоматической идентификации наземных навигационных ориентиров с известными координатами в очередных промежуточных пунктах маршрута с использованием имеющихся на борту данных, по сути, обеспечивает возможность альтернативного глобального позиционирования. Правильное функционирование такой комплексной навигационной системы на достаточно продолжительных участках траектории полета прежде всего зависит от точности входящих в нее элементов. С учетом того что классические датчики навигационной информации, такие как бесплатформенная инерциальная навигационная система и высотомер, достаточно хорошо исследованы в многочисленных научных публикациях, основное внимание в статье уделено бортовой оптико-электронной системе беспилотного летательного аппарата, в частности особенностям ее применения в качестве навигационного датчика. Рассмотрены факторы, влияющие на точность определения координат беспилотного летательного аппарата в промежуточных пунктах маршрута по данным бортовой оптико-электронной системы. Представлена разработанная математическая модель ошибок инерциально-оптического навигационного комплекса беспилотного летательного аппарата. Проведен анализ влияния погрешностей бортового высотомера, характеристик рельефа подстилающей местности и смещения оптической оси бортовой цифровой камеры, вызванного случайными эволюциями корпуса носителя в турбулентной атмосфере, на точность позиционирования. Приведены результаты расчета погрешностей определения координат беспилотного летательного аппарата, оснащенного инерциально-оптическим навигационным комплексом.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, бесплатформенная инерциальная навигационная система, оптико-электронная система, математическая модель ошибок инерциально-оптического навигационного комплекса.

Для цитирования: Шейников А.А., Коваленко А.М., Санько А.А. Точность определения координат беспилотного летательного аппарата с навигационным комплексом, включающим оптико-электронную систему позиционирования // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 1. С. 81–94. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-81-94

The accuracy of determining the coordinates of an unmanned aerial vehicle with a navigation complex integrating an electro-optical positioning system

A.A. Sheinikov¹, A.M. Kovalenko¹, A.A. Sanko²

¹ Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus

² Belorussian State Aviation Academy, Minsk, Belarus

Abstract: The article proposes the approaches to updating a strapdown inertial navigation system (SINS) based on data of the airborne electro-optical system (EOS) of an unmanned aerial vehicle (UAV). It is specified that the EOS is presented

as a navigation data sensor. The rationale for the feasibility of such an approach is formed, especially in the terms of signal lack or suppression of satellite radio-navigation systems. It is proposed to ensure the accuracy of self-contained navigation by assigning an UAV route, including waypoints with terrestrial references (TRs). Notably, TR-associated image information is preliminarily downloaded into the flight management computer (FMC). The automated TR identification system with denoted coordinates at next waypoints, using airborne data, in fact, allows for alternative global positioning. The reliable operation of such an integrated navigation system over sufficiently extended legs of flight path, first, depends on the accuracy of its constituent elements. Taking into consideration the fact that conventional sensors of navigation information, such as a SINS and an altimeter, are quite well studied in numerous contributions. The article focuses on the UAV airborne electro-optical system and, specifically, on its application features as a navigation sensor. The factors influencing the accuracy of the UAV positioning data determination at waypoints according to the data of the airborne EOS are considered. The developed mathematical model of errors for the UAV inertial optical navigation complex (IONC) is presented. The analysis of the impact of airborne altimeter inaccuracies, earth's surface features and the shift of the onboard digital camera optical axis, caused by random evolutions of the carrier body in turbulent atmosphere on the positioning accuracy, was conducted. The results of calculating lapses in determining the UAV positioning data, equipped with IONC, are given.

Key words: unmanned aerial vehicle, strapdown inertial navigation system, electro-optical system, mathematical model of errors for the inertial optical navigation complex.

For citation: Sheinikov, A.A., Kovalenko, A.M. & Sanko, A.A. (2023). The accuracy of determining the coordinates of an unmanned aerial vehicle with a navigation complex integrating an electro-optical positioning system. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 1, pp. 81–94. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-81-94

Введение

Основными способами борьбы с беспилотными летательными аппаратами (БЛА) в настоящее время являются применение стрелкового оружия, применение лазерного оружия, применение микроволновых и акустических установок для воздействия на бортовую микроэлектронику, постановка радиоэлектронных помех, воздействующих на каналы связи, спутниковой навигации и управления [1, 2]. Наиболее эффективным способом является применение средств радиоэлектронного подавления сигналов спутниковых радионавигационных систем и сигналов управления [3, 4]. Так, например, ОАО «КБ "Радар"» (Республика Беларусь) выпускает ряд средств радиоэлектронной борьбы с БЛА, имеющих дальность радиоподавления до 40 км.

В условиях подавления сигналов радиоуправления и сигналов спутниковых радионавигационных систем основным источником навигационной информации становится бортовая бесплатформенная инерциальная навигационная система (БИНС), являющаяся автономным датчиком [5]. Однако ее использование требует периодической коррекции для устранения накапливающихся погрешностей определения координат носителя [6].

Поэтому в настоящее время актуальной задачей является разработка дополнительных, более точных по сравнению с БИНС, автономных бортовых навигационных систем, основанных на других физических принципах [7–9]. Многочисленные публикации, посвященные рассматриваемой проблеме, свидетельствуют о значительном росте интереса к использованию для коррекции БИНС информации от бортовых оптико-электронных систем БЛА [10–18].

Целью данной работы является разработка математической модели ошибок инерциально-оптического навигационного комплекса БЛА для обоснования требований к характеристикам его элементов.

Методы и методология исследования

Для достижения поставленной цели был принят ряд следующих допущений.

1. БИНС определяет параметры ориентации БЛА с постоянными погрешностями.

2. Измерение пространственных координат осуществляется постоянно с помощью БИНС и периодически (в установленных навигационных точках) с помощью оптико-электронной системы (ОЭС), зафиксированной в центре масс БЛА.

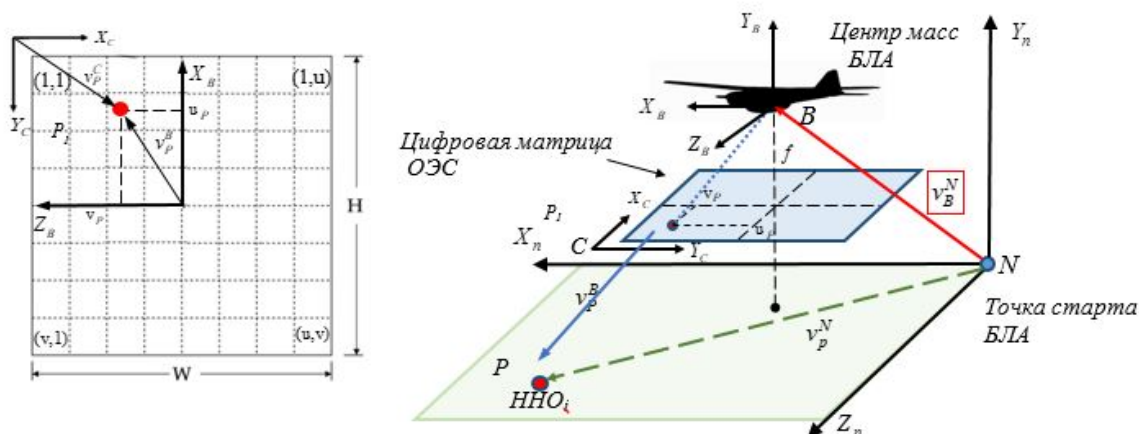


Рис. 1. Графическое представление систем координат для описания положения БЛА относительно ННО

Fig. 1. Graphical representation of the coordinate system for the description of UAV position relatively TRs

3. Оптическая ось ОЭС направлена вертикально вниз (в надир) (углы установки камеры полностью зависят от углов тангажа и крена БЛА).

4. Вибрации, передающиеся с планера БЛА, не учитываются.

5. Частота измерений бортовой БИНС намного выше частоты случайных колебаний, вызванных турбулентностью атмосферы.

6. Частота съемки местности с помощью ОЭС такова, что наземный навигационный ориентир (ННО) гарантированно попадает в зону обзора в очередном промежуточном пункте маршрута.

7. Вероятность распознавания и идентификации очередного ННО с помощью алгоритмов бортовой вычислительной системы БЛА [19] равна единице.

8. После распознавания ННО, определения его положения на цифровом изображении участка местности и проведения необходимых фотограмметрических расчетов координаты центра масс БЛА принимаются точными.

9. Подстилающая поверхность описывается моделью плоской Земли с различными типами рельефа.

Для обеспечения решения задачи были проведены предварительные операции.

1. Выбор систем координат БЛА для описания относительного положения БЛА и ННО

Для описания положения БЛА относительно ННО принята нормальная неподвиж-

ная система координат (СК) $NX_nY_nZ_n$. Начало СК находится в центре стартового навигационного ориентира (точка N на рис. 1). Координаты БЛА (точка B на рис. 1) описываются вектором $v_N^B = [x_{NB}, y_{NB}, z_{NB}]^T$. Координаты очередного ННО определяются вектором $v_P^N = [x_P, y_P, z_P]^T$ в неподвижной СК.

Вектор v_P^N формируется в процессе подготовки полетного задания и известен в начальный момент времени. Для описания положения проекции ННО на плоскости изображения P_i (рис. 1) принята система координат бортовой ОЭС $CX_CY_CZ_C$.

Значения вектора v_B^N принимаются неизвестными. Вектор v_P^B характеризует положение БЛА относительно ННО. Его значения находятся на основании данных о положении ННО в кадре.

Используя введенные СК, можно определить собственные координаты БЛА в неподвижной земной СК следующим образом:

$$v_B^N = v_P^N - v_P^C C_B^N C_C^B, \quad (1)$$

где C_C^B – постоянная переходная матрица из связанной СК в систему координат ОЭС;

C_B^N – переходная матрица поворота из системы координат ОЭС в неподвижную СК.

2. Формирование переходных матриц пересчета

Матрица перехода C_B^N из системы координат ОЭС в неподвижную СК на основе информации об угловом положении БЛА находится в соответствии с известными выражениями [10]:

$$C_B^N = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \vartheta & -\sin \vartheta & -\sin \psi \cos \vartheta \\ \sin \psi \sin \gamma - \cos \psi \sin \vartheta \cos \gamma & \cos \vartheta \cos \gamma & \cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin \vartheta \cos \gamma \\ \sin \psi \cos \gamma + \cos \psi \sin \vartheta \sin \gamma & -\cos \vartheta \sin \gamma & \cos \gamma \cos \psi - \sin \psi \sin \vartheta \sin \gamma \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где γ, ϑ, ψ – углы крена, тангажа и курса БЛА.

3. Определение связи между координатами БЛА и координатами ННО

В качестве модели, описывающей геометрию бортового оптического устройства, выбрана модель камеры-обскуры (рис. 1). Координаты точки местности (составляющие вектора v_P^C) связаны с пиксельными координатами на плоскости изображения (u_P, v_P) следующими соотношениями [20]:

$$x_{CP} = x_{u_P} \frac{H}{f} = \frac{(u_C - u_P)y_{CP}a_{mat}^u}{f}; \quad z_{CP} = y_{v_P} \frac{H}{f} = \frac{(v_C - v_P)y_{CP}a_{mat}^v}{f}, \quad (4)$$

где u_C, v_C – координаты (в пикселах) центра бортовой системы наблюдения; f – фокусное расстояние объектива ОЭС; H – высота полета БЛА; a_{mat}^u, a_{mat}^v – физические размеры пиксела, зависящие от типа матрицы ОЭС.

Уравнения (1)–(4) описывают связь между координатами БЛА, его угловой ориентацией и координатами ННО в неподвижной СК. В скалярной записи эти уравнения принимают вид

$$\begin{cases} x_{NB} = x_P - \frac{(u_C - u_P)y_{CP}a_{mat}^u}{f} \cdot \cos \psi \cos \vartheta + \frac{(v_C - v_P)y_{CP}a_{mat}^v}{f} \cdot \sin \vartheta + y_{CP} \sin \psi \cos \vartheta; \\ z_{NB} = y_P - \left(\frac{(u_C - u_P)y_{CP}a_{mat}^u}{f} \cdot (\sin \psi \sin \gamma - \cos \psi \sin \vartheta \cos \gamma) + \right. \\ \quad \left. + \frac{(v_C - v_P)y_{CP}a_{mat}^v}{f} \cdot \cos \vartheta \cos \gamma + y_{CP}(\cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \sin \vartheta \cos \gamma) \right); \\ y_{NB} = y_P + \left(\frac{(u_C - u_P)y_{CP}a_{mat}^u}{f} \cdot (\sin \psi \cos \gamma + \cos \psi \sin \vartheta \sin \gamma) - \right. \\ \quad \left. - \frac{(v_C - v_P)y_{CP}a_{mat}^v}{f} \cdot \cos \vartheta \sin \gamma + y_{CP}(\cos \gamma \cos \psi - \sin \psi \sin \vartheta \sin \gamma) \right). \end{cases} \quad (5)$$

Изображение, полученное в процессе аэрофотосъемки, содержит искажения геометрического и физического характера [20]. Факторы, влияющие на точность определения координат БЛА по данным ОЭС, представлены в табл. 1.

Таблица 1
Table 1

Факторы, влияющие на точность определения координат БЛА по данным ОЭС
Factors, determining the accuracy of identifying UAV coordinates according to EOS data

Фактор	Краткое описание
Смещения точек, вызванные ошибкой определения высоты	Точность оптической системы зависит от погрешности измерений бортового высотомера. Основными источниками информации о высоте полета для малоразмерных БЛА являются барометрические и радиовысотомеры
Смещения точек на снимке, вызванные рельефом местности	Масштаб изображения точек возвышения рельефа крупнее масштаба изображения точек средней плоскости снимка. Масштаб изображения точек понижения рельефа мельче масштаба изображения точек средней плоскости снимка
Смещения точек на снимке, вызванные наклоном оптической оси	На наклонном снимке точки смещены от положений, которые они должны занимать на горизонтальном снимке, полученном той же камерой из того же центра проекции. Основным источником возникновения погрешностей являются ошибки определения углов ориентации БЛА с помощью бортовой БИНС

4. Оценка влияния погрешности бортового высотомера на точность позиционирования

Приближенная оценка погрешности измерения текущей высоты полета с помощью радиовысотомера (РВ) на высотах от 60 до 750 м над равнинной местностью с вероятностью 95 % может быть рассчитана по формуле $\Delta H = \pm 0,06H$. В литературе [21] приводится вариант оценки СКО ошибки измерения истинной высоты с помощью радиовысотомера:

$$\sigma_H = \frac{c}{4\pi\nu q T_H}, \quad (6)$$

где c – скорость света в вакууме; ν – скорость изменения частоты; q – отношение сигнал/шум; T_H – длина интервала наблюдения.

На рис. 2 показано графическое представление влияния погрешности определения высоты на точность позиционирования без учета изменений рельефа местности. Ошибка позиционирования, обусловленная погрешностью определения высоты полета БЛА, может быть рассчитана по формуле [20]

$$\sigma_{PB, OЭС}^H = r \frac{\sigma_H}{H}. \quad (7)$$

Также на рис. 2 представлены результаты моделирования при следующих начальных условиях: $H = 500$ м, $\sigma_H = 10$ м. Координата ННО (точка А) отдалается от проекции главной точки (точка О на рис. 2) до момента выхода за пределы ПЗС-матрицы (картинной плоскости). При этом в каждой точке производится измерение координат проекции ННО. Распределение оценок СКО проекций ННО на ПЗС-матрицу показано на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что при увеличении отдаления координаты ННО от проекции главной точки картинной плоскости происходит увеличение значений СКО проекций ННО на плоскость изображения.

5. Оценка влияния рельефа местности на точность позиционирования

Согласно инструкции¹ местность по характеру рельефа делится на группы (табл. 2).

Смещение точек на кадре, вызванное влиянием рельефа местности, объясняется тем, что масштаб их изображений крупнее масштаба средней плоскости снимка при поло-

¹ Инструкция по топографической съемке: [ГКИНП-02-033-82: введен 01.01.1983]. М.: Недра, 1985. 151 с.

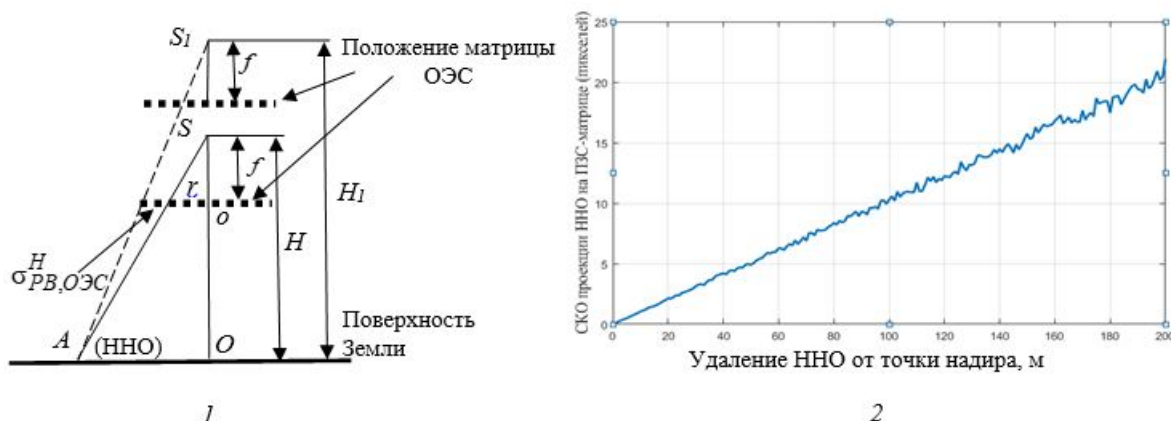


Рис. 2. Влияние погрешностей высотомера на точность позиционирования:
1 – графическое представление влияния погрешности определения высоты;
2 – смещение проекции ННО

Fig. 2. Effect of altimeter lapses on the positioning accuracy:
1 – graphical representation of the lapse effect of determining height; 2 – TR projection offset

Таблица 2
Table 2

Классификация рельефа по крутизне земной поверхности
Classification of the relief according to earth's surface gradient

Тип рельефа	Угол наклона α_m , град	Перепад рельефа h_m на 100 м, м
Равнинно-плоский	до 0,5	до 0–9
Равнинно-волнистый	0,5–1	0,9–1,75
Равнинно-холмистый	1–4	1,75–7
Холмистый	4–7	7–12,3
Гористый	7–24	12,3–44,5

жительном превышении и мельче при отрицательном превышении. Линейное искаже-

ние, обусловленное перепадом рельефа h_m , может быть оценено следующим образом:

$$\sigma_{OЭC}^{pm} = \frac{h_m r \cos \alpha_m}{H h_m} \sqrt{1 + \frac{f^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_m}{r^2} + 2 \frac{f \operatorname{tg} \alpha_m}{r} \cdot \sin \varphi}, \quad \sigma_{OЭC}^{pm} = r \frac{h_m}{H} \quad \text{при } \alpha_m = 0. \quad (8)$$

Графическое представление влияния перепада рельефа на положение проекции ННО в кадре, смещение проекции для различных типов рельефа показано на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что, если ННО располагается на средней плоскости снимка (совпадает с точкой надира), смещение точек отсутствует. Для уменьшения влияния перепада рельефа местности следует увеличивать высоту съемки либо фокусное расстояние.

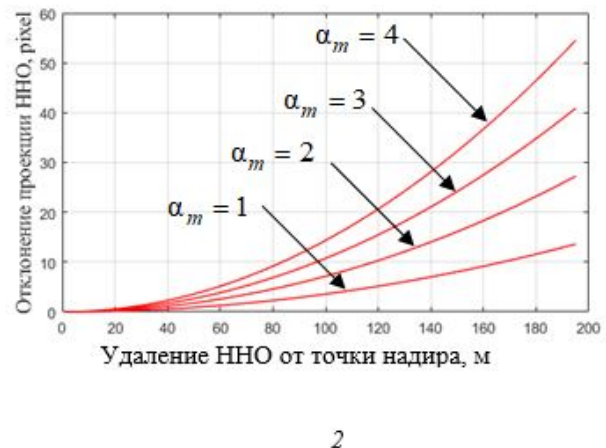
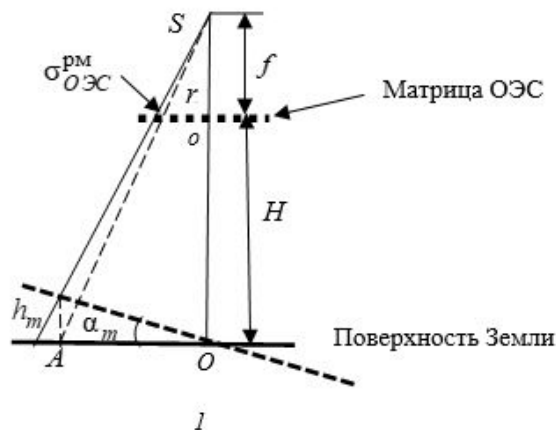


Рис. 3. Влияние перепада рельефа на положение проекции ННО на матрицу ОЭС:
1 – графическое представление влияния перепада рельефа; 2 – смещение проекции ННО для различных α_m

Fig. 3. Influence of relief difference on the TR projection position on the EOS matrix:
1 – graphical representation of relief difference effect; 2 – TR projection offset for various α_m

6. Оценка влияния смещения оптической оси цифровой камеры на точность определения координат БЛА инерциально-оптическим навигационным комплексом

На малоразмерных БЛА ОЭС жестко закреплена в корпусе фюзеляжа. При таком исполнении угол наклона оптической оси цифровой камеры определяется по данным бортовой БИНС. Погрешности определения углов крена и тангажа в момент съемки влияют на точность определения положения ННО в координатной системе изображения. На наклонном снимке точки смещены от положений, которые они должны занимать на горизонтальном снимке, полученном той же ОЭС из того же центра проекции (рис. 4).

Оценка смещения точки на снимке, вызванного его наклоном, находилась следующим образом [20]:

$$\sigma_{\text{ИОНК}}^{\text{БИНС}} = \frac{r^2 \cos \varphi \sin(\alpha_c \sigma_9^{\text{БИНС}})}{f}, \quad (9)$$

где r – радиус-вектор от точки нулевых искажений до точки на снимке; α_c – суммарный угол наклона снимка; φ – угол поворота радиус-вектора против часовой стрелки от полярной оси, который характери-

зует точку проекции ННО на ПЗС-матрицу ОЭС.

На рис. 5 показаны результаты моделирования смещения проекции ННО на ПЗС-матрицу ОЭС при изменении координаты ННО. При полете БЛА над ННО на высоте $H = 500$ м, когда оптическая ось направлена на надир ($\alpha_c = 0$), точность бортовой БИНС при определении углов тангажа и крена составляет $\sigma_9^{\text{БИНС}} = \sigma_\gamma^{\text{БИНС}} = 0,5^\circ$. ННО находится на линии заданного пути ($\varphi = 0$). Также на рис. 5 показаны результаты моделирования в случае установки оптической оси ОЭС на угол $\alpha_c = 15^\circ$ при угле φ равном: $\varphi = 0^\circ, \varphi = 30^\circ, \varphi = 60^\circ, \varphi = 90^\circ$.

Из рис. 5 видно, что величина искажения $\sigma_{\text{ИОНК}}^{\text{БИНС}}$ тем больше, чем больше угол наклона α_c и чем меньше фокусное расстояние камеры f . При постоянных значениях α_c и f величина искажения зависит от положения точки на снимке, т. е. от величин угла φ и радиуса вектора r . На линии неискаженных масштабов $h_c - h_c$ величины искажений $\sigma_{\text{ИОНК}}^{\text{БИНС}}$ равны нулю. Результирующее соот-

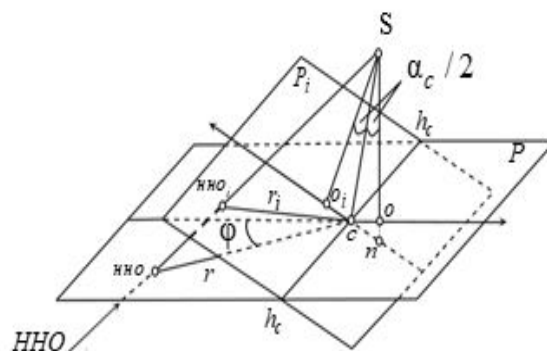


Рис. 4. Смещение точек в кадре, обусловленное углами крена и тангажа
Fig. 4. Shift of points in the image specified with roll and pitch angles

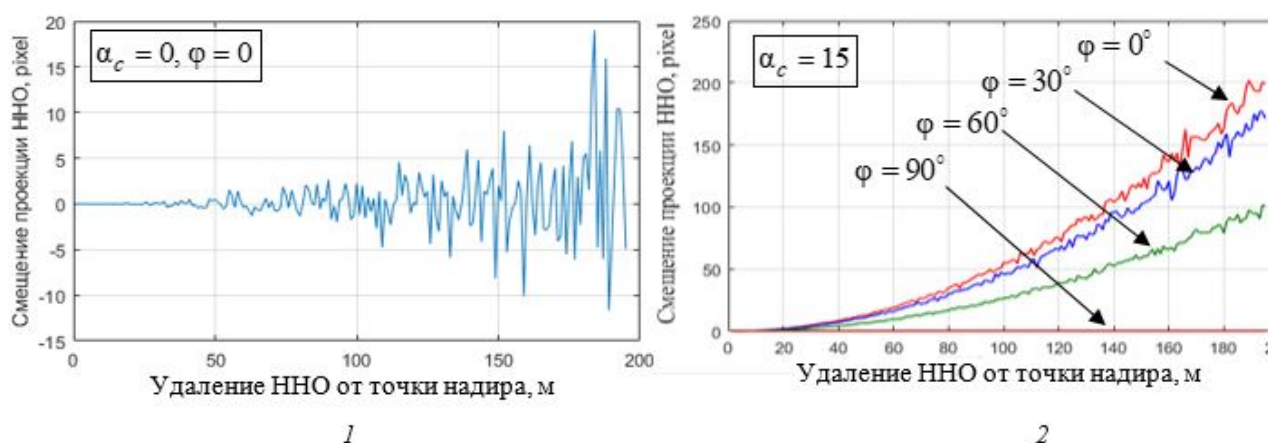


Рис. 5. Линейные искажения, вызванные влиянием угла наклона плоскости изображения:
1 – смещение проекции ННО при $\alpha_c = 0$, $\varphi = 0$; 2 – смещение проекции ННО при $\alpha_c = 15$
Fig. 5. Linear distortions caused by the effect of the inclination angle of the image plane:
1 – TR projection offset at $\alpha_c = 0$, $\varphi = 0$; 2 – TR projection offset at $\alpha_c = 15$

ношение для расчета СКО ошибок определения координат БЛА имеет вид

$$\sigma_R = \sqrt{(\sigma_{PB, OЭС}^H)^2 + (\sigma_{OЭС}^{PM})^2 + (\sigma_{ИОНК}^{БИНС})^2}. \quad (10)$$

В результате проведенных исследований получена математическая модель ошибок ИОНК (включающего БИНС, ОЭС и РВ) (рис. 6).

В процессе исследований проведено моделирование пролета БЛА, оснащенного ИОНК (включающим БИНС, РВ и ОЭС).

Имитировался пролет БЛА над точкой, представляющей собой центр ННО, с известными координатами. Во время пролета ОЭС фиксировала ее координаты с частотой 10 кадров/с. Далее по полученной информации, с учетом погрешностей определения высоты и угловой ориентации носителя, рассчитывались координаты БЛА в неподвижной СК. В качестве бортовой ОЭС была выбрана цифровая камера Sony ILCE-600. Значения параметров моделирования указаны в табл. 3 [22].

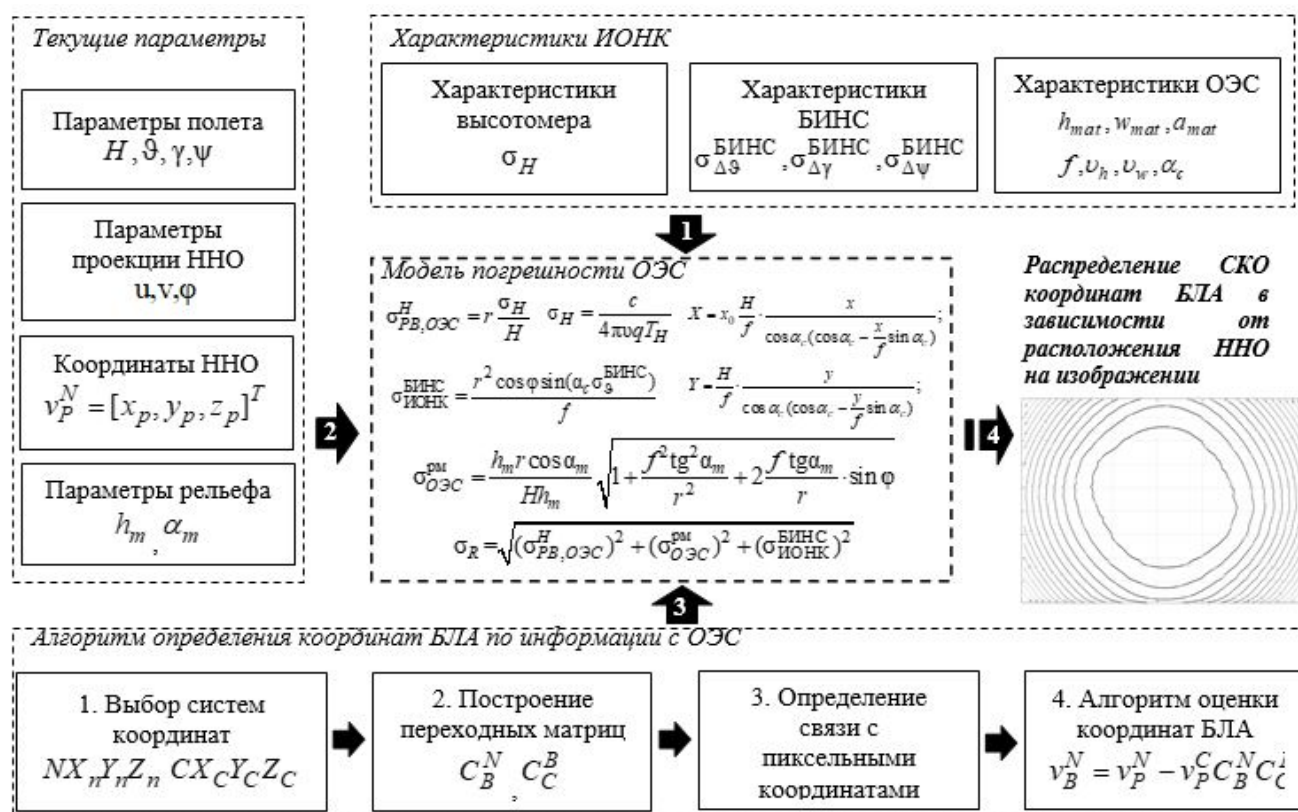


Рис. 6. Математическая модель ошибок ИОНК
Fig. 6. Mathematical model of IONC errors

Таблица 3
Table 3

Параметры моделирования
Simulation parameters

Параметр	Значение
Высота полета, м	500
Погрешность высотомера (СКО, м)	20
Значения углов ориентации БЛА, град (γ, ϑ, ψ)	0–15, 0–15, 0–15
Погрешность БИНС при определении углов ориентации	(0,5; 0,5; 1)
Размер матрицы ОЭС, мм	15,6 × 23,5
Разрешение снимка, пиксели	6000 × 4000
Фокусное расстояние, мм	20
Значение перепада рельефа h_m на 100 м, м	2

Результаты исследования

В процессе моделирования были получены графики распределения значений СКО

ошибок определения координат БЛА в зависимости от высоты полета БЛА, угла установки оптической оси ОЭС и удаления ННО от точки надира (рис. 7).

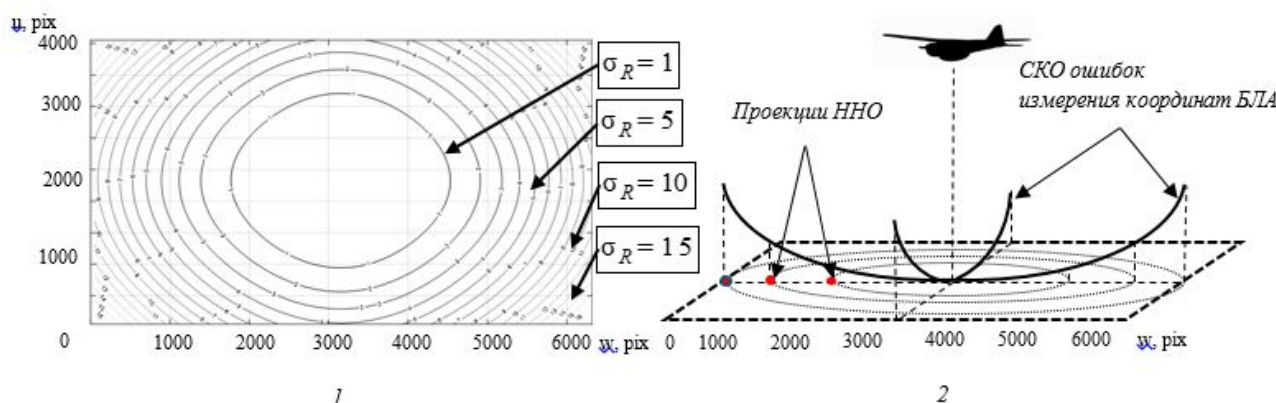


Рис. 7. Распределение значений СКО ошибок определения координат БЛА:
1 – на плановом снимке; 2 – в трехмерном представлении

Fig. 7. Distributions of standard deviation values of identifying UAV coordinates:
1 – in the routine image; 2 – in the three-dimensional representation

Обсуждение полученных результатов

Анализ результатов моделирования показал, что при оценке координат БЛА по перспективным изображениям погрешность значительно увеличивается. Наименьшее значение ошибок определения координат БЛА достигается при нахождении ННО в центре планового снимка. Таким образом, исследования показали, что имеется возможность существенно снизить погрешности определения координат БЛА и тем самым повысить точность позиционирования БЛА в условиях радиоэлектронного подавления. Так, например, при высоте полета БЛА $H = 500$ м над равнинным рельефом, скорости полета 20 м/с, расстоянии до ННО 3000 м, СКО оценок истинной высоты радиовысотометром $\sigma_H = 10$ м, СКО оценок углов ориентации БИНС $\sigma_{\gamma}^{\text{БИНС}} = \sigma_{\theta}^{\text{БИНС}} = 0,5^\circ$ бортовой ОЭС на базе цифровой камеры Sony ILCE-600, установленной в нади́р, можно снизить (по сравнению с БИНС) ошибку определения координат на порядок (с 150 до 14 м). На рис. 8

показаны результаты сравнительного анализа точности БИНС и ИОНК. Коррекция навигационной информации БИНС по данным ОЭС производилась по разомкнутой схеме комплексирования [23].

Проверка адекватности разработанной математической модели ИОНК осуществлялась путем сравнения результатов моделирования с результатами полунатурного эксперимента. Полеты БЛА С-350 Supercam с камерой, схожей по характеристикам с камерой Sony ILCE-600, осуществлялись на высотах 300, 500, 900 м, координаты ННО получались по данным картографического сервиса Google Maps, также использовались данные телеметрии БЛА. В результате сделан вывод: расчетная и экспериментальные выборки оцениваемых параметров качества (ошибка определения координат БЛА) принадлежат одной и той же генеральной совокупности по критерию Пирсона χ^2 [24, 25]. Полученная степень адекватности математической модели – высокая (доверительная вероятность результатов математического моделирования более 0,9 при относительной погрешности не более 10 %).

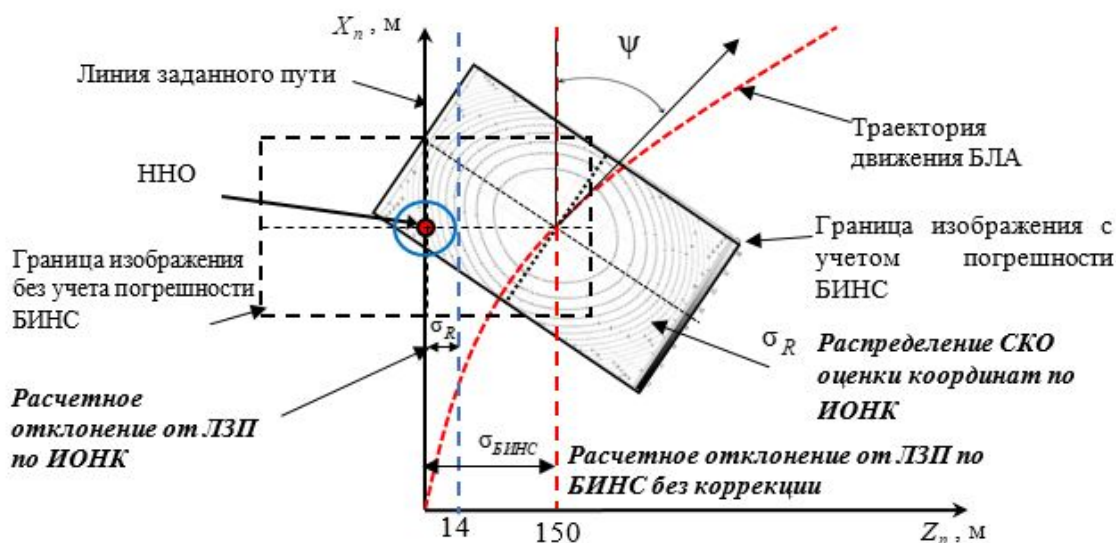


Рис. 8. Результаты сравнительного анализа точности БИНС и ИОНК, работающих автономно

Fig. 8. Results of the comparative analysis of self-contained SINS and IONC accuracy

Заключение

Таким образом, разработанная математическая модель ИОНК БЛА отличается учетом погрешности определения истинной высоты полета БЛА, погрешностей определения углов ориентации БЛА, что позволяет обосновать требования к характеристикам элементов ИОНК: цифровой камере, бортовому высотомеру и БИНС БЛА. В случае удовлетворения этих требований точность определения координат предлагаемым навигационным комплексом может на порядок превышать точность определения координат БИНС БЛА в условиях отсутствия внешних радиосигналов управления и сигналов спутниковых радионавигационных систем.

Список литературы

1. Теодорович Н.Н., Строганова С.М., Абрамов П.С. Способы обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами [Электронный ресурс] // Интернет-журнал Науковедение. 2017. Т. 9, № 1. С. 13. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/13TVN117.pdf> (дата обращения: 09.08.2022).
2. Макаренко С.И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам: моно-

графия. СПб.: Научные технологии, 2020. 204 с.

3. Akos D.M. Who's afraid of the spoofer? GPS/GNSS spoofing detection via automatic gain control (AGC) // Journal of the Institute of Navigation. 2012. Vol. 59, no.4. Pp. 281–290. DOI: 10.1002/navi.19

4. Seong-Hun S. Effect of spoofing on unmanned aerial vehicle using counterfeited GPS signal / S. Seong-Hun, L. Byung-Hyun, I. Sung-Hyuck, J. Gyu-In // Journal of Positioning Navigation and Timing. 2015. Vol. 4, iss. 2. Pp. 57–65. DOI: 10.11003/JPNT.2015.4.2.057

5. Алалуев Р.В., Ладонкин А.В., Малиутин Д.М. и др. Микросистемы ориентации беспилотных летательных аппаратов / Под ред. В.Я. Распопова. М.: Машиностроение, 2011. 184 с.

6. Пролетарский А.В., Неусыпин К.А. Способы коррекции навигационных систем и комплексов летательных аппаратов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. 2012. № 3 (3). С. 44.

7. Сырякин В.И., Шидловский В.С. Корреляционно-экстремальные радионавигационные системы. Томск: Изд-во Томского университета, 2010. 316 с.

8. **Аванесов Г.А.** Принципы построения астроинерциальной системы авиационного применения / Г.А. Аванесов, Р.В. Бессонов, А.Н. Куркина, М.Б. Людомирский, И.С. Каютин, Н.Е. Ямщиков // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2013. Т. 10, № 2. С. 9–29.

9. **Амелин К.С.** Метод ориентирования сверхлегкого БПЛА при редком обновлении данных о его местоположении // Стохастическая оптимизация в информатике. 2014. Т. 10, № 2. С. 3–14.

10. **Веремеенко К.К., Желтов С.Ю., Ким Н.В.** Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов / Под ред. М.Н. Красильщикова, Г.Г. Серебрякова. М.: Физматлит, 2009. 272 с.

11. **Алешин Б.С.** Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / Б.С. Алешин, А.А. Афонин, К.К. Веремеенко, Б.В. Кошелев, В.Е. Плеханов. М.: Физматлит, 2006. 421 с.

12. **Lerner R., Rivlin E.** Direct method for video-based navigation using a digital terrain map // IEEE Trans Pattern Anal Mach Intelligence. 2011. Vol. 33, no. 2. Pp. 406–411. DOI: 10.1109/TPAMI.2010.171

13. **Биард Р., Маклэйн Т.** Малые беспилотные летательные аппараты: теория и практика. М.: Техносфера, 2015. 312 с.

14. **Хекер П.** Позиционирование ЛА по видеоданным для контроля интегрированной навигационной системы при заходе на посадку / П. Хекер, У. Бестманн, С.Ю. Волков, М. Ангерманн, А. Декирт // Гироскопия и навигация. 2019. Т. 27, № 4 (107). С. 29–51. DOI: 10.17285/0869-7035.0011

15. **Антонов Д.А.** Определение навигационных параметров беспилотного летательного аппарата на базе фотоизображения и инерциальных измерений / Д.А. Антонов, М.В. Жарков, И.М. Кузнецов, Е.М. Лунев, А.Н. Пронькин [Электронный ресурс] // Труды МАИ. 2016. № 91. С. 1–26. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=75632> (дата обращения: 14.06.2022).

16. **Желтов С.Ю., Визильтер Ю.В.** Перспективы интеллектуализации систем управ-

ления ЛА за счет применения технологий машинного зрения // Труды МФТИ. 2009. Т. 1, № 4. С. 164–181.

17. **Алпатов Б.А.** Исследование эффективности применения алгоритмов анализа изображений в задаче навигации беспилотных летательных аппаратов / Б.А. Алпатов, В.С. Муравьев, В.В. Стротов, А.Б. Фельдман // Цифровая обработка сигналов. 2012. № 3. С. 29–34.

18. **Lee D., Kim Y., Bang H.** Vision-based terrain referenced navigation for unmanned aerial vehicles using homography relationship // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2013. No. 69. Pp. 489–497. DOI: 10.1007/s10846-012-9750-1

19. **Николаев С.В.** Определение в испытаниях вероятности обнаружения наземных объектов с борта летательного аппарата // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 5. С. 131–144. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-5-131-144

20. **Назаров А.С.** Фотограмметрия. Минск: ТетраСистемс, 2006. 368 с.

21. **Монаков А.А.** Теоретические основы радионавигации: учеб. пособие. СПб.: СПбГУАП, 2002. 70 с.

22. **Матвеев В.В.** Инженерный анализ погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. № 9-2. С. 251–267.

23. **Степанов О.А.** Применение теории нелинейной фильтрации в задачах обработки навигационной информации: монография. СПб.: ГНЦ РФ: ЦНИИ «Электроприбор», 1998. 370 с.

24. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей. М.: Академия, 2005. 576 с.

25. **Козбарь А.И.** Прикладная математическая статистика: для инженеров и научных работников / Под ред. В.С. Ороловича. 2-е изд., испр. М.: Физматлит, 2012. 816 с.

References

1. **Teodorovich, N.N., Stroganova, S.M. & Abramov, P.S.** (2017). *Methods for detection and control of small-sized unmanned aerial vehicles*. Internet-zhurnal Naukovedeniye, vol. 9,

no. 1, p. 13. Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/13TVN117.pdf> (accessed: 09.08.2022). (in Russian)

2. **Makarenko, S.I.** (2020). [*Countermeasures against unmanned aerial vehicles: Monography*]. St. Petersburg: Naukoyemkiye tehnologii, 204 p. (in Russian)

3. **Akos, D.M.** (2012). *Who's afraid of the spoofer? GPS/GNSS spoofing detection via automatic gain control (AGC)*. Journal of the Institute of Navigation, vol. 59, no. 4, pp. 281–290. DOI: 10.1002/navi.19

4. **Seong-Hun, S., Byung-Hyun, L., Sung-Hyuck, I. & Gyu-In, J.** (2015). *Effect of spoofing on unmanned aerial vehicle using counterfeited GPS signal*. Journal of Positioning Navigation and Timing, vol. 4, issue 2, pp. 57–65. DOI: 10.11003/JPNT.2015.4.2.057

5. **Alaluev, R.V., Ladonkin, A.V. & Malyutin, D.M. et al.** (2011). [*Microsystems of orientation of unmanned aerial vehicles*], in Raspopov V.Ya. (Ed.). Moscow: Mashinostroyeniye, 184 p. (in Russian)

6. **Proletarsky, A.V. & Neusypin, K.A.** (2012). *Methods for correction of navigation systems and complexes of flying vehicles*. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Bauman, no. 3 (3), p. 44. (in Russian)

7. **Syryamkin, V.I. & Shidlovskiy, V.S.** (2010). [*Correlation-extreme radio navigation systems*]. Tomsk: Izdatelstvo Tomskogo universiteta, 316 p. (in Russian)

8. **Avanesov, G.A., Bessonov, R.V., Kurkina, A.N., Ludomirskiy, M.B., Kayutin, I.S. & Yamshikov, N.E.** (2013). *The principles of creating airborne stellar-inertial system*. Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa, vol. 10, no. 2, pp. 9–29. (in Russian)

9. **Amelin, K.S.** (2014). [*Positioning methods for ultra-light unmanned aerial vehicles with a rare update of its location data*]. Stokhasticheskaya optimizatsiya v informatike, vol. 10, no. 2. pp. 3–14. (in Russian)

10. **Veremeenko, K.K., Zheltov, S.Yu. & Kim, N.V.** (2009). [*Modern IT technologies for unmanned maneuverable aerial vehicles navigating and guidance*], in Krasilshchikov M.N.,

Serebryakov G.G. (Ed.). Moscow: Fizmatlit, 272 p. (in Russian)

11. **Alyoshin, B.S., Afonin, A.A., Veremeenko, K.K., Koshelev, B.V. & Plekhanov, V.E.** (2006). [*Positioning and navigation of moving objects: modern IT*]. Moscow: Fizmatlit, 423 p. (in Russian)

12. **Lerner, R. & Rivlin, E.** (2011). *Direct method for video-based navigation using a digital terrain map*. IEEE Trans Pattern Anal Mach Intelligence, vol. 33, no. 2, pp. 406–411. DOI: 10.1109/TPAMI.2010.171

13. **Beard, R.W. & McLain, T.W.** (2012). *Small unmanned aircraft: theory and practice*. 2nd ed. Princeton University Press, 320 p.

14. **Hecker, P., Bestmann, U., Wolkow, S., Angermann, M. & Dekiert, A.** (2019). *Optical aircraft positioning for monitoring of the integrated navigation system during landing approach*. Giroskopiya i Navigatsiya, vol. 27, no. 4 (107), pp. 29–51. DOI: 10.17285/0869-7035.0011

15. **Antonov, D.A., Zarkov, M.V., Kuznecov, I.M., Lunev, E.M. & Pron'kin, A.N.** (2016). *Unmanned aerial vehicle positioning based on photographic image and inertial measurements*. Trudy MAI, no. 91, pp. 1–26. Available at: <https://pureportal.spbu.ru/publications> (accessed: 14.06.2022). (in Russian)

16. **Zheltoy, S.Yu. & Vizilter, Yu.V.** (2009). [*Possibilities for the intellectualization of aircraft control systems through the use of machine vision technologies*]. Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology, vol. 1, no. 4, pp. 164–181. (in Russian)

17. **Alpatov, B.A., Muraviev, V.S., Strotov, V.V. & Feldmann, A.B.** (2012). [*Research of the effectiveness of the image application analysis algorithms in the problem of navigating unmanned aerial vehicles*]. Digital Signal Processing, no. 3, pp. 29–34. (in Russian)

18. **Lee, D., Kim, Y. & Bang, H.** (2013). *Vision-based terrain referenced navigation for unmanned aerial vehicles using homography relationship*. Journal of Intelligent & Robotic Systems, no. 69, pp. 489–497. DOI: 10.1007/s10846-012-9750-1

19. **Nikolaev, S.V.** (2017). *Test determination of probability of airborne detection of*

ground surface objects. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 5, pp. 131–144. DOI: 10.26467/2079-0619-2017-20-5-131-144 (in Russian)

20. **Nazarov, A.S.** (2006). [*Photogrammetry*]. Minsk: TetraSystems, 368 p. (in Russian)

21. **Monakov, A.A.** (2002). [*Theoretical foundations of radio navigation: Tutorial*]. St. Petersburg: SPbGUAP, 70 p. (in Russian)

22. **Matveev, V.V.** (2014). *The engineering analysis of lapses of strapdown inertial navigational system*. Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki, no. 9-2. pp. 251–267. (in Russian)

23. **Stepanov, O.A.** (1998). [*A use of the nonlinear filtering theory in the processing navigational information: monograph*]. St. Petersburg: GNTS RF: TSNII «Elektropribor», 370 p. (in Russian)

24. **Ventzel, E.S.** (2005). [*Probability theory*]. Moscow: Academiya, 576 p. (in Russian)

25. **Kozbar, A.I.** (2012). [*Applied mathematical statistics: for engineers and scientists*], in Orolovich V.S. (Ed.). 2nd ed., ispr. Moscow: Fizmatlit, 816 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Шейников Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент, докторант кафедры авиационной техники и вооружения учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», af.varb.ao@gmail.com.

Коваленко Александр Михайлович, старший преподаватель кафедры авиационной техники и вооружения авиационного факультета учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь», AMKovalenko@outlook.com.

Санько Андрей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, начальник кафедры воздушных судов и авиационного оборудования военного факультета учреждения образования «Белорусская государственная академия авиации», nimiz75@mail.ru.

Information about the authors

Aleksey A. Sheinikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Postdoctoral Student of the Aeronautical Equipment and Weapons Chair, Educational Institution “Military Academy of the Republic of Belarus”, af.varb.ao@gmail.com.

Alexander M. Kovalenko, Senior Lecturer of the Aeronautical Equipment and Weapons Chair, Aviation Faculty, Educational Institution “Military Academy of the Republic of Belarus”, AM-Kovalenko@outlook.com.

Andrey A. Sanko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, The Head of the Aircraft and Aeronautical Equipment Chair, Military Faculty, Educational Institution “Belarussian State Aviation Academy”, nimiz75@mail.ru.

Поступила в редакцию 14.09.2022
Принята в печать 26.01.2023

Received 14.09.2022
Accepted for publication 26.01.2023

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 629.7.036.34

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-95-103

Методика расчета минимальной скорости ползучести лопаток турбин газотурбинных двигателей, основанная на учете деградации микроструктуры сплава

Ю.В. Петров¹, О.А. Ратенко¹, В.К. Харина¹

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

Аннотация: В текущих мировых экономических условиях авиакомпании нуждаются в сокращении финансовых затрат. Известно, что удельный вес затрат авиакомпаний на проведение технического обслуживания и ремонта (ТОиР) в общей структуре затрат составляет не менее 20 %, из которых свыше 40 % приходится на ремонт и обслуживание авиационных двигателей (АД). По существующим оценкам специалистов, эта статья расходов продолжит возрастать, что обусловлено неизбежным усложнением конструкций АД, которое диктуется необходимостью повышения эффективности и экологичности их эксплуатации. Одним из возможных путей сокращения затрат на ТОиР является переход на эксплуатацию по состоянию компонентов, эксплуатируемых в настоящее время до выработки установленного ресурса. К числу таких элементов, например, можно отнести лопатки турбин газотурбинных двигателей (ГТД). Как известно, лопатки турбин работают в весьма непростых условиях: на них воздействуют высокие температуры, большие центробежные нагрузки, агрессивная окружающая газовая среда, а их разрушение происходит, как правило, в результате накопления усталостных повреждений и ползучести. Прежде чем возникнут макроскопические повреждения, микроструктура сплава значительно деградирует и деформируется. Обнаружение на ранней стадии этих микроскопических повреждений, происходящих в сплаве, является тем инструментом, который может позволить перейти на эксплуатацию по состоянию лопаток турбин ГТД. В статье представлена методика расчета минимальной скорости ползучести сплава Inconel 738LC, основанная на учете микроструктурных изменений в условиях реальной эксплуатации. Полученные результаты предлагается использовать для расчета остаточного ресурса лопаток турбин по параметру ползучести.

Ключевые слова: лопатка турбины, микроструктура сплава, γ' -фаза, коагуляция, ползучесть, соотношение Монкмана – Гранта.

Для цитирования: Петров Ю.В., Ратенко О.А., Харина В.К. Методика расчета минимальной скорости ползучести лопаток турбин газотурбинных двигателей, основанная на учете деградации микроструктуры сплава // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 1. С. 95–103. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-95-103

The method of calculating the minimum creep rate of turbine blades of gas turbine engines based on the degradation of the alloy microstructure

Y.V. Petrov¹, O.A. Ratenko¹, V.K. Kharina¹

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

Abstract: In the current global economic conditions, airlines need to curtail financial expenses. It is known that the share of airline costs for maintenance and repair (MR) in the total cost structure amounts to at least 20%, of which more than 40% is for the repair

and maintenance of aircraft engines (AE). According to the actual expertise, this item of expenditure will continue to grow due to the inevitable sophistication of AE structures, which is specified by the need to increase the efficiency and ecological compatibility. One of the possible ways of curbing maintenance and repair expenses is to transit for the operation of on-condition components which are currently in operation until the overhaul life is exhausted. For example, turbine blades of gas turbine engines (GTE) can be pertinent to such elements. It is a common fact that turbine blades operate in challenging environment: they are affected by excessive temperatures, severe centrifugal loads, aggressive gas media, and their destruction generally occurs because of the accumulation of fatigue damage and creep. The alloy microstructure significantly degrades and deforms before macroscopic damage develops. The early detection of microscopic damage in the alloy is the tool which allows for the transition to GTE on-condition turbine blades operation. The article presents the method for calculating the minimum creep rate of the Inconel 738LC alloy based on microstructural changes under operating conditions. The obtained results are proposed to be used for calculating the residual life of turbine blades by the creep parameter.

Key words: turbine blade, alloy microstructure, gamma-prime phase, coagulation, creep, Monkman-Grant relationship.

For citation: Petrov, Y.V., Ratenko, O.A. & Kharina, V.K. (2023). The method of calculating the minimum creep rate of turbine blades of gas turbine engines based on the degradation of the alloy microstructure. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 1, pp. 95–103. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-1-95-103

Введение

Лопатки турбин ГТД являются наиболее ответственными элементами авиационных двигателей, работающими в весьма сложных условиях, к числу которых можно отнести большие нагрузки в результате воздействия газового потока, агрессивность газовой среды, высокие температуры. Среди всего многообразия существующих материалов только лишь жаропрочные никелевые сплавы способны работать в подобных условиях.

Современные жаропрочные никелевые сплавы представляют собой γ -матрицу с включенными в нее частицами преципитата γ' -фазы. γ' -фаза является твердым раствором с кристаллической решеткой типа L12, основа которого – интерметаллидное соединение Ni_3Al [1, 2]. Прочность дисперсионно-твердеющих сплавов прямым образом зависит от параметров частиц γ' -фазы: размера частиц, их объемного содержания, а также расстояния между частицами. Уравнение прочности дисперсионно-упрочненных сплавов является наглядным подтверждением указанных выше положений [3]:

$$\sigma = \sigma_{\theta} + \frac{c\sqrt{f}}{d}, \quad (1)$$

где σ_{θ} – временное сопротивление матрицы;
 c – константа, учитывающая в себе вектор Бюргерса и модуль сдвига матрицы;
 f – объемная доля упрочняющих частиц;

d – размер (диаметр) частиц.

В этой связи весьма важным является изучение влияния условий реальной эксплуатации на изменение параметров частиц γ' -фазы (f и d), а также влияние этих изменений на прочностные характеристики лопаток в целом.

Методы и методология исследования

С целью анализа микроструктурных изменений, происходящих в лопатке в процессе ее эксплуатации, проведен металлографический анализ сплава Inconel 738LC. Исследование проводилось с применением фотомикроскопа НЕОРНОТ-32. Главными особенностями выбранного оборудования обусловлены возможности: исследовать микроструктуру сплава лопатки; осуществлять фиксацию структурных изменений, происходящих в сплаве вследствие воздействия высокотемпературных выдержек при проведении эксперимента; фиксировать наличие дефектов и контролировать их развитие. НЕОРНОТ-32, помимо всего прочего, оснащен функцией фотофиксации с увеличением до 2000 раз, что дает возможность получать снимки различных участков исследуемого образца, интересных с точки зрения проводимого исследования.

Сравнительное металлографическое исследование состояния микроструктуры сплава новой лопатки и лопатки с наработкой в 10 000 часов проводилось на микрошлифах по следующему алгоритму.

1. В соответствии со схемой, представленной на рис. 1, выполнена вырезка образцов исследуемых лопаток.



Рис. 1. Схема сечений вырезки образцов из лопатки для металлографического исследования
Fig. 1. Scheme of cross sections of samples cutoff from a blade for metallographic examination

2. Выполнена шлифовка и полировка образцов в соответствии с известными методами [4, 5].

3. Осуществлено электрохимическое травление в растворе фтористого водорода, глицерина и воды в количестве 1, 10 и 90 мл соответственно при напряжении 6–8 В в течение 5–10 секунд.

4. Полученный микрошлиф исследован с применением фотомикроскопа NEOPHOT-32.

В качестве примера на рис. 2 представлена микроструктура образца металла из корневой части лопатки (основание на рис. 1), полученная при металлографическом исследовании (лопатка имела наработку 10 000 часов).

Из рис. 2 видно, что микроструктура сплава в области передней кромки не претерпела значительных изменений, частицы γ' -фазы все так же имеют кубическую форму и размер близкий к первоначальному – 0,45 мкм. В области задней кромки и корытца можно наблюдать деградацию микроструктуры сплава, здесь происходит коагуляция частиц γ' -фазы и незначительная деформация. В области спинки лопатки изменения микроструктуры сплава более существенные, в этой зоне значительное число частиц γ' -фазы скоагулированы.

В табл. 1 представлены значения параметров частиц упрочняющей фазы. Расчет параметров производился с использованием данных, полученных электронным микроскопом, по формулам

$$V_{\gamma'} = \frac{\sum_1^n A_{\gamma'}}{A}, \quad (2)$$

$$d = \frac{1}{n} \sum_1^n l_{\gamma'}, \quad (3)$$

где $A_{\gamma'}$ – площадь частиц γ' -фазы;

A – площадь изображения микроскопа;

$V_{\gamma'}$ – объемная доля частиц γ' -фазы;

d – средний размер частиц;

n – количество частиц γ' -фазы, попадающих в поле зрения;

Таблица 1
Table 1

Параметры частиц γ' -фазы в корневом сечении лопатки
 γ' -phase dimensions in the root blade section

Зона	Параметры частиц γ' -фазы		Напряжение, МПа	Температура, °С
	Объемная доля, %	Средний диаметр, мкм		
Передняя кромка	45,8	0,45	60	790
Спинка	48,9	0,73	300	712
Задняя кромка	44,8	0,61	160	791
Корытце	47,2	0,67	250	715

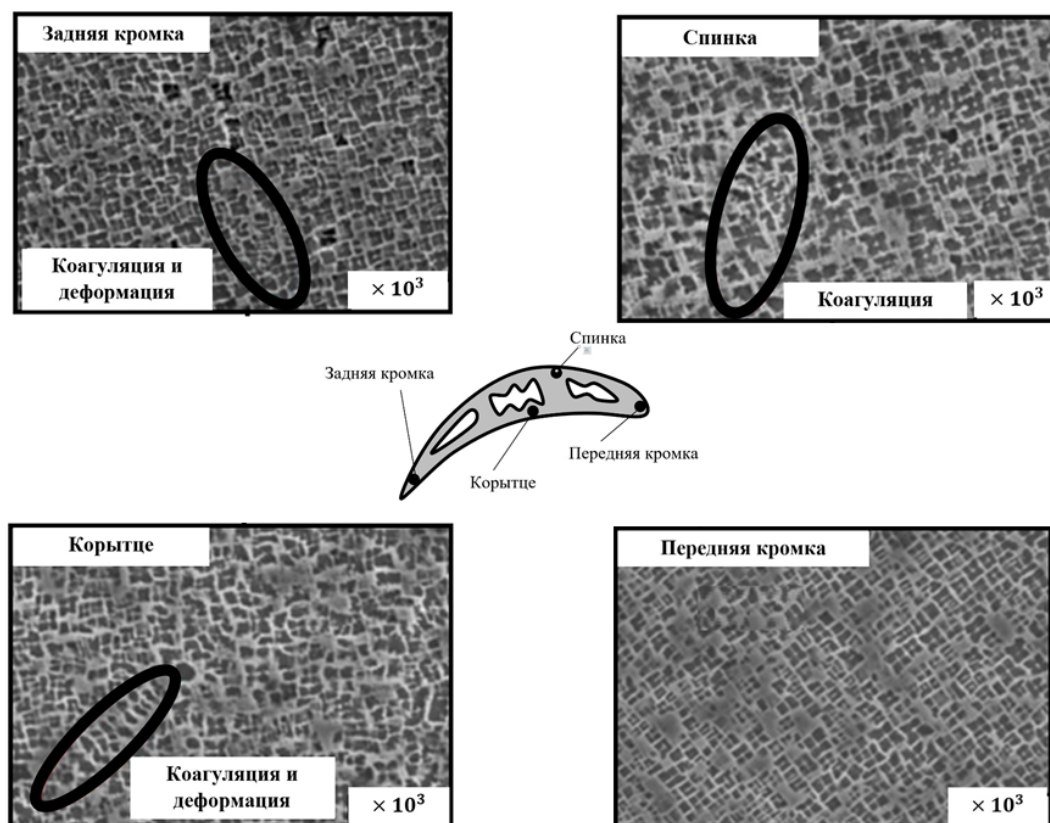


Рис. 2. Микроструктура сплава в корневом сечении лопатки
Fig. 2. Alloy microstructure in the root blade section

$l_{\gamma'}$ – наибольший размер n -й частицы γ' -фазы.

Значения напряжений и температур определялись путем математического моделирования термонапряженного состояния лопатки турбины, выполненной из сплава Inconel 738LC, с использованием программного продукта ANSYS.

Аналогичные расчеты проведены для других критических сечений пера лопатки: на расстоянии 80 % высоты лопатки и в области законцовки. Сравнительный анализ микроструктуры сплава в различных сечениях позволил сделать вывод о том, что и большие напряжения, и высокие температуры в процессе эксплуатации лопаток турбин приводят к деградации микроструктуры: увеличению размера частиц и снижению их объемного содержания в сплаве (рис. 3). На рис. 3 А, С, D – передняя кромка, спинка, задняя кромка соответственно, индексы обозначают горизонтальное сечение пера лопатки.

Результаты исследования

Поскольку одной из основных причин разрушения лопаток турбин является ползучесть [6, 7], характеризующаяся минимальной скоростью ползучести, в работе исследовано влияние изменения параметров частиц упрочняющей γ' -фазы только на поведение сплава при ползучести.

Разработана методика расчета величины минимальной скорости ползучести ($\dot{\epsilon}_{min}$), основанная на применении модифицированного соотношения Монкмана – Гранта [8], позволяющая учесть деградацию микроструктуры сплава в процессе эксплуатации:

$$(\dot{\epsilon}_{min})^m t_r = C, \quad (4)$$

где m и C – константы, зависящие от материала изделия;

t_r – время до разрушения.

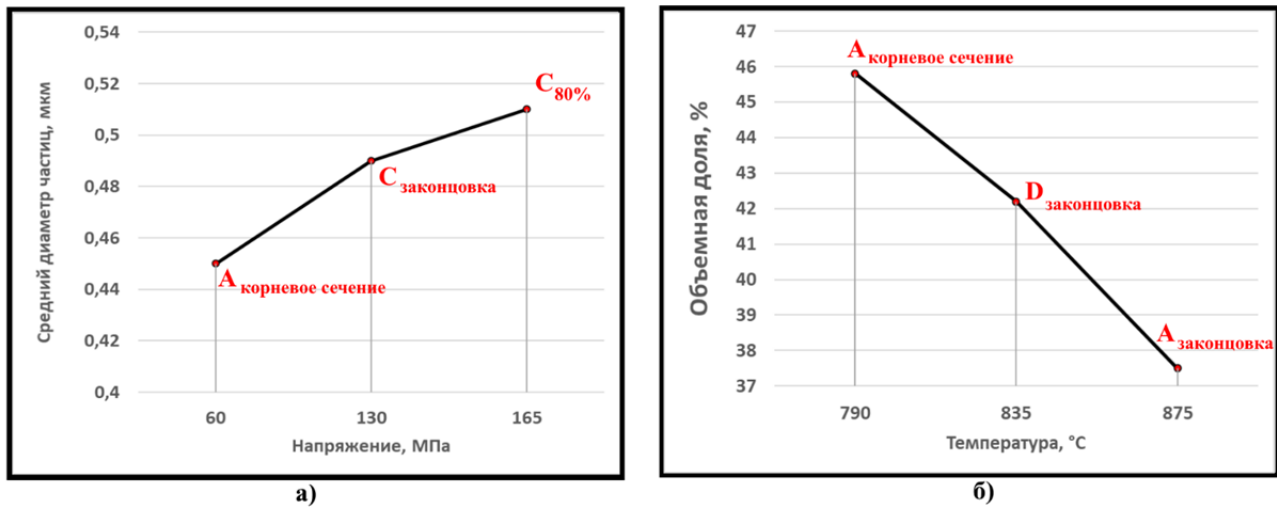


Рис. 3. Графики зависимостей: а – среднего диаметра частиц γ' -фазы от действующего напряжения; б – объемной доли частиц γ' -фазы от температуры

Fig. 3. Graphs of dependences: а – average diameter of the γ' -phase particles on the stress, б – volume fraction of the γ' -phase particles on the temperature

Значение минимальной скорости ползучести вычислялось по методу [9], позволяющему учесть микроструктурное состояние сплава:

$$\dot{\epsilon}_{min} = A \frac{D G b}{k T} \left[\exp \left(-104 \sqrt{\frac{r}{\omega}} \right) \right] \left(\frac{\sigma - \sigma_{th}}{E} \right)^5, \quad (5)$$

где ω – ширина каналов матрицы (или расстояние между частицами упрочняющей γ' -фазы);

- A – постоянная Дорна;
- b – вектор Бюргера;
- D – коэффициент диффузии;
- E – модуль упругости;
- G – модуль сдвига при температуре ползучести;
- k – постоянная Больцмана;
- r – размер частиц;
- T – температура;
- σ – приложенное напряжение;
- σ_{th} – пороговое напряжение.

Ширина матричного канала вычислялась по формуле [10]

$$\omega = r \left(\frac{1}{\sqrt[3]{V_f}} - 1 \right). \quad (6)$$

Значения параметров, входящих в уравнение (4), для сплава Inconel 738LC принимались в соответствии с данными работ [11] и представлены в табл. 2.

Входящие в уравнение (4) значения ширины каналов матрицы и размера частиц γ' -фазы определялись расчетным путем.

Для определения объемной доли упрочняющей γ' -фазы была использована следующая зависимость [12]:

$$\frac{V_f}{V_{f0}} = m(T - T_{к.р.}) - K(T^2 - T_{к.р.}^2), \quad (7)$$

где V_f – объемная доля частиц γ' -фазы при заданной температуре;

V_{f0} – объемная доля частиц γ' -фазы в сплаве при комнатной температуре;

$T_{к.р.}$ – температура конца растворения частиц γ' -фазы ($T_{к.р.} = 1098$ °C);

m и K – постоянные коэффициенты, вычисляемые в соответствии с формулами

$$m = \frac{1}{(T_{н.р.} - T_{к.р.}) - \frac{T_{н.р.}^2 - T_{к.р.}^2}{2T_{н.р.}}}; \quad (8)$$

$$K = \frac{m}{2T_{н.р.}}, \quad (9)$$

Таблица 2
Table 2

Характеристики материала Inconel 738LC
Inconel 738LC properties

Характеристика	Величина
Постоянная Дорна, А	$5,8 \cdot 10^{12}$
Вектор Бюргера, b, м	$2,5 \cdot 10^{-10}$
Коэффициент диффузии, D, м ² /с	$2 \cdot 10^{-4}$
Модуль Юнга, E, ГПа	179
Модуль сдвига, G, МПа	$8 \cdot 10^4$
Температура плавления, T _{пл} , °С	1230
Энергия активации диффузии, Q, кДж/моль	512

где $T_{н.р.}$ – температура начала растворения γ' -фазы ($T_{н.р.} = 895$ °С).

Расчет размера частиц γ' -фазы основан на применении теории Лифшица – Слезова – Вагнера [13]:

$$\bar{r}^3 - \bar{r}_0^3 = \bar{k}t, \quad (10)$$

где $\bar{r}$ – средний размер частицы;

$\bar{r}_0$ – размер частицы в начальный момент;

$\bar{k}$ – константа скорости роста;

t – время.

Результаты расчетов, основанных на решении уравнения (5) с учетом (7) и (10), представлены в табл. 3.

Для экспериментального определения скорости ползучести были взяты две лопатки, изготовленные из жаропрочного никелевого сплава Inconel 738LC: новая и имеющая наработку 10 000 часов. Из них изготовили образцы для испытания диаметром 4 мм и длиной 19 мм (рис. 4) по методу, описанному в разделе «Методика и методология исследования». Испытания на ползучесть проводились на испытательной машине ATS 2330 при постоянной нагрузке в температурном диапазоне 747–976 °С и напряжениях в интервале 90–620 МПа.

В табл. 3 представлены данные, полученные в результате экспериментов образцов, вырезанных из лопаток, имеющих наработку 10 000 часов.

Из табл. 3 видно, что экспериментальные данные и результаты, полученные расчетным путем, коррелируются с достаточной степенью точности.

Заключение

В результате проведенного исследования микроструктуры жаропрочного никелевого сплава Inconel 738LC установлено влияние условий реальной эксплуатации (высоких температур и напряжений) на деградацию микроструктуры сплава лопатки турбины ГТД: наблюдается коагуляция частиц упрочняющей γ' -фазы и уменьшение ее объемного содержания. В свою очередь описанные выше изменения приводят к существенному снижению механических свойств изделия.

С использованием модифицированного соотношения Монкмана – Гранта авторами доказано влияние деградации микроструктуры жаропрочных никелевых сплавов на изменение значения минимальной скорости ползучести и, как следствие, на время до разрешения лопатки турбины вследствие ползучести.

Разработанная методика расчета минимальной скорости ползучести, учитывающая изменение микроструктуры сплава лопатки в процессе эксплуатации, совместно с существующими методами контроля дает возможность проводить более точную оценку технического состояния лопаток турбин, что может позволить осуществить переход к эксплуатации лопаток турбин современных ГТД по состоянию.

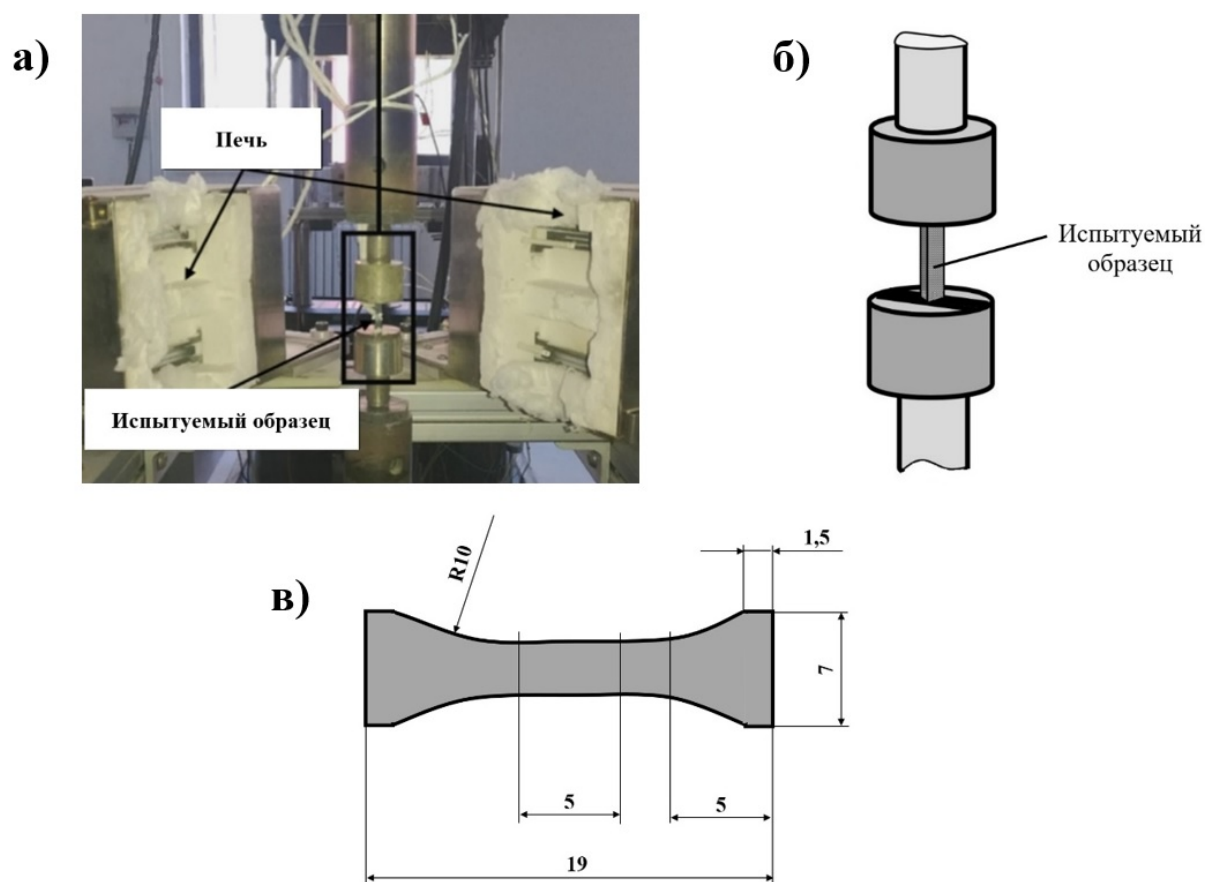


Рис. 4. а – экспериментальное оборудование, б – изображение способа крепления образца, в – образец для проведения испытания

Fig. 4. а – experimental equipment, б – schematic representation of the sample bonding technique, в – the sample for testing

Таблица 3
Table 3

Результаты экспериментального исследования образцов, вырезанных из лопаток, имеющих наработку 10 000 часов

Results of the experimental study of samples cut off from blades having 10,000 operating hours

Условия проведения испытания		Экспериментальные данные	Расчетные данные
Температура, °C	Нагрузка, МПа	Минимальная скорость ползучести, 1/с	
747	620,5	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$6,12 \cdot 10^{-5}$
760	586,1	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$2,03 \cdot 10^{-6}$
815	413,7	$8,5 \cdot 10^{-7}$	$8,41 \cdot 10^{-7}$
828	344,7	$3,6 \cdot 10^{-7}$	$3,76 \cdot 10^{-7}$
976	89,6	$9 \cdot 10^{-9}$	$8,85 \cdot 10^{-9}$

Список литературы

1. Huang W.Q., Yang X.G., Li S.L. Evaluation of service-induced microstructural damage for directionally solidified turbine blade

of aircraft engine // Rare Metals. 2019. Vol. 38, iss. 2. Pp. 157–164. DOI: 10.1007/s12598-018-1016-z

2. Tong J. Assessment of service induced degradation of microstructure and properties in turbine blades made of GH4037 alloy / J. Tong,

X. Ding, M. Wang, K. Yagi, Yu. Zheng, Q. Feng // Journal of Alloys and Compounds. 2016. Vol. 657. Pp. 777–786. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.10.071

3. **Логунов А.В.** Жаропрочные никелевые сплавы для лопаток и дисков турбин. М.: Московские учебники и Картолитография, 2018. 592 с.

4. **Беккерт М., Клемм Х.** Способы металлографического травления: справочник / Пер. с нем. Н.И. Туркиной и Е.Я. Капуткина. 2-е изд. М.: Металлургия, 1988. 400 с.

5. **Лившиц Б.Г.** Металлография: учебник для вузов. М.: Металлургия, 1990. 236 с.

6. **Федорченко Д.Г., Новиков Д.К.** Исчерпание ресурса деталей ГТД в эксплуатационных условиях: монография. Самара: Изд-во СамНЦ РАН, 2018. 264 с.

7. **Li Sh.** A physically based model for correlating the microstructural degradation and residual creep lifetime of a polycrystalline Ni-based superalloy / Sh. Li, B. Wang, D. Shi, X. Yang, H. Qi // Journal of Alloys and Compounds. 2019. Vol. 783. Pp. 565–573. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.11.417

8. **Monkman F., Grant N.** An empirical relationship between rupture life and minimum creep rate in creep-rupture tests // Proceeding of ASTM, 1956. Pp. 593–620.

9. **Mishra R.S., Mukherjee A.K.** Correlations between high-temperature creep behavior and structure // Proceedings of the Third «Light Weight Alloys for Aerospace Applications» Symposium Sponsored by the Non-ferrous Metals Committee of the Structural Materials Division (SMD) of TMS, February 13–16 1995. P. 319.

10. **Fan Y.** Mechanical properties deterioration and its relationship with microstructural variation using small coupons sampled from serviced turbine blades / Y. Fan, H. Weiqing, Y. Xiaoguang, S. Duo-qi, L. Shaolin // Materials Science and Engineering: A. 2019. Vol. 757. Pp. 134–145. DOI: 10.1016/j.msea.2019.04.100

11. **Carey J.A., Sargent P.M., Jones D.R.H.** A deformation mechanism map for IN738LC superalloy // Journal of Materials Science Letters. 1990. Vol. 9, iss. 5. Pp. 572–575. DOI: 10.1007/BF00725881

12. **Петрушин Н.В., Логунов А.В., Ковалев А.И. и др.** Способ определения относительного объемного содержания упрочняющей γ' -фазы в сплавах. Патент SU № 687965 A1, МПК G01N 27/02: опубл. 15.03.1992. 8 с.

13. **Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р.** Жаропрочность никелевых сплавов: монография. М.: Машиностроение, 1998. 463 с.

References

1. **Huang, W.Q., Yang, X.G. & Li, S.L.** (2019). *Evaluation of service-induced microstructural damage for directionally solidified turbine blade of aircraft engine*. Rare Metals, vol. 38, issue 2, pp. 157–164. DOI: 10.1007/s12598-018-1016-z

2. **Tong, J., Ding, X., Wang, M., Yagi, K., Zheng, Yu. & Feng, Q.** (2016). *Assessment of service induced degradation of microstructure and properties in turbine blades made of GH4037 alloy*. Journal of Alloys and Compounds, vol. 657, pp. 777–786. DOI: 10.1016/j.jallcom.2015.10.071

3. **Logunov, A.V.** (2018). [*Heat-resistant nickel alloys for turbine blades and disks*]. Moscow: Moskovskie uchebniki i Kartolitografiya, 592 p. (in Russian)

4. **Bekkert, M. & Klemm, X.** (1988). [*Methods of metallographic etching: guidebook*]. 2nd ed. Translated from the German by Turkina N.I., Kaputkin E.Ya. Moscow: Metallurgiya, 400 p. (in Russian)

5. **Livshits, B.G.** (1990). [*Metallography: a textbook for universities*]. Moscow: Metallurgiya, 236 p. (in Russian)

6. **Fedorchenko, D.G. & Novikov, D.K.** (2018). [*Exhaustion of the resource of GTE parts in operational conditions: Monography*]. Samara: Izdatelstvo SamNTS RAN, 264 p. (in Russian)

7. **Li, S., Wang, B., Shi, D., Yang, X. & Qi, H.** (2019). *A physically based model for correlating the microstructural degradation and residual creep lifetime of a polycrystalline Ni-based superalloy*. Journal of Alloys and Com-

pounds, vol. 783, pp. 565–573. DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.11.417

8. **Monkman, F. & Grant, N.** (1956). *An empirical relationship between rupture life and minimum creep rate in creep-rupture tests* // Proceeding of ASTM, pp. 593–620.

9. **Mishra, R.S. & Mukherjee, A.K.** (1995). *Correlations between high-temperature creep behavior and structure*. Proceedings of the Third "Light Weight Alloys for Aerospace Applications" Symposium Sponsored by the Non-ferrous Metals Committee of the Structural Materials Division (SMD) of TMS, February 13–16 1995, p. 319.

10. **Fan, Y., Weiqing, H., Xiaoguang, Y., Duo-qi, S. & Shaolin, L.** (2019). *Mechanical properties deterioration and its relationship with microstructural variation using small coupons sampled from serviced turbine blades*. Materials

Science and Engineering: A, vol. 757, pp. 134–145. DOI: 10.1016/j.msea.2019.04.100

11. **Carey, J.A., Sargent, P.M. & Jones, D.R.H.** (1990). *A deformation mechanism map for IN738LC superalloy*. Journal of Materials Science Letters, vol. 9, issue 5, pp. 572–575. DOI: 10.1007/BF00725881

12. **Petrushin, N.V., Logunov, A.V., Kovalev, A.I. et al.** (1992). [Method for determining the relative volume content of the strengthening γ' -phase in alloys]. Patent SU no. 687965 A1, MPK G01N 27/02: publ. March 15. 8 p. (in Russian)

13. **Kablov, E.N. & Golubovsky, E.R.** (1998). [Heat resistance of nickel alloys: Monography]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1998. 463 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Петров Юрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической механики и инженерной графики МГТУ ГА, yu.petrov@mstuca.aero.

Ратенко Олег Александрович, ассистент кафедры технической механики и инженерной графики МГТУ ГА, ratenko.oleg@yandex.ru.

Харина Вера Константиновна, кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики и инженерной графики МГТУ ГА, h.vera@bk.ru.

Information about the authors

Yuri V. Petrov, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Engineering Mechanics and Graphics Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, yu.petrov@mstuca.aero.

Oleg A. Ratenko, Teaching Assistant of the Engineering Mechanics and Graphics Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, ratenko.oleg@yandex.ru.

Vera K. Kharina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Engineering Mechanics and Graphics Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, h.vera@bk.ru.

Поступила в редакцию 26.09.2022
Принята в печать 26.01.2023

Received 26.09.2022
Accepted for publication 26.01.2023

ББК 05
Н 34
Св. план 2023

Научный Вестник МГТУ ГА
Том 26, № 01, 2023
Civil Aviation High TECHNOLOGIES
Vol. 26, No. 01, 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 26.01.2023.

Печать цифровая

Формат 60×90/8

13,0 усл. печ. л.

Заказ № 946/113

Тираж 50 экз.

Московский государственный технический университет ГА
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20
Изготовлено в ИД Академии имени Н. Е. Жуковского
125167, Москва, 8-го Марта 4-я ул., дом 6А
Тел.: (495) 973-45-68
E-mail: artpress@mail.ru

© Московский государственный
технический университет ГА, 2023