

Том 25, № 02, 2022

ISSN 2079-0619

e-ISSN 2542-0119

# Научный Вестник МГТУ ГА



## Civil Aviation High TECHNOLOGIES

Vol. 25, No. 02, 2022

Издается с 1998 г.

Москва  
2022

*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., советник ректората МГТУ ГА, Москва, Россия;

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

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

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

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

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

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

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

*Сюй Хаудзюнь*, PhD, Университет военно-воздушных сил, Хуан, 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 "Vympel", 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;

**Нечаев Е.Е.**, проф., д. т. н., зав. каф. МАИ (национального исследовательского университета), 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;

**Evgeniy E. Nechaev**, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### *ТРАНСПОРТ*

<b>Borodkin S.F., Volynchuk A.I., Ganiev Sh.F., Kiselyov M.A., Nosatenko I.A.</b> Modern methods of preventing aircraft overrunning the runway .....	8
<b>Brailko A.A., Samoynenko V.M., Druzhinin N.A., Druzhinin L.A.</b> Adaptive information management system of dynamic monitoring of actual water content in jet fuel in technological processes of aviation fuel supply.....	20
<b>Булатова А.Е., Бузаева Е.А., Евсевичев Д.А.</b> Влияние различных типов информационных дисплеев на работоспособность авиационных специалистов в эргатических системах.....	30
<b>Иванов Д.А., Петрова Т.В.</b> Увеличение срока эксплуатации элементов конструкции авиационной техники с использованием упрочняющих технологий на основе пульсирующих дозвуковых газовых потоков .....	41
<b>Полешкина И.О.</b> Роль малой авиации в обеспечении транспортной доступности арктических регионов: проблемы и направления развития .....	54

### *МАШИНОСТРОЕНИЕ*

<b>Zhelannikov A.I., Zamyatin A.N., Chinyuchin Yu.M.</b> Impact of the atmosphere state on interaction of aircraft vortex and condensation trails.....	70
---	----

## CONTENTS

### *TRANSPORT*

<b>Borodkin S.F., Volynchuk A.I., Ganiev Sh.F., Kiselyov M.A., Nosatenko I.A.</b> Modern methods of preventing aircraft overrunning the runway .....	8
<b>Brailko A.A., Samoylenko V.M., Druzhinin N.A., Druzhinin L.A.</b> Adaptive information management system of dynamic monitoring of actual water content in jet fuel in technological processes of aviation fuel supply.....	20
<b>Bulatova A.E., Buzaeva E.A., Evsevichev D.A.</b> Influence of various types of information displays on the work capacity of aviation specialists in ergatic systems .....	30
<b>Ivanov D.A., Petrova T.V.</b> Increasing the service life of structural elements of aviation equipment using strengthening technologies based on pulsating subsonic gas flows.....	41
<b>Poleshkina I.O.</b> Contribution of general aviation to ensuring transport accessibility to the Arctic regions: the challenges and areas of focus .....	54

### *MECHANICAL ENGINEERING*

<b>Zhelannikov A.I., Zamyatin A.N., Chinyuchin Yu.M.</b> Impact of the atmosphere state on interaction of aircraft vortex and condensation trails.....	70
---	----

**ТРАНСПОРТ**

*05.22.01 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;  
05.22.08 – Управление процессами перевозок;  
05.22.13 – Навигация и управление воздушным движением;  
05.22.14 – Эксплуатация воздушного транспорта*

УДК.629.7.067.8

DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-8-19

## Modern methods of preventing aircraft overrunning the runway

**S.F. Borodkin<sup>1</sup>, A.I. Volynchuk<sup>1,2</sup>, Sh.F. Ganiev<sup>1</sup>, M.A. Kiselyov<sup>1</sup>,  
I.A. Nosatenko<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup>*JSC "Royal Flight Airlines", Moscow, Russia*

**Abstract:** The landing of the aircraft has always been the most challenging and dangerous stage of the flight. In order to make a safe landing, the aircraft (A/C) requires reducing the vertical (at the stage of flare-out) and horizontal (prior to touchdown) components of the aircraft's flight speed vector, which in turn reduces the capabilities to increase lift and limits the crew's ability to perform maneuvers. At the same time, during landing the crew must align the aircraft with the runway (RW) and make a touchdown, subsequent A/C landing roll and stop within a rather limited area, which eventually and particularly, under the effect of contributing adverse factors (piloting errors, wind shear, icing, engine failure, aquaplaning, etc.) can cause the aircraft to overshoot and overrun the RW. Currently, as the analysis of aviation accidents statistics shows, the issue of preventing and alerting aircraft overrun is quite relevant. The search for a solution, in terms of preventing aircraft overrunning the runway (RW), is conducted as at the level of aviation authorities as among aircraft manufacturers, operators. Within the framework of this review, an attempt is made to identify and analyze the key factors affecting the dynamics of aircraft motion during landing, using information about aviation accidents that have occurred over the past few years. Notably, such aspects as a human factor and technical features of the operation of modern jet aircraft, influencing the A/C landing roll, are considered. In addition, special attention is paid to consider the methods of prevention and warning of A/C overrun with highlighting the approaches of passive and active protection. Within the framework of the analysis of active protection techniques, the principles of on-board avionic systems operation of the most major aircraft manufacturers, such as Boeing and Airbus, are considered. As an example of the passive protection, the experience of using special energy-absorbing destructible blocks installed next to the runway threshold, is analyzed.

**Key words:** landing, runway (RW), overrunning, overshooting, flight safety, avionics, airfield.

For citation: Borodkin, S.F., Volynchuk, A.I., Ganiev, Sh.F., Kiselyov, M.A. & Nosatenko I.A. (2022). Modern methods of preventing aircraft overrunning the runway. Civil Aviation High Technologies, vol. 25, no. 2, pp. 8-19. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-8-19

## Современные методы предотвращения выкатываний воздушных судов за пределы взлетно-посадочной полосы

**С.Ф. Бородкин<sup>1</sup>, А.И. Волынчук<sup>1,2</sup>, Ш.Ф. Ганиев<sup>1</sup>, М.А. Киселев<sup>1</sup>,  
И.А. Носатенко<sup>1</sup>**

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

<sup>2</sup>*АО «Авиакомпания «Роял Флайт», г. Москва, Россия*

**Аннотация:** Посадка воздушного судна была и остается наиболее сложным и опасным этапом полета. Для совершения безопасной посадки воздушному судну (ВС) необходимо уменьшить вертикальную (на этапе выравнивания)



и горизонтальную (на этапе выдерживания) составляющие вектора скорости полета ВС, что в свою очередь уменьшает возможности по увеличению подъемной силы и ограничивает экипаж в возможностях совершения маневров. Также экипаж во время посадки должен подвести ВС к взлетно-посадочной полосе (ВПП) и совершить касание, последующие пробег и остановку ВС в пределах довольно ограниченной по своим размерам площадки, что в конечном итоге, в частности при воздействии сопутствующих неблагоприятных факторов (ошибки пилотирования, сдвиг ветра, обледенение, отказ двигателя, гидроглиссирование и др.), может привести к перелету и выкатыванию самолетов за пределы ВПП. В настоящее время вопрос возможности предотвращения и предупреждения выкатываний ВС, как показывает анализ статистики авиационных происшествий, достаточно актуален. Поиск решения в части предотвращения выкатываний ВС за пределы ВПП ведется как на уровне авиационных властей, так и на уровнях производителей и эксплуатантов ВС. В рамках данной обзорной статьи предпринята попытка выделить и проанализировать ключевые факторы, влияющие на динамику движения ВС при посадке, используя информацию об авиационных происшествиях, произошедших за последние несколько лет. В частности, рассмотрены такие аспекты, как человеческий фактор и технические особенности работы современных реактивных ВС, влияющие на пробег самолета по полосе. Кроме того, особое внимание в статье уделено рассмотрению методов предотвращения и предупреждения выкатываний ВС с выделением методов пассивной и методов активной защиты. В рамках анализа методов активной защиты рассмотрены принципы работы бортовых электронных систем крупнейших авиапроизводителей, таких как Boeing и Airbus. В качестве примера пассивной защиты проанализирован опыт использования специальных энергопоглощающих разрушаемых блоков, размещаемых после торца ВПП.

**Ключевые слова:** посадка, взлетно-посадочная полоса (ВПП), выкатывание, перелет, безопасность полетов, авионика, аэродром.

**Для цитирования:** Бородкин С.Ф. Современные методы предотвращения выкатываний воздушных судов за пределы взлетно-посадочной полосы / С.Ф. Бородкин, А.И. Волынчук, Ш.Ф. Ганиев, М.А. Киселев, И.А. Носатенко // Научный Вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 2. С. 8–19. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-8-19

## Introduction

The analysis of aviation accidents statistics<sup>1</sup> points out to the fact that despite a short space of time of landing with respect to the rest flight phases (less than 5% of the entire flight time), it is the phase of flight when most of the aviation accidents (over 60%) occur [1]. A considerable part of the stated aviation events (AE) is concerned with aircraft overrunning the RW. In conformity with IATA data, 27% of AE are related with aircraft rolling-off, which is the highest indicator regarding other types of AE over 2016–2020. Among the factors stipulating A/C overrunning, let us emphasize the environment conditions, decreasing visibility and deteriorating aircraft braking action with the RW surface (fog, RW icing, wind, etc.)<sup>2</sup> technical and human factors. Let us note that running off the RW is associated rather frequently with the simultaneous impact of a variety of factors.

A flight crew's ability to perform a go-around procedure has a great influence on preventing A/C rolling-off. Therefore, airlines focus on the development, implementation and abiding by rules and procedures to ensure the constant flight crew's readiness for go-around, provided the actual landing instruction does not comply with a safe flight completion [1]. Thus, a scheduled flight crew training is bound to include the fulfilment of a go-around procedure on a simulator. Additionally, the number of requirements and procedures, established by the state regulatory and supervisory authorities, exists [2].

A compulsory monitoring and recording of the onboard systems malfunctions, inclusive of the braking systems, the obligatory fulfilment of the MEL – prescribed procedures, are referred to them.

According to the world practice, it is not advisable to continue an approach to land beyond a designated touch down zone, also to perform a hard touchdown on a slippery RW<sup>3</sup>.

Apart from the stated above organization events, the technical measures aimed at overrun-

<sup>1</sup> Flight safety foundation. FSF Alar Tool Kit. (2010). Skybrary. Available at: <https://skybrary.aero/articles/flight-safety-foundation-alar-toolkit> (accessed: 14.01.2022).

<sup>2</sup> IATA safety report 2020. (2021). IATA. Montreal – Geneva, 244 p.

<sup>3</sup> Runway condition assessment – moving toward an automated environment (2019). Proceedings of Interregional Conference «Airport council international», Tampa, 15-17 September.

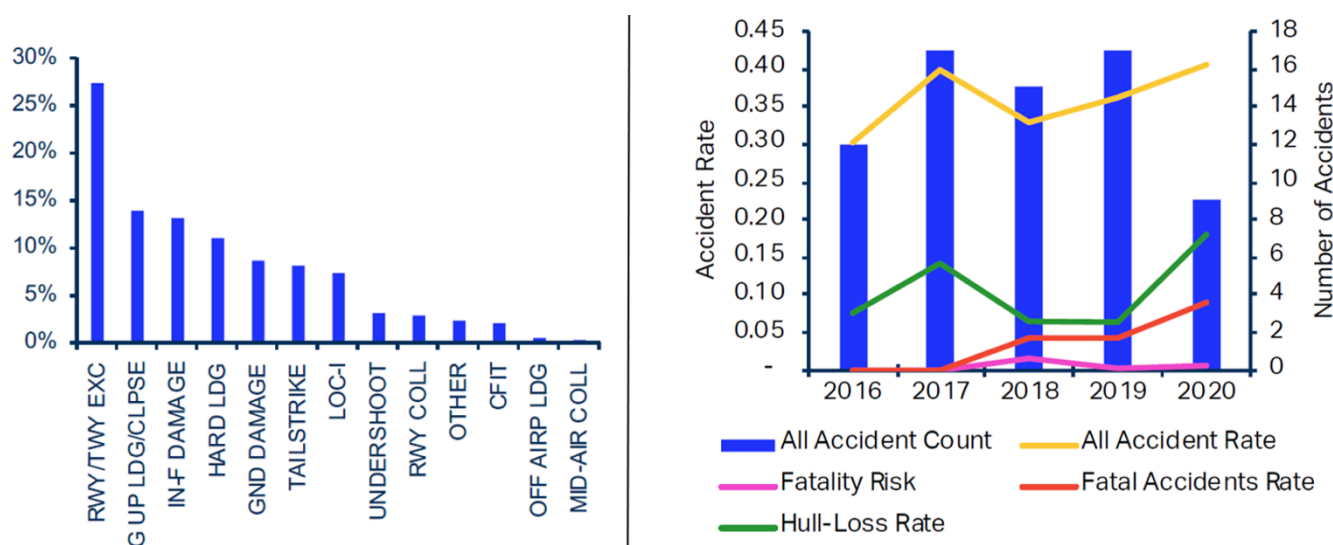


Fig. 1. Statistics of aviation events according to IATA data, a five-year trend (2016–2020) according to IATA data

ning prevention, which are implemented as at an aerodrome (ground events) as onboard A/C, are highlighted.

It is obvious that the most efficient on the ground technique to prevent running off is building longer RWs, ensuring the A/C maximum landing roll.

There are different types of aerodromes (island, shore-based, etc.), where the RW length is limited due to landscape features. Lately a specific ground-based energy-absorbing system of A/C emergency braking (EMAS) has become alternative to lengthening the RW. For the purpose of minimizing the negative impact of a human factor, the systems of modern A/C automatic control are replenished with functions, implementing braking in the automatic mode<sup>4</sup>.

Let us consider in detail the hazards resulting in the risk of overrunning as well as action plans to prevent A/C overrunning the RW.

### Analysis of hazards resulting in the risk of overrunning

As it was noted before, quite frequently an aircraft accident (A/A) results from the impact of several causes simultaneously [3, 4]. Among the

causes, increasing the risk of rolling-off, let us note [1]:

1) unsteady approach to land, the incorrect technique of A/C aligning, wrong actions and/or interaction in the flight crew under adverse weather conditions or the A/C emergency technical condition. These causes are brought about by a human factor,

2) unpredictable or much worse than the expected landing instruction, as a rule, are concerned with unreliable information transmitting to the crew about the landing instructions,

3) efficiency decreasing or facilities failure to dampen a lift force, braking aids, A/C emergency configuration are usually brought about by the A/C technical condition,

4) *airport features* (geographical location, limiting landing direction and operation zones in the vicinity of the airport, RW gradients, RW surface condition).

We should highlight the impact of a human factor among the causes of most AE. According to the ICAO statistics, 45% of AE are namely caused by a human factor. Insufficient training, emotional tension, fatigue and a range of other factors are capable of leading to substantial deviations in a flight crew work, subsequently, disrupt a flight plan.

Among such violations we can mention the unsteady approach, i.e., approach to land, under

<sup>4</sup> Airbus corporation website. Available at: <https://www.airbus.com> (accessed: 28.11.2021).

which A/C does not maintain at least one of the following values: air speed, a rate of descent, vertical/horizontal flight trajectory or not consistent A/C configuration at an altitude of taking a decision or of obtaining a clearance to land. Other errors can cause the unsteady approach.

In 2010 A/C Tu154, with the top officials of the Republic of Poland on board, crashed on landing in the vicinity of Smolensk not reaching the RW. Interference on the part of the senior leadership caused a flight crew to descend below the decision height, piloting A/C manually in fog, attempting to find the RW lights [5].

In this respect, the same emotional subcomponent led to Utair airline A/C B737-800 overrunning in Sochi in September 2018. The A/C was approaching to land in the marginal weather conditions. On a glide path a captain made a go-around procedure after continuous alerts about wind shear. Attempting to make another hand approach, a flight crew made a series of errors. The A/C retarded to intercept signals of localizers due to the unsteady approach. As a result, the crew had to make sharp maneuvers to fly the heading, which led to air speed increase [5]. Over the RW threshold, the flight crew neglected a wind shear warning and continued the landing, substantially having overshoot an aiming point of a touchdown zone. An overdue going into the reverse thrust became fatal. Let us note, that due to inertia, transition from one turbojet engine operation mode to another, especially reverse thrust activation, takes several seconds. For example, on A/C B737 maximum reverse thrust is generated not earlier than in 2...4 sec. If overdue reverse thrust is deployed in conjunction with touch down and overshooting at a greater speed than the operation manual prescribes, a risk of rolling-off increases massively [6].

Incorrect provision of information to the crew about the weather conditions and RW status presents a significant threat as well [7]. With the preliminary estimate of a landing distance prior to departure, it is impossible to take into consideration features of each airport regarding the rate of speed during approach to land, actual temperature and breaking coefficient, wind direction and intensity. For example, a damp RW, providing the good breaking action, can become

slippery even under a slight variation of temperature. Incorrect provision of information to a flight crew about the RW status caused Aeroflot A/C A321 overrunning at Kaliningrad airport Khrabrovo. The reported braking coefficient proved above actual as a result of which, the A/C crew selected the insufficient breaking coefficient mode. The similar causes resulted in the incident with Red Wings airline SSJ-100 in Belgorod.

The A/C technical condition and specifics of its control much more rarely cause rolling-off because of a high reliability of aeronautical equipment and qualitative training of flight personnel [8]. Nevertheless, it is the features of the A/C control system that resulted in Red Wings airline A/C Tu-204 overrunning in Vnukovo in 2012. The matter is that an automatic extension of air speeds, interceptors and going into the reverse thrust on this A/C type are practical only on the condition of the simultaneous clenching of both landing gear (LG) struts. However, A/C motion on the RW was happening without extended interceptors with alternative clenching either left or right L/G struts. As a lift force was sufficiently great due to not extended interceptors, wheel braking was not efficient. A reverse was not also activated despite numerous crew's attempts due to the failure to clench the left and right LG struts simultaneously during the landing roll on the RW.

Furthermore, aerodrome features must be considered. There are airports where a single course landing is only possible or aerodromes with V-type RWs located with the direction variation of 15–20 degrees without a probability for the opposite course approach, which does not allow pilots to disregard the tail wind or hazardous windshear impact [9]. In the Russian Federation, an airport in Sochi has such a pattern where an approach to land is possible only from the seacoast direction due to the opposite course restrictions in the presence of mountains. In addition, in conformity with the applicable approach to land regulations in Sochi or Gelendzhik, a go-around procedure is allowable only when it is above the decision height, as a result of which, a risk of unsteady approach to land increases. The RWs state also influences substantially a proba-

bility of performing a safe landing. For example, the RW at an out-of-service airport in Rostov-on-Don was notorious for its “bump” among pilots – a positive gradient started approximately from the first third of a touchdown zone in the distance of about 1000 m and transferred into a negative gradient up to the RW stop end.

## Methods to reduce the risk of A/C overrunning the runway

Among the methods to decrease the risk of A/C overrunning the RW, we can put an emphasis on organizational and technical ones. The latter can be classified into the methods of active and passive protection.

As an example of organizational measures, let us give FAA Advisory Circular No: 91-79A, developed by the national US regulator in collaboration with A/C company-designers and major airlines. It specifies the key areas of focus with respect to reducing the risk for A/C overrun the RW on landing.

Compliance with the standard operation rules and the use of checklists are a significant contributor to preventing AE during approach to land and landing. The actions, prescribed by the standard operation rules, are accomplished according to the proper sequence from each pilot’s seat. In terms of safety, critical flight moments (involving primarily A/C configuration variation) must be cross-checked using checklists [10].

While performing a go-around procedure, a strict conformity of the rules of delegating responsibilities between pilots and the optimal use of the principles to optimize crew work in a flight deck (CRM) are of paramount importance.

However, the listed documents and procedures cannot fully solve an A/C overrun-related problem, which illustrates a rising trend of overrun frequency over 2015–2020 (IATA).

Thus, the requirement to apply additional safety barriers, as the active and passive protection, is essential. Controlling effects of crew and aeronautical equipment are ascribed to the first category. The passive methods comprise so-called emergency systems allowing pilots to minimize consequences of A/C overrun the RW.

## Active methods to reduce the risk of A/C overrunning the RW

The active methods to reduce the risk of A/C overrun the RW are based on the development of crew control input on A/C flight controls based on their own perception, onboard systems advisories or on the development of stimulus commands on the flight controls by the automatic onboard system without pilot involvement. For example, A/C Airbus 320neo are fitted out with the system of automatic control that implements a three-mode braking: LOW, MEDIUM, MAX<sup>5</sup>. A selection of the braking mode, relevant for the current landing instruction, is conducted by the crew prior to approach to land. The system of automatic braking on A/C Boeing 737NG operates in the similar manner.

The modified systems are installed on the latest generation A/C, which operation is, more likely, aimed at alerting the crew about the contingency of overrun (elimination of errors before landing) rather than at a direct crew intervention at the point of the landing and landing roll.

Let us analyze in detail the operation principles of the stated systems on the example of A/C B777 and A350.

In 2010 during the modification of A/C A380 and the design of A/C A350, Airbus developed a warning and overrun prevention system – Runway Overrun Prevention System (ROPS). ROPS assesses continuously a capability of an A/C safe stop on the rest of the RW ahead of the A/C.

If the system detects a risk of RW overshoot at some point, the appropriate warnings go off in a flight deck. ROPS has access to the parameters that influence the A/C landing distance, particularly to A/C coordinates, values of true and air speed [11].

ROPS incorporates two subfunctions: ROW and ROP. ROW generates signals which cause a flight crew to make a go-around procedure (alert about a contingency of rolling-off). ROP gener-

<sup>5</sup> Aircraft maintenance manual for Airbus A320. By Airbus Corp. Available at: <https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2021-11/Airbus-Commercial-Aircraft-AC-A320.pdf> (accessed: 28.11.2021).

ates signals which cause a flight crew to apply available deceleration facilities (overrun prevention)<sup>6</sup>.

ROW becomes active at the altitude of 500 feet and remains active during the entire final phase of approach to land, flare-out and landing until ROP transition. On Airbus family A/C A380, A330 and A320 ROW calculates continuously two braking ways: a braking distance on a dry and wet RW. If a braking distance for a wet RW becomes longer than the available RW length, a message “IF WET: RW TOO SHORT” comes on. If a braking distance for a dry RW becomes longer than the available RW length, a system displays a red warning message on PFD: “RW TOO SHORT” (fig. 2) [11].

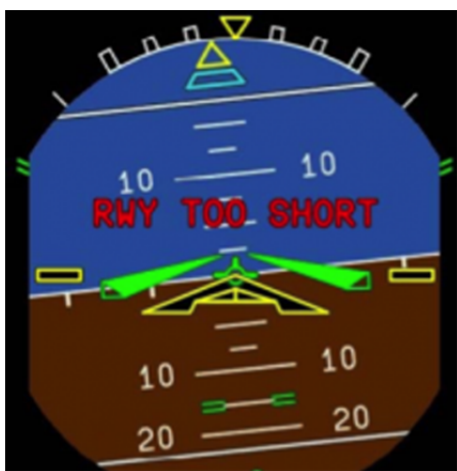


Fig. 2. The RWY TOO SHORT message on the A320 PFD display

ROP is triggered on the ground after transition from ROW and remains active until reaching the taxiing speed. ROP uses a current value of the A/C deceleration and A/C performance to determine where the A/C can stop safely on the RW. If ROP detects the risk of overrun, the aural and visual alerts are activated. A red visual warning “MAXIMUM BREAKING, MAXIMUM REVERSE” is displayed on PDF. If a condition of speed exceedance still exists at 70 knots (advisable speed of reverse thrust shutdown), an audible warning “MAINTAIN MAXI-

MUM REVERSE” goes off to notify a flight crew about the necessity for maintaining reverse thrust.

On A/C A380 and A350, ROPS is integrated into the systems of flight control, A/C navigation and presents pilots a constantly updated image in the real-time mode on the Navigation Display<sup>7</sup>.

The Boeing data system, applicable on A/C B777 and B787-Runway Awareness and Advisory System (RAAS)<sup>8</sup> has the similar functionality. RAAS (notification and warning system on the RW) generates the sound and verbal notifications for a flight crew about a critical A/C position on the RW. RAAS uses GPS (Global Positioning System) data and RW database to determine the A/C position regarding the RW. At the same time, the system does not virtually take into consideration the parameters and dynamics of the A/C motion in space.

Available variants of warnings issued by RAAS system are represented below (fig. 3):

- Approaching runway (in flight).
- Approaching runway (taxiing).
- On Runway.
- Extended holding time.
- Distance remaining (landing rollout).
- Distance remaining (rejected take-off).
- Runway end.

In addition to the stated above notifications, the system can issue the following notifications:

- Insufficient runway length.
- Taxiway takeoff.
- Approaching short runway<sup>9</sup>.

The technology Braking Action Computation Function (BASF), which is developed collaboratively by Airbus and NAVBLUE company and designed to ensure flights and traffic control, is another approach to decrease the risk of A/C overrun the RW. In essence, BASF represents a

<sup>6</sup> Quick reference hand book for Airbus A350. By Airbus Corp. Available at: <https://store.pcflier.com/m/product/view7.html> (accessed: 16.11.2021).

<sup>7</sup> EASA certifies ROPS for Airbus A330. AVIATION-WEEK. Available at: <https://aviationweek.com/easa-certifies-rops-a330> (accessed: 16.11.2021).

<sup>8</sup> Aircraft maintenance manual for Boeing 777. By Boeing Corp. Available at: [https://www.smartcockpit.com/docs/B777\\_Inflight\\_Fuel\\_leak.pdf](https://www.smartcockpit.com/docs/B777_Inflight_Fuel_leak.pdf) (accessed: 16.11.2021).

<sup>9</sup> Quick reference hand book for Boeing 777. By Boeing Corp. Available at: <https://www.yumpu.com/en/document/view/7446138/777-quick-reference-handbook-index-of> (accessed: 16.11.2021).

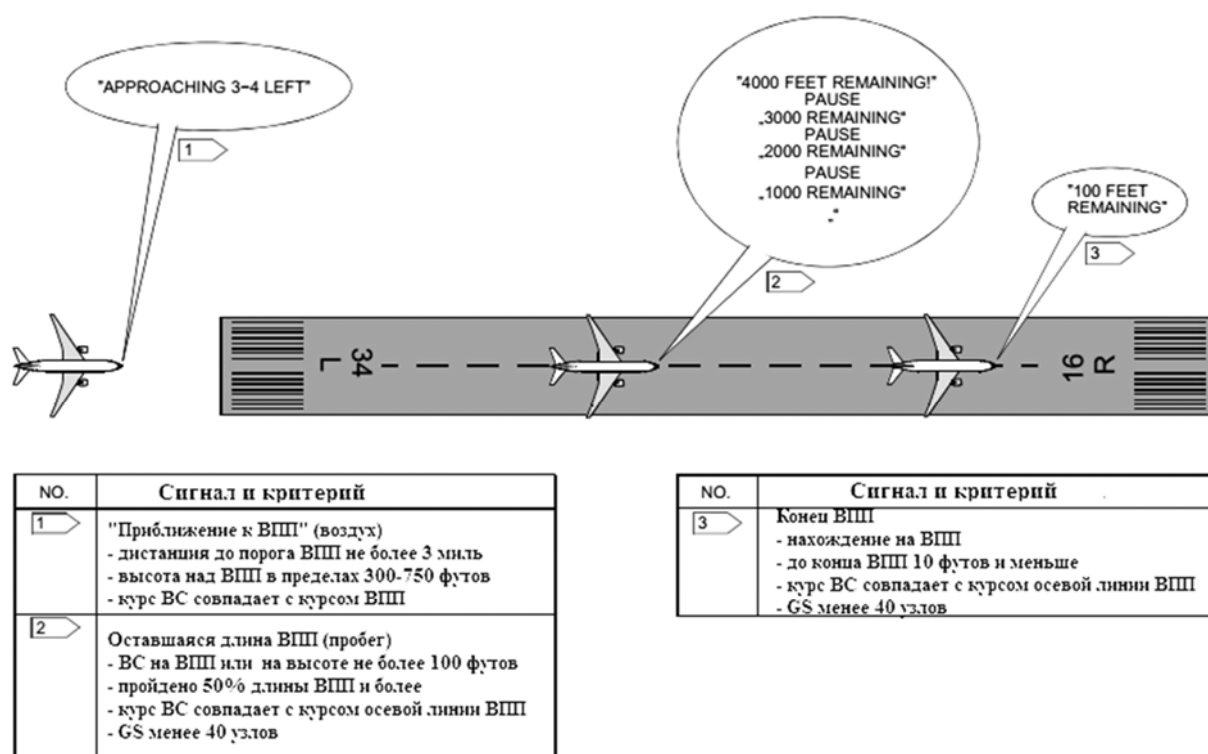


Fig. 3. RAAS system signals, generated during the approach to land and landing roll on the RW

special software function, implemented by a complex of A/C airborne equipment, which is based on the Airbus-developed mathematical model. BASF uses data about braking conditions for calculation and defines the contribution into the overall braking efficiency of each of the systems (spoilers, reverse, and wheel brakes). Moreover, BASF compares the actual braking values with data about possible RW conditions from Airbus database. Afterwards, it makes a conclusion about the braking capability and draws up a report with an assessment of braking performance, which pilots can see on the display of the onboard digital computer<sup>10</sup>. BASF data are accumulated in the single database (transmitted via ACARS to the server), which allows an airline to store braking data concerning all the flights of all A/C and to define the most efficient braking techniques depending on the actual conditions. It enables pilots to reduce the number of A/C rolling-off [12].

<sup>10</sup> Runway overrun prevention system (ROPS). Skybrary. Available at: <https://skybrary.aero/articles/runway-overrun-prevention-system-rops> (accessed: 22.11.2021).

Furthermore, in the real-time mode BASF data enter a special service NAVBLUE RunwaySense, compiling all the reports about the RW condition, which allows RunwaySense users to use the precise information in the real-time mode about the RW surface condition at different airports worldwide (fig. 4) [13]. Guided by the objective data, an airport can transmit more precise data about the braking coefficient to crews of inbound A/C and arrange work to clear the RW<sup>11</sup>.

Operation efficiency of the similar systems is quite high. In the process of test flights, the number of erroneous warnings was equal to less than 0.1%.

Nevertheless, new A/C from a manufacturer are basically equipped by the similar systems, more rarely, A/C in service will be retrofitted [14]. It is related both with the relatively high cost of after-production modification and the necessity of A/C putting out of a flight schedule.

<sup>11</sup> Navblue corporation website. NAVBLUE. Available at: <https://www.navblue.aero/products/rops-plus/> (accessed: 29.11.2021).





Fig. 4. Example of MCDU screen with the runway status output from BACF

Moreover, optionality of such modifications at the state level has consequences. The perspective of installing these systems on A/C, manufactured by domestic enterprise, is vague due to high costs to implement the similar functions and lack of the requirement for its availability. At the same time, in May 2021, the most major domestic airline Aeroflot-Russian Airlines announced the beginning of BASF<sup>12</sup> technology application [15] among the Russian operating airlines.

### Passive methods to reduce the risk of A/C overrunning the RW

The passive methods diminish the consequences of A/C overrunning the RW. The areas beyond the RW threshold, which are called the runway end safety area (RESA), are conventionally designed for this purpose. Until recently, the RESA length came to 60 m.

The ICAO modern standards require to have RESA not less than 90 m advising a 240 m length concurrently. However, not always feasibility exists to be consistent with the ICAO recommended practices [14]. In addition, the surfaces beyond RESA boundaries are usually grass and soil, which properties depend on weather conditions (humidity, temperature, etc.). During

motion on wet soil, for example, the A/C can sink into the soil, and it can cause the landing gear to collapse. Subsequently, there may be significant damage to the A/C, which eventually increases the risk of fire, injuries and fatalities among passengers and crew members [16].

The passive emergency braking system Engineered Materials Arresting System (EMAS) can be regarded as one of the most perspective and efficient passive methods to reduce the risk of A/C overrun. EMAS was developed by the group Zodiac Aerospace and approved by the US Federal Aviation Administration (FAA). EMAS represents a construction as a flat artificial surface comprising of assembled units and located next to the RW threshold. The design of units ensures their controllable destruction during obstacle encounter, smooth A/C deceleration without its damage, the subsequent efficient restoration of EMAS by means of replacing ruined units.

In 2012 FAA issued a special circular No 150/5220-22B dedicated to the issues of the design and requirements for the EMAS material [17]. The basic requirements for the given system outline the following:

- water resisting,
- incombustibility,
- no emission of fumes during fire,
- resistance to the environment impact,
- a capability of an A/C halt, overrunning at max speed 70 knots without exceeding ultimate loads, severe damage and negative impacts on passengers,

<sup>12</sup> Using aircraft as a sensor on contaminated runways safety first. (2018). Airbus, no. 26. Available at: <https://safetyfirst.airbus.com/using-aircraft-as-a-sensor-on-contaminated-runways/> (accessed: 29.11.2021).

- resistance to a jet blast during a routine aerodrome operation<sup>13</sup>.

Currently, several airports in the USA, China, Europe and Middle East are equipped with the similar systems.

Systems of this type have not been utilized and certified so far in Russia. The requirements of regulatory and supervisory authorities for them are not available. At the same time, it is obvious that the application of these systems like EMAS would enhance flight safety, for example, at Sochi airport and allow us to avoid in future the negative scenarios which occurred in Vnu-kovo and Kaliningrad.

## Conclusion

Nowadays the task of reducing A/C overrun-related aviation events is crucial. The international experience, growing frequency of AE, involving A/C overrun, highlights the relevance of developing the special active (installed on board A/C) and passive (mounted at an aerodrome) systems in order to decrease the number and consequences of A/C overrun the RW in Russia. The similar systems are not available on A/C in service and domestic currently designed ones as well as at aerodromes. We should note that in order to implement these events in our country, there is no essential regulatory framework as well as research and technological groupwork. Therefore, it is vital to conduct research, development and engineering work, develop projects of regulatory-technical base with the aim of designing the active and passive systems to prevent (diminish) consequences of A/C overrun the RW, and equip domestic A/C and aerodromes with the similar facilities.

## References

1. **Mozolyako, A.V., Akimov, A.N. & Vorobyev, V.V.** (2014). *Status and development*

*of runway overrun prevention systems*. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, no. 204, pp. 74–77. (in Russian)

2. **Ermakov, A.L., Kiselev, M.A., Kublanov, M.S., Trofimov, V.V. & Tsipenko, V.G.** (2019). *Study of civil aircraft takeoff and landing characteristics under conditions of low friction coefficient using mathematical modeling*. XXX nauchno-tehnicheskaya konferentsiya po aerodinamike: materialy konferentsii, posvyashchennoy 150-letiyu so dnya rozhdeniya S.A. Chaplygina, pp. 113–114. (in Russian)

3. **Muzhichek, S.M., Kiselev, M.A. & Sapozhnikov, A.V.** (2018). *Method for preventing longitudinal aircraft rolling-off beyond airstrip and device for its implementation*. Patent for the invention RU 2668008 C2, IPC B64F 5/00; B64C 25/00: publ. September 25, 14 p. (in Russian)

4. **Noland, D. & Peterson, B.** (2021). *13 Plane crashes that changed aviation*. *Popular mechanics*. April 29. Available at: <https://www.popularmechanics.com/flight/g73/12-airplane-crashes-that-changed-aviation/> (accessed: 28.11.2021).

5. **Alaimo, A., Esposito, A., Orlando, C. & Simoncini, A.** (2020). *Aircraft pilots workload analysis: heart rate variability objective measures and NASA-Task load index subjective evaluation*. *Aerospace*, vol. 7, issue 9, ID: 137. DOI: 10.3390/aerospace7090137 (accessed: 28.11.2021).

6. **Ratté, P.S.** (2018). *Runway excursions: make it stop*. *DataLead*. October 31. Available at: <https://safetystanddown.com/en/runway-excursions-make-it-stop> (accessed: 28.11.2021).

7. **Mayolle, M., Pellet, S. & Lesceu, X.** (2015). *Lateral runway excursions upon landing*. *Safety first*, July no. 20, pp. 1–14.

8. **Hradecky, S.** (2017). *Accident: Eastern Air Lines B737 at New York on Oct 27th 2016, overrun runway on landing long*. *Avherald*, September 22. Available at: <http://avherald.com/h?article=49ff6bcc> (accessed: 28.11.2021).

9. **Insley, J. & Turkoglu, C.** (2020). *Contemporary analysis of aircraft maintenance-related accidents and serious incidents*. *Aerospace*, vol. 7, issue 6, ID: 81. DOI: 10.3390/aerospace7060081 (accessed: 28.11.2021).

<sup>13</sup> Engineered materials arresting systems (EMAS) for Aircraft Overruns, FAA Advisory Circular No: 150/5220-22B. Available at: [https://www.faa.gov/airports/resources/advisory\\_circulars/index.cfm/go/document.current/documentNumber/150\\_5220-22](https://www.faa.gov/airports/resources/advisory_circulars/index.cfm/go/document.current/documentNumber/150_5220-22) (accessed: 29.11.2021).



10. **Gandhewar, P. & Sonkusare, G.H.** (2014). *Runway excursion: a problem*. OSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE), vol. 11, issue 3, Ver. II, pp. 75–78. DOI: 10.9790/1684-11327578

11. **Distefano, N. & Leonardi, S.** (2020). *Aircraft runway excursion features: a multiple correspondence analysis*. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, vol. 91, no. 1, pp. 197–203. DOI: 10.1108/AEAT-11-2017-0244

12. **Proud, S.R.** (2020). *Go-around detection using crowd-sourced ADS-B position data*. Aerospace, vol. 7, issue 2, ID: 16. DOI: 10.3390/aerospace7020016 (accessed: 28.11.2021).

13. **Kumar, S.G., Corrado, S.J., Purnanik, T.G. & Mavris, D.N.** *Classification and analysis of go-arounds in commercial aviation using ADS-B data*. Aerospace, vol. 8, issue 10, ID: 291. DOI: 10.3390/aerospace8100291 (accessed: 28.11.2021).

14. **Yijian, (Jack) Shi.** (2010). *EMAS core material modeling with LS-DYNA*. 11th International LS-DYNA user conference. Aerospace (2), pp. 16–21.

15. **Orlova, L.V., Galiguzova, A.A. & Smirnova, A.D.** (2020). *The scope of artificial intelligence in aviation*. Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya, no. 67-1, pp. 35–38. (in Russian)

16. **Yang, L., Wang, S., Liang, F. & Zhao, Z.** (2021). *A holistic approach for optimal pre-planning of multi-path standardized taxiing routes*. Aerospace, vol. 8, issue 10, ID: 241. DOI: 10.3390/aerospace8090241 (accessed: 25.11.2021).

17. **Ketabdari, M., Toraldo, E., Crispino, M. & Lunkar, V.** (2020). *Evaluating the interaction between engineered materials and aircraft tyres as arresting systems in landing overrun events*. Case Studies in Construction Materials, vol. 13, ID: e00446. DOI: 10.1016/j.cscm.2020.e00446 (accessed: 25.11.2021).

## Список литературы

1. **Мозоляко А.В., Акимов А.Н., Воробьев В.В.** Проблемы предотвращения выкатывания гражданских воздушных судов на

этапе пробега по ВПП // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 204. С. 74–77.

2. **Ермаков А.Л.** Исследование особенностей взлета и посадки транспортных самолетов в условиях низкого коэффициента сцепления с применением математического моделирования / А.Л. Ермаков, М.А. Киселев, М.С. Кубланов, В.В. Трофимов, В.Г. Ципенко // XXX научно-техническая конференция по аэродинамике: материалы конференции, посвященной 150-летию со дня рождения С.А. Чаплыгина. Московская обл., п. Володарского, 25–26 апреля 2019. ЦАГИ, 2019. С. 113–114.

3. **Мужичек С.М., Киселев М.А., Сапожников А.В.** Способ предотвращения продольного выкатывания воздушных судов за пределы взлетно-посадочной полосы и устройство для его осуществления. Патент RU № 2668008 С2, МПК В64F 5/00; В64С 25/00: опубл. 16.12.2016. 14 с.

4. **Noland D., Peterson B.** 13 Plane crashes that changed aviation. Popular mechanics [Электронный ресурс] // Popularmechnics. 29 April 2021. URL: <https://www.popularmechnics.com/flight/g73/12-airplane-crashes-that-changed-aviation/> (дата обращения: 28.11.2021).

5. **Alaimo A.** Aircraft pilots workload analysis: heart rate variability objective measures and NASA-Task load index subjective evaluation / A. Alaimo, A. Esposito, C. Orlando, A. Simoncini [Электронный ресурс] // Aerospace. 2020. Vol. 7, iss. 9. ID: 137. DOI: 10.3390/aerospace7090137 (дата обращения: 28.11.2021).

6. **Ratté P.S.** Runway excursions: make it stop [Электронный ресурс] // DataLead. 31 October 2018. URL: <https://safetystanddown.com/en/runway-excursions-make-it-stop> (дата обращения: 28.11.2021).

7. **Mayolle M., Pellet S., Lesceu X.** Lateral runway excursions upon landing // Safety first. 2015. July № 20. Pp. 1–14.

8. **Hradecky S.** Accident: Eastern Air Lines B737 at New York on Oct 27th 2016, overrun runway on landing long [Электронный ресурс] // Avherald. 22 September 2017. URL: <http://avherald.com/h?article=49ff6bcc> (дата обращения: 28.11.2021).

**9. Insley J., Turkoglu C.** Contemporary analysis of aircraft maintenance-related accidents and serious incidents [Электронный ресурс] // Aerospace. 2020. Vol. 7, iss. 6. ID: 81. DOI: 10.3390/aerospace7060081 (дата обращения: 28.11.2021).

**10. Gandhewar P., Sonkusare G.H.** Runway excursion: a problem // OSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE). 2014. Vol. 11, iss. 3. Ver. II. Pp. 75–78. DOI: 10.9790/1684-11327578

**11. Distefano N., Leonardi S.** Aircraft runway excursion features: a multiple correspondence analysis // Aircraft Engineering and Aerospace Technology. 2020. Vol. 91, no. 1. Pp. 197–203. DOI: 10.1108/AEAT-11-2017-0244

**12. Proud S.R.** Go-around detection using crowd-sourced ADS-B position data [Электронный ресурс] // Aerospace. 2020. Vol. 7, iss. 2. ID: 16. DOI: 10.3390/aerospace7020016 (дата обращения: 28.11.2021).

**13. Kumar S.G.** Classification and analysis of go-arounds in commercial aviation using ADS-B data / S.G. Kumar, S.J. Corrado, T.G. Puranik, D.N. Mavris [Электронный ресурс] // Aerospace. 2021. Vol. 8, iss. 10.

ID: 291. DOI: 10.3390/aerospace8100291 (дата обращения: 28.11.2021).

**14. Yijian (Jack) Shi.** EMAS core material modeling with LS-DYNA // 11th International LS-DYNA user conference. Aerospace (2). 2010. Pp. 16–21.

**15. Орлова Л.В., Галигузова А.А., Смирнова А.Д.** Область применения искусственного интеллекта в авиации // Тенденции развития науки и образования. 2020. № 67-1. С. 35–38. DOI: 10.18411/lj-11-2020-09

**16. Yang L.** A holistic approach for optimal pre-planning of multi-path standardized taxiing routes / L. Yang, S. Wang, F. Liang, Z. Zhao [Электронный ресурс] // Aerospace. 2021. Vol. 8, iss. 10. ID: 241. DOI: 10.3390/aerospace8090241 (дата обращения: 25.11.2021).

**17. Ketabdari M.** Evaluating the interaction between engineered materials and aircraft tyres as arresting systems in landing overrun events / M. Ketabdari, E. Toraldo, M. Crispino, V. Lunkar [Электронный ресурс] // Case Studies in Construction Materials. 2020. Vol. 13. ID: e00446. DOI: 10.1016/j.cscm.2020.e00446 (дата обращения: 25.11.2021).

### Information about the authors

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

**Aleksey I. Volynchuk**, Postgraduate of the Aerodynamics, Design and Aircraft Strength Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Category “A” Technician, JSC “Royal Flight Airlines”, aleksej\_vol@mail.ru.

**Shamil F. Ganiev**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Flight and Life Safety Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, shamgan@mstuca.aero.

**Mikhail A. Kiselev**, Doctor of Technical Sciences, Professor, the Head of the Aerodynamics, Design and Aircraft Strength Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, m.kiselev@mstuca.aero.

**Igor A. Nosatenko**, Postgraduate of the Aerodynamics, Design and Aircraft Strength Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, nosatenko221b@gmail.com.

### Сведения об авторах

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

**Волынчук Алексей Игоревич**, аспирант кафедры аэродинамики конструкции и прочности летательных аппаратов МГТУ ГА, техник категории «А» в АО «Авиакомпания «Роял Флайт», aleksej\_vol@mail.ru.

**Ганиев Шамиль Фангалиевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности полетов и жизнедеятельности МГТУ ГА, shamgan@mstuca.aero.

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

**Носатенко Игорь Андреевич**, аспирант кафедры аэродинамики конструкции и прочности летательных аппаратов МГТУ ГА, nosatenko221b@gmail.com.

Поступила в редакцию 28.01.2022  
Принята в печать 24.03.2022

Received 28.01.2022  
Accepted for publication 24.03.2022

УДК 621.396.96

DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-20-29

## Adaptive information management system of dynamic monitoring of actual water content in jet fuel in technological processes of aviation fuel supply

A.A. Brailko<sup>1</sup>, V.M. Samoylenko<sup>1</sup>, N.A. Druzhinin<sup>2</sup>, L.A. Druzhinin<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>*LLC "Rosneft Aero", Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*JSC "Aviation Fuel Company", Moscow, Russia*

**Abstract:** Modern domestic and international standards, regulators of the aviation fuel industry, considering the negative impact of the presence of mechanical impurities and water in aviation fuel on the performance and life cycle of aircraft engines, fuel metering equipment, fuel systems of aircraft (A/C), as a threat factor for flight safety, impose high requirements for the purity of aviation fuel while operating aeronautical equipment. At the same time, the causes and sources of water content in jet fuel are a source of economic losses, the most important criterion for the success of the Aerodrome Fueling Complex business. The article considers the task of developing reliable and automated methods as well as technologies for controlling these contaminants, for example for determining water content in aviation fuel when refueling aircraft, and the necessity to minimize an effect of a human factor. The automation of aviation fuel quality monitoring processes, the transition from discrete control methods to continuous ones, from static control methods to dynamic ones (in-line), from indirect methods to direct ones are becoming relevant. The possibilities of end-to-end accounting and analysis of aviation fuel purity parameters at all stages of the aviation fuel life cycle are shown. The article considers the methods and conducts the analysis of known techniques and devices used to determine, measure and indicate actual water content, presence of dissolved, free and total water in jet fuel. The technical solution of continuous automated control of the actual water content level of the jet fuel flow in the processes of aviation fuel supply and aircraft refueling in an information system that provides on-line monitoring and dynamic measurement of the quantitative content of dissolved and free water in the jet fuel flow, is presented. The technical solution for the continuous determination of the quantitative water content in the jet fuel stream is proposed. At the same time, the solution of the problem of monitoring water content in jet fuel is combined with the technological process to control the purification of jet fuel from water. The paper represents an adaptive information management system for continuous monitoring of the water content level of the jet fuel flow, which will allow specialist to substantially increase a level of automatization of aircraft aviation fuel supply technological processes, decrease a negative impact of a human factor, increase economic effectiveness of the aviation fuel supply complex. The system is designed to carry out continuous, automated control (monitoring) of water content in the jet fuel flow at all the stages of the jet fuel movement: receiving, storing and delivering jet fuel and refueling aircraft, in particular fuel and lubricants warehouses (fuel and lubricants), refueling complexes and pre-apron filling points. It can also be used in the fuel system of the aircraft, as a system to prevent water content in the jet fuel. The integration of automation tools will enable us to improve the quality of management of aviation fuel supply and aircraft refueling to ensure timely operational decision based on real data in real time mode, provided the proposed system integration into the airport system for operational data exchange.

**Key words:** refueling complex, the actual water content in jet fuel, porous polyvinyl formal (PVFM), selective separation, coagulation, programmable logic controller (PLC), adaptive information management system, dynamic monitoring.

**For citation:** 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

## Адаптивная информационно-управляющая система динамического мониторинга фактической обводненности авиатоплива в технологических процессах авиатопливообеспечения

А.А. Браилко<sup>1</sup>, В.М. Самойленко<sup>1</sup>, Н.А. Дружинин<sup>2</sup>,  
Л.А. Дружинин<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>ООО «Роснефть Аэро», г. Москва, Россия

<sup>3</sup>АО «Авиационно-топливная компания», г. Москва, Россия

**Аннотация:** Современные отечественные и международные требования регуляторов отрасли авиатопливообеспечения, принимая во внимание негативное влияние присутствия механических примесей и воды в авиатопливе на работоспособность и ресурс авиадвигателей, топливорегулирующей аппаратуры, топливных систем воздушных судов (ВС) как фактора угрозы безопасности полетов ВС, предъявляют к чистоте применяемого при эксплуатации авиационной техники авиатоплива высокие требования. Вместе с тем причины и источники обводнения авиатоплива являются источником экономических потерь, важнейшим критерием успешности бизнеса топливозаправочного комплекса. В статье рассматривается задача создания надежных и автоматизированных методов и технологий контроля этих загрязнений, в частности определения воды в авиатопливе при заправке ВС и необходимости ухода от человеческого фактора. Актуальным становится автоматизация процессов мониторинга качества авиатоплива, переход от дискретных методов контроля к непрерывным, от статических методов контроля к динамическим (поточным), от косвенных способов к прямым. Показаны возможности сквозного учета и анализа параметров чистоты авиатоплива на всех этапах жизненного цикла авиатоплива. Рассмотрены способы, и проведен анализ известных методов и устройств, используемых для определения, измерения и индикации: фактической обводненности; присутствия растворенной, свободной и суммарной воды в авиатопливе. Представлено техническое решение непрерывного автоматизированного контроля уровня фактической обводненности потока авиатоплива в процессах авиатопливообеспечения и заправки ВС в информационной системе, обеспечивающей on-line контроль и динамическое измерение количественного содержания растворенной и свободной воды в потоке авиатоплива. Предложено техническое решение по непрерывному определению количественного содержания воды в потоке авиатоплива. При этом решение задачи мониторинга воды в авиатопливе совмещено с технологическим процессом контроля очистки авиатоплива от воды. Представлена адаптивная информационно-управляющая система непрерывного мониторинга уровня обводненности авиатоплива в потоке, которая позволит существенно повысить уровень автоматизации технологических процессов авиатопливообеспечения воздушных судов, снизить негативное влияние человеческого фактора, повысить экономическую эффективность комплекса авиатопливообеспечения. Система предназначена для осуществления непрерывного автоматизированного контроля (мониторинга) обводненности авиатоплива в потоке на всех этапах движения авиатоплива: приема, хранения и выдачи авиатоплива, и заправки ВС, в частности складов горюче-смазочных материалов, топливозаправочных комплексов, и пунктов передперонного налива, а также может быть использована в топливной системе ВС как система предотвращения обводнения авиатоплива. Внедрение средств автоматизации позволит повысить качество управления процессами авиатопливообеспечения и заправки ВС для обеспечения принятия своевременных оперативных решений на основе реальных данных в реальном режиме времени при условии интеграции предложенной системы в систему аэропорта для оперативного обмена данными.

**Ключевые слова:** топливозаправочный комплекс ТЗК, фактическая обводненность авиатоплива, пористый поливинилформаль, селективная сепарация, коагуляция, программируемый логический контроллер ПЛК, адаптивная информационно-управляющая система, динамический мониторинг.

**Для цитирования:** 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

### Introduction

Preservation of jet fuel quality is the main purpose of fueling complex operation while performing the aviation fuel supply technolo-

gy, along with quality specification level provision when refueling aircraft [1]. This requires the provision of maximum possible pressurization of the jet fuel drainage, filling, storage and transportation processes, as well as

aircraft refueling, application of the efficient water elimination technologies and equipment, preventive measures of aviation fuel-water adulteration [2–5], along with continuous monitoring of the jet fuel cleanliness level and water content in aviation fuel at all the aviation fuel supply stages [6, 7].

The possibility of water contamination of aviation fuel during transportation, storage and aircraft refueling is very high, and elimination of water from jet fuel is associated with significant difficulties as the process is cost-based and expensive (excessive filter elements consumption, increase of settlement duration), which eventually leads to the significant losses and not effective expenses for aviation fuel supply business, and represents a flight safety hazard.

The conventional jet fuel control to determine the mechanical impurity and water content is conducted both visually and by means of the express method using POZ-T facility. According to the regulatory requirements, such contamination should be not available while determining the content of mechanical impurities and free water using these techniques. The authors of the research [8, 9] analyzed the application of the mechanical impurities and the water content determination express method and its low sensitivity was identified, the obtained data proved sufficiently subjective.

A range of facilities means and techniques of water detection and elimination in jet fuels was considered in order to search of technical solutions. Nowadays the separator filters [10–12] are used for water elimination from the jet fuel. The principle of their operation is the coagulation of the water micro drops in the jet fuel on the surface of the filtering element glass fiber with formation of the water film. However, such a construction allows us to eliminate water from jet fuel, but not to determine its quantity, as the regulations require.

The authors set a task of solving the problem of not only purification of the jet fuel from water contamination, but also to determine probable quantity of water. The analysis of methods of jet fuel purification from free water [13, 14], based on optical devices usage [15–18], is conducted in this article. Thus, the paper suggests [16] the use

of the polymeric optical fiber, the material of which, absorbs water, depending on its quantity, and varies its properties such as the geometrical dimensions, throughput capacity, light refraction, which allows us to quantify water in jet fuel.

The method of quantifying water in fuels and oils is used considering water electrical conductivity. The principle of the following method is based on determining breakdown voltage at the electrodes, in case of water presence in fuel or oil, and comparing with the identified dependence of this voltage on the quantity of free water.

The facility, based on the fixation of released hydrogen by the photodiode in the process of the water-reagent chemical reaction, is used while controlling the available water in diesel fuel. Water is quantified by the quantity of released hydrogen [17].

The analysis of applicable techniques to detect water in oil products shows, that the facilities are complicated enough. They allow us to detect the presence of water, but not to eliminate, and require definite qualification to deal with.

Among the drawbacks of conventional techniques and methods of jet fuel water content monitoring and the express analysis, we can refer to the following:

- the given methods of water content control are not continuous, as they are based on the spot and discrete sampling from the assigned zones or the pipeline areas, as a result, not the whole amount of jet fuel is controlled for water,
- the existing methods are manual and visual, significantly labor-consuming, do not possess the required sensitivity and are especially subjective, their accuracy and reliability depends on the negative impact of a human factor involving a high probability of mistakes, malfunctions and contributing risks,
- failure to determine quantitative water content in jet fuel, not only its availability,
- it is difficult to automatize the conventional techniques and methods of water content monitoring and express-analysis. In the circumstances of intensive transportation

volume growth and modern tendencies of civil aviation development, they do not solve a task of ensuring the automatized jet fuel control at the point, approved for refueling the aircraft,

- the given methods of water content control, based on the normative standard (order No DB-126 from October 17<sup>th</sup>, 1992) of time of settling – 4 hours/m of innage level – without considering the level of water content and impurity, which leads to ineffective costs.

The listed shortcomings are complicated with the refueling complex loading rate, that is a large volume and the number of aircraft refueling cycles typical for high-capacity airports.

A possibility of making a timely decision is excluded while using the given control methods, due to the long delay in obtaining the laboratory analysis results, therefore, the duration of a cycle activity of technological aviation fuel supply processes increases, causing economical costs to increase respectively.

The use of the conventional control methods hinders implementing automatization of the technological process of aircraft refueling and aviation fuel preparation, which leads to increase in prices for jet fuel and aircraft refueling services, and to the risks of decrease in airlines flights punctuality, in some cases.

## Description of the dynamic monitoring system

Foreign and domestic experience [3, 7] shows us, that it is feasible to solve the problems of jet fuel purity control from free water and mechanical impurities by implementing the automatized measuring instruments (AMI), information measuring systems (IMS) and data management systems (DMS), which can subsequently become a basis (or components) of a single automatized system of airport refueling complex technological processes management.

The authors proposed the adaptive data management system of maintaining the assigned level of water content, based on the constant monitoring of jet fuel water content control [18, 19].

The system allows us to make a timely decision about jet fuel delivery for aircraft refueling, based on the constant quantifying of water content in jet fuel, approved for the aircraft refueling. Using of the proposed system in the whole aviation fuel supply process enables us to assess the efficiency of aviation fuel purification from water devices, means for aircraft refueling and filtration. In addition, the given system provides us with a possibility of possessing the objective data on jet fuel quality in real-time mode and throughout the entire technological chain from jet fuel reception to its filling into the aircraft wing tanks.

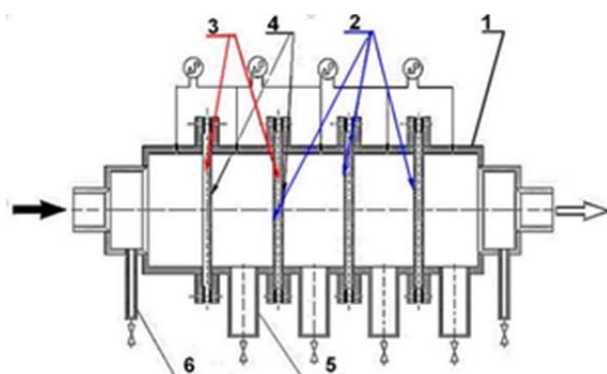
Functional capabilities of the developed system:

- quantifying of free water in jet fuel,
- control of water separating filter state,
- jet fuel purification from water.

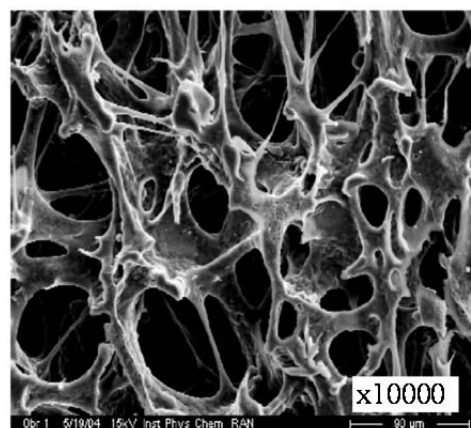
The essence of the proposed system is that jet fuel flow (fig. 1) is passed through a water separating filter, which has several sequentially installed water-separating cells. Structurally each of the cells is made of porous polyvinyl-formal material (fig. 2), as an autonomous water separating filter. Differential pressure is measured on every partition, being processed by PLC (fig. 3), and calculations of the partition flow resistance are carried out. Flow resistance of every cell will depend on the quantity of detained water. After separation in a cell, the collected water is drained into the sump.

As a result of the system operation, water is eliminated from the jet fuel; the level of water content is quantified, based on measurement of porous partitions flow resistance value; the porous partition state is assessed.

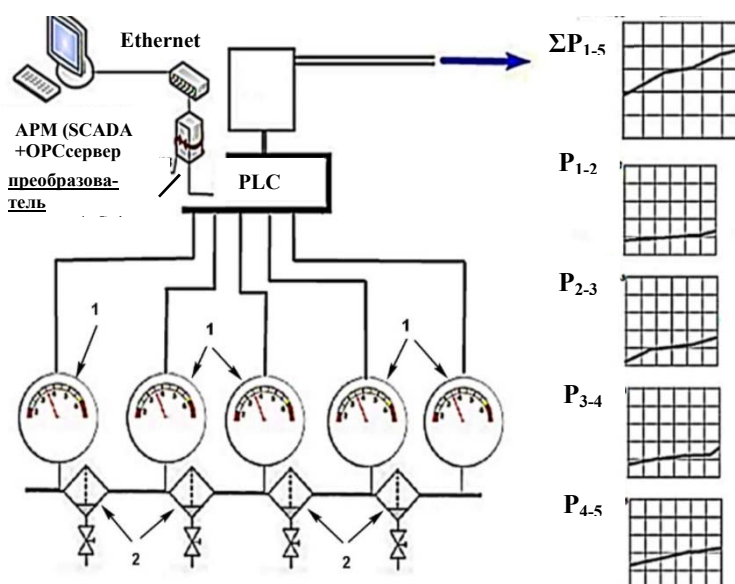
The principle of the proposed water separator operation is concerned with the properties of the porous polyvinyl formal material, particularly with its water absorbing properties. It is of rough glasslike porous structure before the contact with water, and after water saturation the material plumps and obtains the elastic state and water coagulating features. Afterwards, the porous polyvinyl formal material is dried with dehydrated fuel flow (of a very low water content level) in order to restore the system in its original condition (to regenerate). Subsequently, the collect-



**Fig. 1.** Water separator diagram of the jet fuel water content monitoring system: 1 – housing; 2 – separator; 3 – coagulator; 4 – support grid; 5 – drain outlets; 6 – sampler outlet



**Fig. 2.** Porous polyvinyl formal



**Fig. 3.** Schematic diagram of the jet fuel water content monitoring system: PLC-programmable logic controller implementing algorithm; 1 – pressure sensors; 2 – water separator

ed water in the partition is eliminated and transfers into jet fuel in the molecular, diluted state, (water content in fuel is less than 0,001% (by mass)).

The application of PLC allows us to record the obtained values of differential pressure and compare them with the current ones of every partition, comprising an array of mathematics. Such an approach enables us to quantify the current water content in the transmitted flux of jet fuel, at the output of the intermediate partitions and the final porous one.

If the polyvinyl formal cells reach the ultimate water level (most commonly, the first one), it transfers into a coagulation mode. Dry-

ing the polyvinyl formal cell allows us to return it to its original state, as its flow resistance decreases.

Based on the conducted investigations, the system (fig. 4), which can be integrated into the airport systems and services, such as, for instance: GroundStar (GS) – a complex of software applications, automatizing the airport operations; RMS – Resource Management System – resource management system; AFMS – Aircraft Fueling Management System – information system for aircraft refueling operations management; CoTAS – Computer Terminal Automation System – for a refueling complex production processes management.



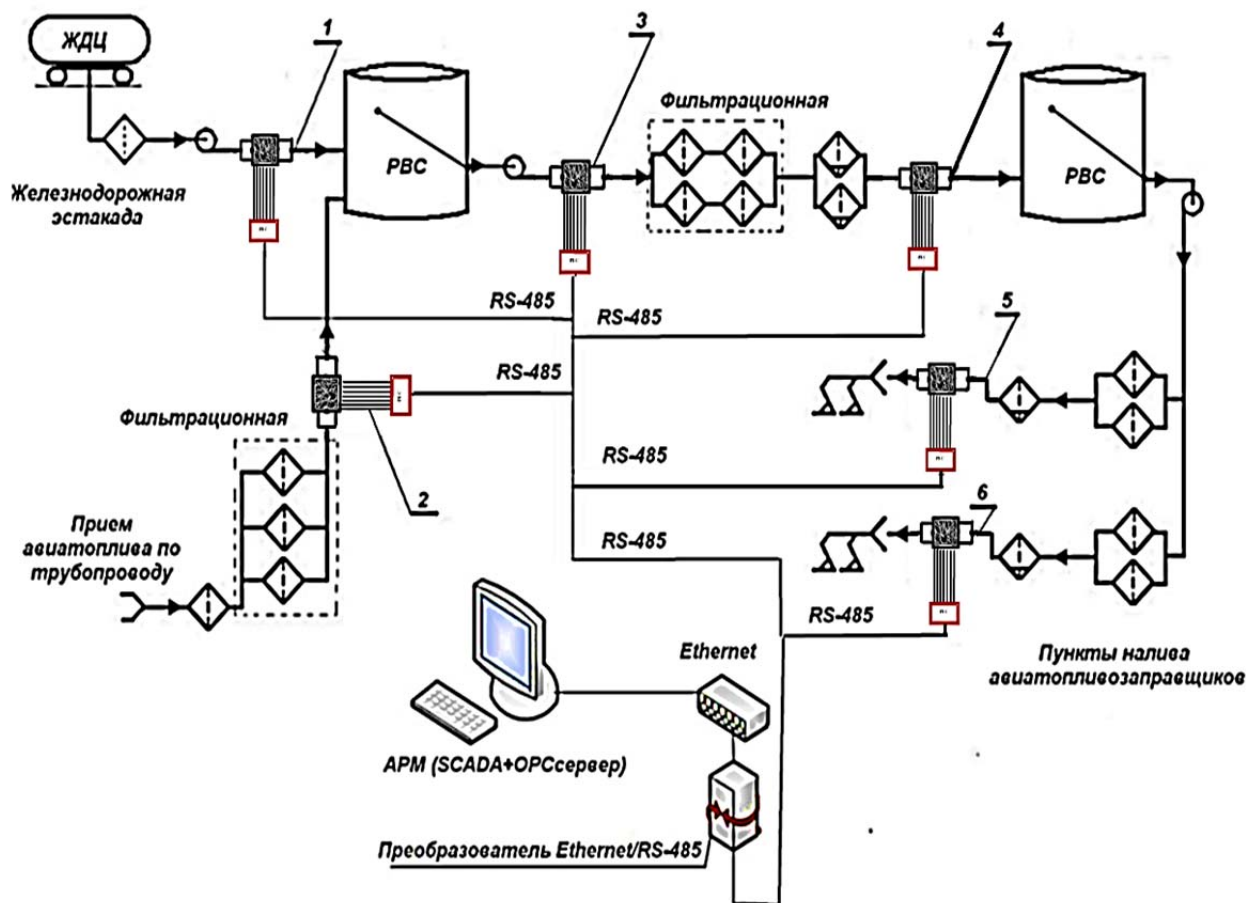


Fig. 4. The structural diagram of the information management system for monitoring the water content of jet fuel, data acquisition about the water content level:

1. When receiving jet fuel from the railway.
2. When transferring jet fuel through the pipeline.
3. When transferring jet fuel from recipient reservoirs to service tanks (after sedimentation).
4. When transferring jet fuel from recipient reservoirs to service tanks (after filtration and water separation).
5. When delivering jet fuel to refueling facilities (refuellers).
6. When delivering jet fuel to refueling facilities (refuellers).

## Advantages of the system

The implementation and integration of the adaptive data management system of dynamic monitoring of actual jet fuel water content will allow us to significantly increase the aviation fuel supply process automatization level, to minimize the negative impact of a human factor, to optimize the refueling complex economical losses in a significant way, to increase flight safety and regularity.

The system of continuous jet fuel water content monitoring allows us to:

- conduct the on-line control of the whole jet fuel flow volume at all the aviation fuel supply technological process stages,

from reception to supply for the refueling,

- provide the quantity water content control, by weight and percentage,
- build the balance of jet fuel contamination, instrument for making the timely technological decisions and business analysis,
- adopt as a system of preliminary prevention, signaling about the exceedance of water content limits and allowing us to make timely decisions, along with adjusting the commercial relations (ceasing, blocking of improper fuel reception), also to optimize the equipment operation, determining the early signs of failure in advance and setting the maximally efficient modes,

- choose, in an automatic mode, the optimal algorithm and aviation fuel supply strategy, depending on jet fuel water content level, basing on the measurements, to use the rational technology and the correct conjunction of settling time, specifics and graduation of filtration, providing the flexibility and economic efficiency due to the optimal equipment use,
- exclude the negative impact of a human factor,
- implement the function of the flight data recorder (self-recording device) – the “black box” analogue on the aircraft, due to the function of logging and dispatching, and provide data for the incident investigation and business disputes solutions,
- provide the integration of airport ground support services into the refueling complex automatization platform and represent good possibilities for implementing the innovational digital technologies such as artificial intelligence, IIoT – Industrial Internet of Things, visualization and predictive analytics, as well as AFSC – Aviation Fuel Smart Contracts, blockchains and other cutting-edge airport digitalization technologies.

## Conclusion

It is feasible to implement the automatized systems, to integrate them into the collaborative systems of airport ground service and the aircraft flight preparation (Groundstar Inform GmbH)<sup>1</sup> and to develop the hardware-software “Warehouse – Refueling” module, functionally intended for jet fuel quality planning and control and its delivery for refueling, in order to increase the capabilities of the system due to the addition of new components, for solving the problem of automatized jet fuel quality control, along with the optimization of jet fuel preparation processes for aircraft refueling.

<sup>1</sup> Groundstar inform GmbH. INFORM. Available at: <https://www.inform-software.com/products/groundstar> (accessed: 22.09.2021).

Implementation of the dynamical monitoring system of actual water content will allow us to decrease the economic costs for fuel dehydrating, thus, to contribute to extra profit, to avert the risks of human factor negative impact on flight safety.

Implementing the automatized water content control system is particularly relevant for a major refueling complex, with a high level of jet fuel consumption.

Thus, implementing the means of jet fuel water content monitoring automatization, will enable us to increase the quality of aviation fuel supply and aircraft refueling processes management. Integration and data sharing with all the systems of APCS in real-time mode, will ensure to make timely decisions, based on the real data.

## References

1. **Romantsova, S.V. & Pavlov, S.S.** (2013). *Prevention of accumulation of water in fuel storage*. Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki, vol. 18, no. 1, pp. 253–254. (in Russian)
2. **Rybakov, K.V., Dmitriev, D.I. & Polyakov, A.S.** (1982). *Aviation filters for fuels, oils, hydraulic fluids and air*. Moscow: Mashinostroyeniye, 103 p. (in Russian)
3. **Smirnov, M.S. & Sakhno, G.I.** (1977). Actual water cut of fuels in fuel tanks of state-of-the-art aircraft. In book: Performance properties of aviation fuels, lubricants and special liquids (chemmotological issues). Kiev: KIIGA, pp. 14–16. (in Russian)
4. **Balashov, I.A., Kovba, L.V. et al.** (1987). *Guidelines for the quality analysis of fuels and lubricants in civil aviation*. Part 2. Moscow: Vozdushnyy transport, 168 p. (in Russian)
5. **Brailko, A.A., Gromov, O.V. & Druzhinin, L.A.** (2020). *Digital technologies are the basis of digital economy of civil aviation airport refueling complexes*. Civil Aviation High Technologies, vol. 23, no. 4, pp. 20–32. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-4-20-32 (in Russian)
6. **Klyucharev, L.G.** (1983). *The purity of aviation fuels, oils and special liquids and its*

control: Tutorial. Kuibyshev: KuAI, 74 p. (in Russian)

7. **Brailko, A.A., Gromov, O.V., Litinsky, G.I. & Gromov, V.K.** (2021). *Mathematical modeling of the process of functioning of objects and technical means of ensuring airfield control*. Civil Aviation High Technologies, vol. 24, no. 4, pp. 20–27. DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-4-20-27

8. **Brailko, A.A., Druzhinin, N.A. & Smulsky, A.V.** (2013). *Method for determining the water content in hydrocarbon fuel and a device for its implementation*. Patent RU no. 2502069, IPC G01N 33/22, B01D 25/00: publ. December 20, 12 p. (in Russian)

9. **Kauk, V.V. et al.** (2008). *Fuel quality analysis: Monograph*. Moscow: Ulyanovskiy Dom pechati, 696 p. (in Russian)

10. **Zhuldybin, E.N., Rybakov, K.V., Lavrentiev, A.A., Zuev, V.I., Chaika, S.V. & Bray, I.V.** (1976). *Filter-separator*. Patent SU no. 539587 A1, IPC B01D 25/00: publ. December 25, 2 p. (in Russian)

11. **Zhuldybin, E.N., Rybakov, K.V., Semerin, A.N. & Kovalenko, V.P.** (1982). *Filter-separator*. Patent SU No. 971415 A1, IPC B01D 25/00: publ. November 07, 6 p. (in Russian)

12. **Zhuldybin, E.N., Kovalenko, V.P., Nasekailo, A.V., Boyarchuk, L.V. & Shibbrook, I.E.** (1983). *Filter-separator*. Patent SU no. 1057068 A1, IPC B01D 25/00: publ. November 30. 4 p. (in Russian)

13. **Levchuk, V.I.** (1995). *Cartridge filter*. Patent RU no. 2050928, IPC B01D 27/04: publ. December 27, 6 p. (in Russian)

14. **Anderson, L.G., Dantuluri, S.V.V. & Shea, D.** (2012). *Method and system for water drainage in a fuel system*. Patent WO 2012/024013 A1: publ. February 23, 28 p.

15. **Brailko, A.A., Druzhinin, N.A. & Smulsky, A.V.** (2012). *A device for determining the water content in hydrocarbon fuels or in air*. Patent PM RU no. 122491, IPC G01N 35/08, G01N 33/22: publ. November 27, 26 p. (in Russian)

16. **Webb, D.J. & Zhang, C.** (2011). *Water-in-fuel sensor*. Patent WO 2011/027099 A1: publ. March 10, 14 p.

17. **Kartashevich, A.N. & Kozhushko, V.K.** (1993). *Diesel fuel water content control device*. Patent SU no. 1814694, IPC F02B 77/00, F02B 3/06: publ. May 07, 12 p. (in Russian)

18. **Smulsky, A.V., Zorya, E.I. & Nikitin, O.V.** (2012). *Separation filter unit*. Patent RU no. 2446858 C2, IPC B01D 35/12, F02M 37/22: publ. April 10. 6 p. (in Russian)

19. **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)

20. **Brailko, A.A., Druzhinin, N.A., Druzhinin, L.A. & Smulsky, A.V.** (2018). *Ventilating system of a tank for easily evaporating liquids*. Patent RU no. 182746 U1, IPC B65D 90/28: publ. August 29, 10 p. (in Russian)

## Список литературы

1. **Романцова С.В., Павлов С.С.** Предупреждение обводнения топлив при хранении // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2013. Т. 18, № 1. С. 253–254.

2. **Рыбаков К.В., Дмитриев Д.И., Поляков А.С.** Авиационные фильтры для топлив, масел, гидравлических жидкостей и воздуха: учеб. пособие. М.: Машиностроение, 1982. 103 с.

3. **Смирнов М.С., Сахно Г.И.** Фактическая обводненность топлив в баках современных самолетов. В кн.: Эксплуатационные свойства авиационных топлив, смазочных материалов и специальных жидкостей (вопросы химмотологии). Киев: КИИГА, 1977. С. 14–16.

4. **Балашов, И.А., Ковба Л.В. и др.** Методические рекомендации по анализу качества горюче-смазочных материалов в гражданской авиации. Ч. 2. М.: Воздушный транспорт, 1987. 168 с.

5. **Браилко А.А., Громов О.В., Дружинин Л.А.** Цифровые технологии – база цифровой экономики топливозаправочных комплексов аэропортов гражданской авиации // Научный Вестник МГТУ ГА. 2020. Т. 23, № 4.

С. 20–32. DOI: 10.26467/2079-0619-2020-23-4-20-32

6. **Ключарев Л.Г.** Чистота авиационных топлив, масел и специальных жидкостей и ее контроль: учеб. пособие. Куйбышев: КуАИ, 1983. 74 с.

7. **Brailko A.A.** Mathematical modeling of the process of functioning of objects and technical means of ensuring airfield control / A.A. Brailko, O.V. Gromov, G.I. Litinsky, V.K. Gromov // Civil Aviation High Technologies. 2021. Vol. 24, no. 4. Pp. 20–27. DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-4-20-27

8. **Браилко А.А., Дружинин Н.А., Смутьский А.В.** Способ определения содержания воды в углеводородном топливе и устройство для его осуществления. Патент RU № 2502069, МПК G01N 33/22, B01D 25/00: опубл. 20.12.2013. 12 с.

9. **Каук В.В. и др.** Анализ качества горючего: монография. М.: Ульяновский Дом печати, 2008. 696 с.

10. **Жулдыбин Е.Н.** Фильтр-сепаратор / Е.Н. Жулдыбин, К.В. Рыбаков, А.А. Лаврентьев, В.И. Зуев, С.В. Чайка, И.В. Брай. Патент SU № 539587 А1, МПК B01D 25/00: опубл. 25.12.1976. 2 с.

11. **Жулдыбин Е.Н.** Фильтр-сепаратор / Е.Н. Жулдыбин, К.В. Рыбаков, А.Н. Семерин, В.П. Коваленко. Патент SU № 971415 А1, МПК B01D 25/00: опубл. 07.11.1982. 6 с.

12. **Жулдыбин Е.Н.** Фильтр-сепаратор / Е.Н. Жулдыбин, В.П. Коваленко, А.В. Насекайло, Л.В. Боярчук, И.Е. Шибрук. Патент SU № 1057068 А1, МПК B01D 25/00: опубл. 30.11.1983. 4 с.

13. **Левчук В.И.** Патронный фильтр. Патент RU № 2050928, МПК B01D 27/04: опубл. 27.12.1995. 6 с.

14. **Anderson L.G., Dantuluri S.V.V., Shea D.** Method and system for water drainage in a fuel system. Patent WO 2012/024013 A1: publ. 23.02.2012. 37 p.

15. **Браилко А.А., Дружинин Н.А., Смутьский А.В.** Устройство для определения содержания воды в углеводородном топливе или в воздухе. Патент ПМ RU № 122491, МПК G01N 35/08, G01N 33/22: опубл. 27.11.2012. 26 с.

16. **Webb D.J., Zhang C.** Water-in-fuel sensor. Patent WO 2011/027099 A1: publ. 10.03.2011. 14 p.

17. **Карташевич А.Н., Кожушко В.К.** Устройство контроля обводненности дизельного топлива. Патент SU № 1814694, МПК F02B 77/00, F02B 3/06: опубл. 07.05.1993. 12 с.

18. **Смутьский А.В., Зоря Е.И., Никитин О.В.** Сепарационно-фильтрующая установка. Патент RU № 2446858 С2, МПК B01D 35/12, F02M 37/22: опубл. 10.04.2012. 6 с.

19. **Браилко А.А.** Дыхательная система резервуара для легкоиспаряющихся жидкостей / А.А. Браилко, Н.А. Дружинин, Л.А. Дружинин, А.В. Смутьский. Патент RU № 2673004 С1, МПК B65D 90/28: опубликован 11.21.2018. Бюл № 33. 13 с.

20. **Браилко А.А.** Дыхательная система резервуара для легкоиспаряющихся жидкостей / А.А. Браилко, Н.А. Дружинин, Л.А. Дружинин, А.В. Смутьский. Патент RU № 182746 U1, МПК B65D 90/28: опубл. 29.08.2018. 10 с.

### Information about the authors

**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, Anatoliy.Brailko@vnuovo.ru.

**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-sam61@mail.ru.

**Nikita A. Druzhinin**, Deputy Director for Production of LLC “Rosneft Aero”, n\_druzhinin@rn-aero.rosneft.ru.

**Lev A. Druzhinin**, Project Manager for Technical Re-equipment of JSC “Aviation Fuel Company”, Lev.Druzhinin@vnukovo.ru.

### Сведения об авторах

**Браилко Анатолий Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, Anatoliy.Brailko@vnukovo.ru.

**Самойленко Василий Михайлович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, v-sam61@mail.ru.

**Дружинин Никита Александрович**, заместитель директора по производству ООО «Роснефть Аэро», n\_druzhinin@rn-aero.rosneft.ru.

**Дружинин Лев Александрович**, руководитель проектов по техническому перевооружению, АО «Авиационно-топливная компания», Lev.Druzhinin@vnukovo.ru.

Поступила в редакцию 09.10.2021  
Принята в печать 24.03.2022

Received 09.10.2021  
Accepted for publication 24.03.2022

УДК 629.5.058.74

DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-30-40

## Влияние различных типов информационных дисплеев на работоспособность авиационных специалистов в эргатических системах

А.Е. Булатова<sup>1</sup>, Е.А. Бузаева<sup>1</sup>, Д.А. Евсевичев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский институт гражданской авиации  
им. Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, г. Ульяновск, Россия

**Аннотация:** В авиации последнего десятилетия более 70 % всех авиационных событий происходит под влиянием человеческого фактора, при этом уменьшение авиационной аварийности должно обеспечиваться с сохранением психо-психического здоровья авиационного персонала. Одним из возможных функциональных нарушений в состоянии организма человека является утомление, подробно изучаемое специалистами Международной организации гражданской авиации и описываемое в изданиях руководства по надзору за использованием механизмов контроля утомления. Данное состояние может возникнуть вследствие продолжительной работы авиационных специалистов, чья деятельность, как правило, связана с использованием информационных дисплеев. Являясь ценным ресурсом, в рамках профессиональной компетенции они позволяют им качественно выполнять свои обязанности. Тем не менее дисплеи, отличаясь по разнообразным характеристикам, включая тип матрицы, разрешение и диагональ экрана, оказывают разное влияние на работоспособность и формирование усталости у авиационного специалиста. В данной работе с помощью программного продукта, разработанного нами на языке C# в среде Unity3D, и методики оценки скорости реакции после серии экспериментов были получены эмпирические данные в виде средних значений качества выполнения тестов в зависимости от типа дисплея и его соответствующих характеристик. Это позволило сделать вывод о том, что применение LCD-дисплеев с матрицей IPS и большей диагональю экрана является более предпочтительным. Однако стоит обратить внимание и на современные LED-дисплеи, которые характеризуются более яркими и насыщенными цветами изображения по сравнению с вышеупомянутыми ЖК-дисплеями, что может быть применимо для конкретных задач авиационного персонала.

**Ключевые слова:** авиационный персонал, дисплей, работоспособность, утомление.

**Для цитирования:** Булатова А.Е., Бузаева Е.А., Евсевичев Д.А. Влияние различных типов информационных дисплеев на работоспособность авиационных специалистов в эргатических системах // Научный Вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 2. С. 30–40. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-30-40

## Influence of various types of information displays on the work capacity of aviation specialists in ergatic systems

A.E. Bulatova<sup>1</sup>, E.A. Buzaeva<sup>1</sup>, D.A. Evsevichev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ulyanovsk Civil Aviation Institute named after Air Chief Marshal B.P. Bugaev  
Ulyanovsk, Russia

**Abstract:** Over the past decade more than 70% of all the aviation events have occurred due to the impact of a human factor, meanwhile the reduction of all emergencies should be ensured maintaining the neuro-mental health of aviation personnel. One of the possible functional disorders in the state of the human body is fatigue, which is studied in detail by the International Civil Aviation Organization specialists and described in the publications of the supervision manual over the use of fatigue control mechanisms. Fatigue can result from the long-term work of aviation specialists, whose activities, as a rule, are associated with the use of digital information displays. Within the framework of professional competence, these displays, being a valuable resource, allow aviation staff to perform their duties competently. Nevertheless, displays, distinguishing in various characteristics such as a type of matrix, resolution and the screen diagonal, exert varied influence on the aviation specialist's working capacity and fatigue formation. Empirical data in the form of average values of the test execution quality, depending on the type of display and its appropriate characteristics, were obtained by means of the software application developed by our team in the C# language in the

Unity3D environment and the methodology to assess the reaction rates after a series of experiments. This allowed us to draw up a conclusion that the use of LCD screens with an IPS matrix and a larger screen diagonal is preferable. However, it is worth paying attention to the cutting-edge LED displays, which are characterized by brighter and more saturated colors of the image, in comparison with the mentioned LCD screens, which can be applicable for the specific tasks of aviation personnel.

**Key words:** aviation personnel, display, work capacity, fatigue.

**For citation:** Bulatova, A.E., Buzaeva, E.A. & Evsevichev, D.A. (2022). Influence of various types of information displays on the work capacity of aviation specialists in ergatic systems. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 25, no. 2, pp. 30–40. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-30-40

## Введение

В авиационной среде множество факторов в рабочей обстановке и окружающих условиях приводит к утомлению, которое может в значительной степени снижать работоспособность персонала [1–4]. Применительно к отрасли авиации утомление – это физиологическое состояние пониженной умственной или физической работоспособности в результате группы факторов, которое может ухудшить активность и способность человека надлежащим образом исполнять служебные обязанности, связанные с обеспечением безопасности полетов<sup>1</sup>.

Утомление может быть преходящим и кумулятивным. Как правило, преходящее утомление испытывается здоровым организмом после определенного временного периода работы, волнения или физического напряжения, что может быть снято путем единичного сна. Кумуляция утомления возникает при непродолжительном или запоздалом отдыхе вследствие чрезмерного объема и количества работы, волнения и физического напряжения без достаточно необходимой возможности восстановления сил организма<sup>2</sup>.

К числу причин, способствующих аккумуляции утомления вследствие рабочей нагрузки у пилотов, следует отнести часы работы, время отдыха между полетными сменами и такие специфические факторы, как время начала предполетной подготовки, задержки с вылетом, метеорологические условия, качество и объем радиосвязи, турбу-

лентность атмосферы, личные проблемы, а также компоновку кабины воздушного судна<sup>3</sup>. Для специалистов-диспетчеров также можно отметить влияние на утомление таких факторов, как время работы и отдыха, объем радиообмена, личные факторы и компоновка рабочего места оператора [5].

Важным компонентом при формировании эргатических систем, то есть систем взаимодействия «человек – машина», являются не только средства управления, но и информационные дисплеи [6].

Пилотские кабины воздушных судов проектируются таким образом, чтобы члены летного экипажа могли осуществлять свою работу не только в нормальных, но и в критических условиях, например при пиковой рабочей нагрузке. Основная часть данных поступает через орган зрения, следовательно, ограничения зрения в части остроты, размеров и полей периферического зрения, а также цветоощущений должны рассматриваться в контексте доступа к визуальной информации внутри и за пределами кабины воздушного судна.

Очень важны расположение и работа органов управления и приборов, которые должны быть в пределах досягаемости экипажа и обеспечивать легкое считывание показаний. Это позволяет пилотам получать необходимую информацию без помех (сенсорное восприятие) и эффективно использовать все органы управления (функция исполнения).

Рабочая нагрузка диспетчеров обслуживания воздушного движения подвержена значительным колебаниям [7]. Она зависит от такой группы факторов, как интенсивность

<sup>1</sup> Doc 9966: Manual for the oversight of fatigue management approaches. 2nd ed. // ICAO, 2016. 202 p.

<sup>2</sup> Doc 8984: Manual of civil aviation medicine 3rd ed. // ICAO, 2012. 580 p.

<sup>3</sup> Medical manual 12th ed. // IATA, 2020. 102 p.

воздушного движения, сложность маршрутов обслуживания воздушного движения, скорости отдельных воздушных судов и так далее. При выполнении работы от авиадиспетчеров требуются хорошая нервно-мышечная координация, достаточная острота зрения для чтения на расстоянии, а большое количество цветокодированной информации обуславливает необходимость хорошего цветовосприятия [8]. Как и диспетчерам обслуживания воздушного движения, так и пилотам требуется умение распределять свое внимание на выполнение нескольких задач одновременно [9].

В среде авиационных специалистов постоянно ведется работа по улучшению эксплуатируемых технических средств и включает в себя следующие мероприятия: совершенствуются кресла и оборудование для радиообмена, проводится модернизация приборов и индикаторов, включая информационные дисплеи.

Примерно 80 % полетной информации воспринимается пилотами визуально<sup>4</sup>. Более того, работа авиадиспетчеров и некоторых других специалистов напрямую связана с дисплеями. На сегодняшний день к основным существующим типам дисплеев относятся следующие [10].

1. ЭЛТ (CRT) – Cathode-Ray Tube – дисплей с электронно-лучевой трубкой.

2. ЖК (LCD) – Liquid Crystal Display – жидкокристаллический дисплей.

3. LED (OLED) – Organic Light-Emitted Diode – светодиодный дисплей с органическими светодиодами.

4. ELD (TFEL) – Electroluminescent Display (включая Thin Film Electroluminescent Display) – электролюминесцентный дисплей, включая дисплей тонкопленочного типа.

5. EPD – Electronic Paper Display – дисплей на базе электронной бумаги.

6. SED (FED) – Surface Conduction-electron Emitter Display (Field Emission Display) – дисплей с электронной эмиссией.

7. IMOD – Interferometric Modulator Display – дисплей на основе применения интерферометрической модуляции.

Как правило, в авиационной среде используются LCD-дисплеи. В небольшой части органов обслуживания воздушного движения еще имеются устаревшие CRT-мониторы. Они могут выполнять функцию отображения метеорологической обстановки или выступать в качестве резервного устройства. К основным LCD-мониторам, необходимым для работы авиадиспетчеров, относятся модели фирмы NEC, такие как SpectraView Reference 302 с диагональю 30', MultiSync PA302W с диагональю 29', MultiSync PA242W с диагональю 24.1', MultiSync 2190UXp с диагональю 21.3', MultiSync 175M с диагональю 17' [11].

Чаще всего кабина современного воздушного судна также оборудована LCD-дисплеями, однако здесь характеристики бортовых дисплеев или дисплейных модулей должны соответствовать ряду еще более жестких требований, связанных с особенностями эксплуатации, включая широкий температурный диапазон, наличие повышенной вибрации, изменение уровня давления воздуха в кабине, а также преломление и отражение солнечного света [12]. В кабинах могут устанавливаться различные дисплеи таких фирм, как Image Quest Technologies, Honeywell и MOOG Component Group, Arnav System, Rockwell Collins, а также Garmin.

Полная или частичная потеря работоспособности авиационным специалистом является признаком серьезного авиационного инцидента, что может представлять серьезную угрозу для обеспечения безопасности полетов<sup>5</sup>. Следовательно, крайне важно своевременно ее обнаружить, поэтому цель данной работы – определить зависимость работоспособности авиационного специалиста от такого внешнего фактора, как информационные дисплеи. Являясь источником всевозможной информации, дисплей позволяет авиационному персоналу выполнять различные функ-

<sup>4</sup> Medical guide for pilots, fitness to fly // ICAO, 2018. 175 p.

<sup>5</sup> Doc 9859: Safety management manual. 4th ed. // ICAO, 2018. 149 p.



пии. Существует большое множество дисплеев с различными характеристиками, следовательно, эффективность выполнения персоналом служебных функций также может отличаться в зависимости от применяемого типа монитора.

Для достижения цели были поставлены несколько задач, включая выбор методики проведения экспериментальной части; создание программного продукта, состоящего из специальных тестов, направленных на оценку уровня подготовки; проведение серии экспериментов с группой испытуемых; сбор и анализ полученных результатов исследования. Ожидается, что выполнение поставленных задач позволит определить зависимость и составить рекомендации для применения дисплеев с учетом повышения работоспособности авиационного персонала.

## Методика исследования

К профессионально важным качествам, необходимым для успешной деятельности пилота или авиадиспетчера, можно отнести хорошую скорость реакции. Реакция на движущийся объект – разновидность сенсомоторной реакции, когда необходимо совершить движение в определенный момент времени, соответствующий положению движущегося объекта [13].

С учетом анализа литературных источников было установлено, что существует множество методик для оценки скорости реакции, при этом оценка результатов может происходить различным образом, включая вычисление средней величины ошибок запаздывания и упреждения, процента точных, упреждающих и запаздывающих реакций, а также среднеарифметического значения всех типов ошибок [14].

В данной работе использовался автоматизированный вариант оценки реакции человека на движущийся объект. Нами был написан специализированный программный продукт на языке C# в среде разработки Unity3D. Подобное тестирование является неотъемлемой частью программы прохождения врачебно-

летной экспертной комиссии, регламентируется требованиями Федеральных авиационных правил<sup>6</sup> и используется при оценке уровня подготовки будущих авиационных специалистов.

В исследовании приняли участие пять человек в возрасте 20 лет. Все участники имели нормальное зрение, проблемы с цветовым восприятием отсутствовали. Суть исследования заключалась в том, чтобы отобразить зависимость работоспособности авиационного персонала от типов информационного дисплея. Расстояние между дисплеями и участниками эксперимента было одинаковым и составляло 60 см. Количество повторений в попытках испытуемых равнялось 20. Участникам перед началом серии экспериментов давалась установка исключительно на точность реагирования, таким образом, при выполнении тестов преждевременность или запаздывание реакции были произвольными. При этом нарастание количества преждевременных реакций говорит о состоянии повышенной возбудимости, а увеличение числа запаздывающих реакций является признаком преобладания процессов торможения в центральной нервной системе. Преобладание точных ответов свидетельствует об уравновешенных основных нервных процессах [15]. Алгоритм работы программы по описанной методике представлен на рис. 1, а интерфейс программы тестирования показан на рис. 2.

Тестирование в программе представляет собой методику, предназначенную для оценки точности динамического глазомера и баланса основных нервных процессов. В тесте 1 по центру экрана располагается цель – круг красного цвета. Испытуемому предлагается остановить движущийся прямолинейно по экрану слева направо объект в виде вертикальной черты синего цвета в момент пересечения с целью. Место появления объекта на

<sup>6</sup> Федеральные авиационные правила «Медицинское освидетельствование летного, диспетчерского состава, бортпроводников, курсантов и кандидатов, поступающих в учебные заведения гражданской авиации», приказ МИНТРАНСА от 22.04.2002, № 50, 2002. 109 с.

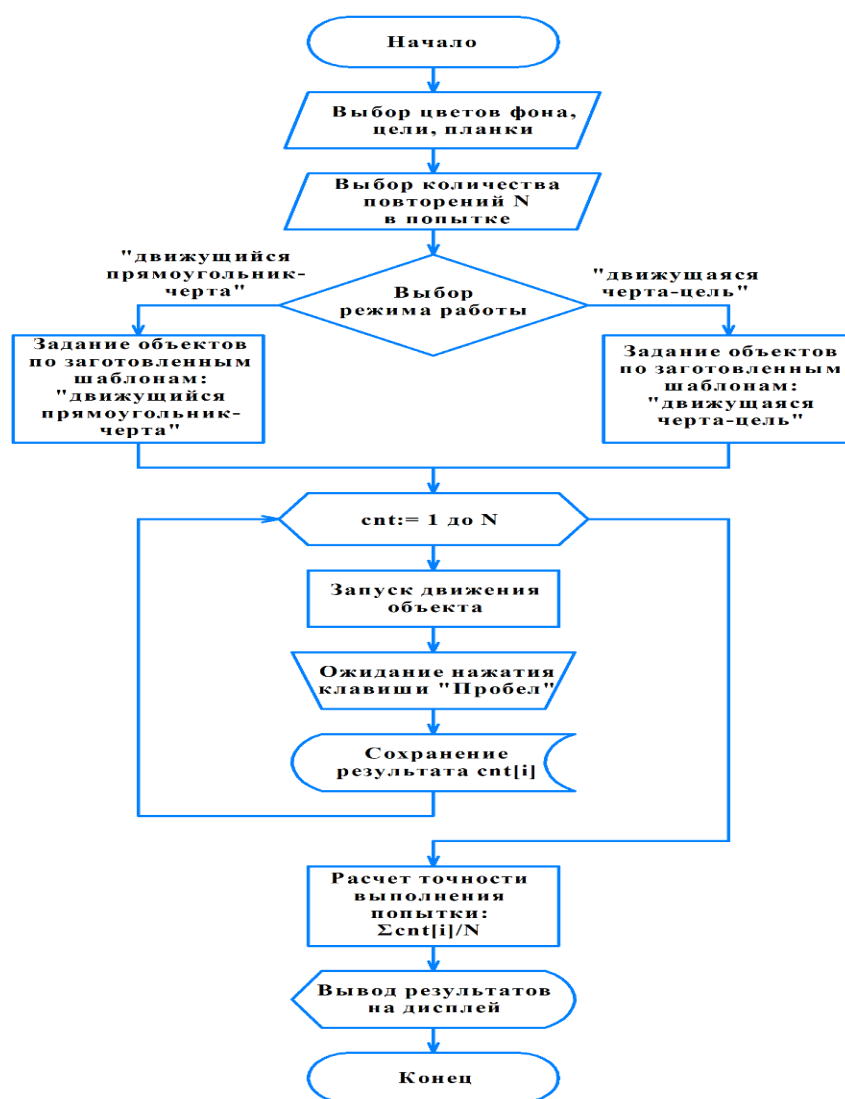


Рис. 1. Алгоритм методики тестирования  
Fig. 1. Algorithm of the test methodology

экране и начало его движения задаются автоматически, а отклик (остановка планки) осуществляется с помощью клавиши «пробел» на клавиатуре. В тесте 2 была поставлена аналогичная задача, но в качестве движущегося объекта выступал прямоугольник, а в качестве цели – вертикальная черта. В обоих тестах программа считает отклонение остановленного движущегося объекта от центрального положения цели. Значение берется по модулю и переводится в проценты, где 100 % соответствуют точному попаданию в цель, а 0 – непопаданию в цель.

Требования, предъявляемые к дисплеям, используемым на рабочем месте, описаны в

нормативных документах<sup>7,8,9</sup>. Два описанных теста на скорость реакции выполнялись групп-

<sup>7</sup> ГОСТ Р 29.05.008-96 Система стандартов эргономических требований и эргономического обеспечения. Рабочее место диспетчера служб управления воздушным движением. Общие эргономические требования. М.: Госстандарт России, 1996. 15 с.

<sup>8</sup> ГОСТ Р ИСО 9241.3-2003 Эргономические требования при выполнении офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (ВДТ). Часть 3. Требования к визуальному отображению информации. М.: Госстандарт России, 2003. 39 с.

<sup>9</sup> ГОСТ Р ИСО 9241.8-2007 Эргономические требования при выполнении офисных работ с использованием видеодисплейных терминалов (ВДТ). Часть 8. Требования к отображаемым цветам. М.: Госстандарт России, 2008. 28 с.

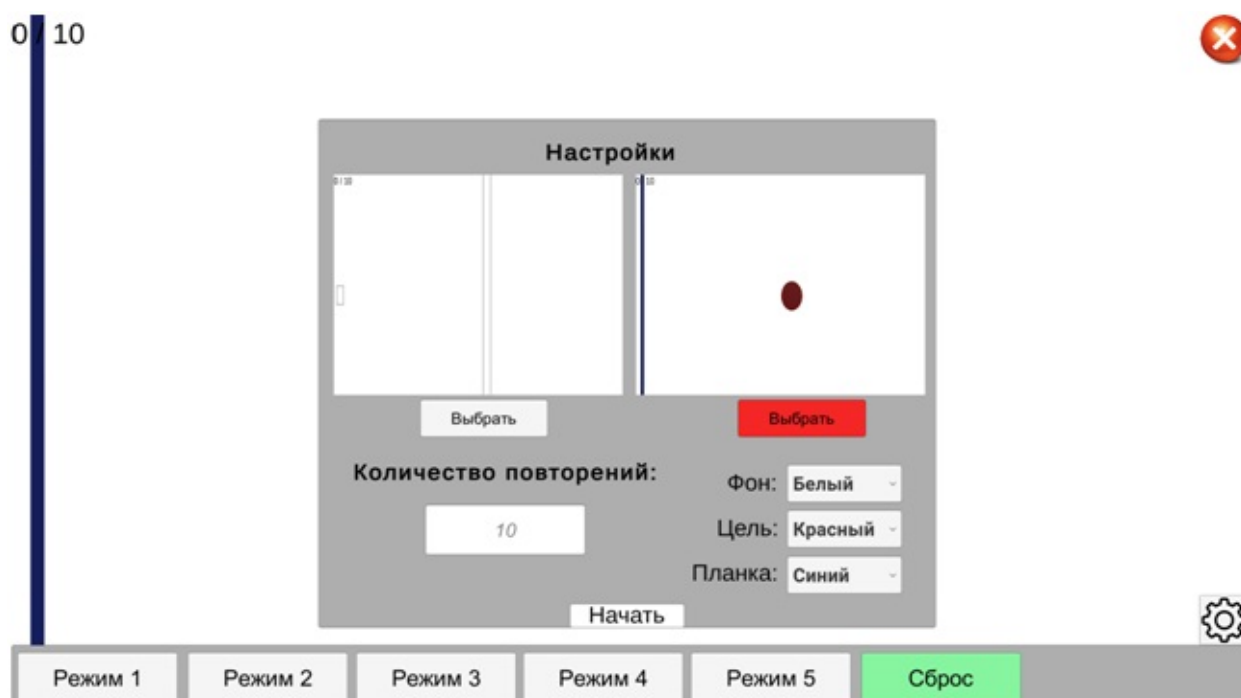


Рис. 2. Интерфейс программы тестирования  
Fig. 2. Interface of the test program

Таблица 1  
Table 1

Характеристики дисплеев, используемых в серии экспериментов  
Displays performance used in the experiment series

Характеристики дисплея	Номер дисплея			
	1	2	3	4
Тип матрицы	LCD (IPS)	LCD (IPS)	LED	LCD (тип TN)
Диагональ экрана (дюйм)	15,6	13,3	32,0	32,0
Разрешение	1920 × 1080	1920 × 1080	1920 × 1080	1440 × 900
Частота обновления (Гц)	59	59	60	75

пой испытуемых на различных типах информационных дисплеев с отличающимися характеристиками, отображенными в табл. 1. Все типы дисплеев, используемые в серии экспериментов, соответствуют нормативным требованиям, исключая дисплей 2 с худшими характеристиками.

Стоит отметить, что в программе реализована возможность изменения цветов фона, цели и планки. Данная особенность будет актуальна при исследовании цветовой чувствительности испытуемого, но для текущего

эксперимента параметры для всех испытуемых были выбраны одинаковые.

## Результаты серии экспериментов

Фрагмент результатов эксперимента на дисплее 1 из серии экспериментов на четырех типах дисплеев представлен в табл. 2. Аналогично были получены и сгруппированы данные по остальным типам дисплеев. Как уже отмечалось, количество повторений в попыт-

Таблица 2  
Table 2

Результаты эксперимента с использованием дисплея 1  
The experiment results using display №1

Тест на реакцию 1					
Номер испытуемого	Номера попыток				Среднее значение, %
	1	2	3	4	
1	74,70	82,35	76,80	81,60	78,86
2	85,30	86,55	82,55	84,15	84,64
3	82,05	86,20	84,10	83,05	83,85
4	73,17	78,55	72,25	77,70	75,42
5	78,60	70,10	78,00	70,05	74,19
Тест на реакцию 2					
Номер испытуемого	Номера попыток				Среднее значение, %
	1	2	3	4	
1	79,45	78,55	86,90	81,55	81,61
2	80,35	82,95	82,55	86,15	83,00
3	83,55	74,45	80,45	88,05	81,63
4	81,40	85,70	80,45	86,80	85,59
5	71,10	77,45	81,90	71,35	75,45

Таблица 3  
Table 3

Средние значения качества выполнения тестов в зависимости от типа дисплея  
Average values of the test execution quality depending on the type of display

Тип дисплея	Тест 1	Тест 2	Общее среднее значение, %
LCD (IPS), 15,6'	82,69	82,96	82,83
LCD (IPS), 13,3'	78,55	70,96	74,76
LED, 32,0'	80,87	80,35	80,61
LCD (TN), 32,0'	77,14	77,40	77,27

ках испытуемых равнялось 20. Итоговый результат каждой попытки высчитывался как среднее арифметическое значение.

Средние значения качества выполнения тестов, выраженные в процентах, в зависимости от типа информационного дисплея показаны в табл. 3.

Зависимость качества выполнения тестов от типа используемого информационного дисплея показана на рис. 3.

## Обсуждение полученных результатов

В результате серии экспериментов было установлено следующее.

1. Наибольший процент качества выполнения тестов был отмечен на LCD-дисплее с матрицей IPS-типа с диагональю экрана 15,6'.

2. При увеличении диагонали экрана среди LCD (IPS) дисплеев качество выполнения тестов возрастает. Тем не менее увеличение диагонали экрана может быть актуальным лишь до определенных пределов, так как далее начинается процесс рассеяния внимания авиационного специалиста, что подтверждают результаты дисплеев 1 и 3. Наиболее оптимальным средним значением диагонали можно считать 20' (модели MultiSync RA242W 24.1', MultiSync 2190UXp 21.3', применяемые на рабочих местах авиадиспетчеров в центрах обслуживания воздушного

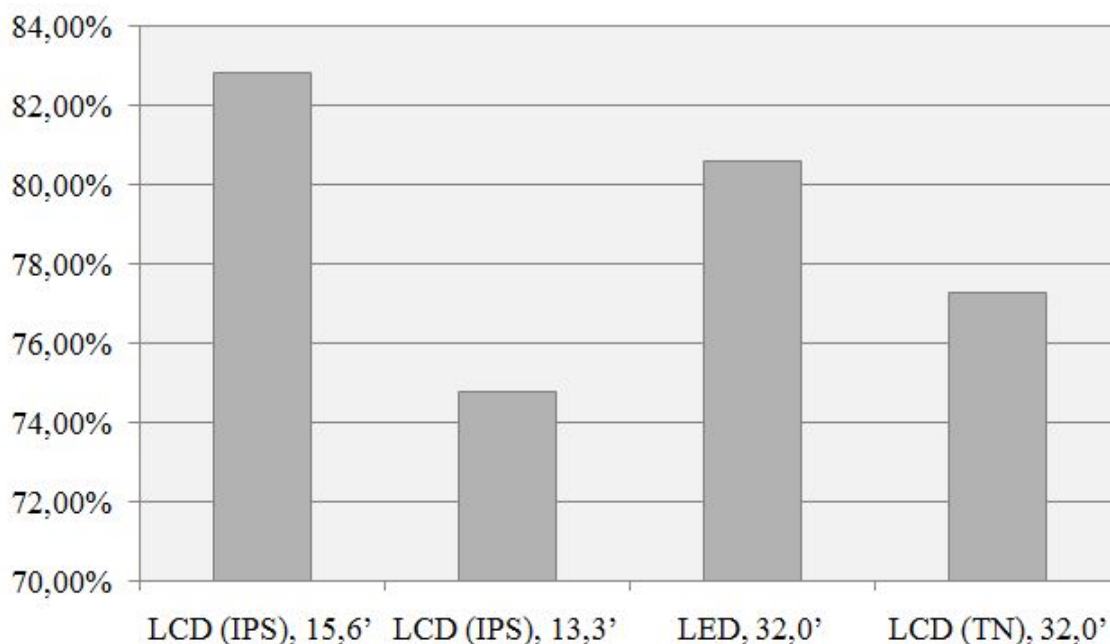


Рис. 3. Зависимость качества выполнения тестов от типа информационного дисплея  
Fig. 3. Dependence of the test execution quality on the type of information display

движения). Увеличение диагонали экрана на рабочем месте пилота может быть неактуальным в связи с особенностями размеров и компоновки кабины воздушного судна.

3. Разрешение экрана у первых трех типов экранов больше, чем у четвертого, и практически во всех экспериментах качество выполнения тестов у LCD (TN) дисплея было хуже, несмотря на наибольшее значение частоты обновления среди остальных дисплеев.

4. При равной диагонали экрана (32,0') преимущество у LED-дисплеев, так как в данном случае качество выполнения заданий выше, чем у LCD-дисплеев.

## Заключение

Исходя из полученных результатов, стоит отметить, что применяемые информационные дисплеи оказывают непосредственное влияние на деятельность авиационных специалистов, при этом использование LCD-дисплеев с матрицей IPS и большей диагональю экрана является более предпочтительным. Тем не менее наиболее оптимальным средним значением диагонали можно считать 20'. Также

стоит обратить внимание и на LED-дисплеи, которые характеризуются более яркими и насыщенными цветами изображения по сравнению с ЖК-дисплеями, что может быть применимо для конкретных задач авиационного персонала, например в деятельности службы авиационной безопасности при проверке багажа, грузов и почты. Несмотря на учет в нормативных документах яркостных показателей, контрастности, угла обзора и других характеристик, следует оценивать и учитывать технологию изготовления экрана, которая определяет время отклика, разрешение и однородность структуры.

## Список литературы

1. Banks S. Effects of fatigue on teams and their role in 24/7 operations / S. Banks, L.B. Landon, J. Dorrian, L.B. Waggoner, S.A. Centofanti, P.G. Roma, P.A. Van Dongen Hans [Электронный ресурс] // Sleep Medicine Reviews. 2019. Vol. 48. ID: 101216. DOI: 10.1016/j.smrv.2019.101216 (дата обращения: 25.11.2021).
2. Abd-Elfattah H.M., Abdelazeim F.H., Elshennawy S. Physical and cognitive conse-

quences of fatigue: A review // Journal of Advanced Research. 2015. Vol. 6, iss. 3. Pp. 351–358. DOI: 10.1016/j.jare.2015.01.011

3. **Wingelaar-Jagt Y.Q.** Fatigue in aviation: Safety risks, preventive strategies and pharmacological interventions / Y.Q. Wingelaar-Jagt, T.T. Wingelaar, W.J. Riedel, J.G. Ramaekers [Электронный ресурс] // Frontiers in Physiology. 2021. Vol. 12. ID: 712628. DOI: 10.3389/fphys.2021.712628 (дата обращения: 25.11.2021).

4. **Honn K.A., Van Dongen Hans P.A., Dawson D.** Working time society consensus statements: Prescriptive rule sets and risk management-based approaches for the management of fatigue-related risk in working time arrangements // Industrial Health. 2019. Vol. 57. Pp. 264–280. DOI: 10.2486/indhealth.SW-8

5. **Göker Z.** Fatigue in the aviation: An overview of the measurements and countermeasures // Journal of Aviation. 2018. Vol. 2, iss. 2. Pp. 185–194. DOI: 10.30518/jav.451741

6. **Miller M., Holley S.** Air traffic controller resource management: An approach for reducing cognitive loading and increasing situational awareness // Advances in Human Aspects of Transportation. AHFE 2021. Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. Vol. 270. Pp. 535–542. DOI: 10.1007/978-3-030-80012-3\_61

7. **Евстигнеев Д.А., Торосян А.А.** Феномены эмоциональной напряжённости и устойчивости при управлении воздушным движением. В сборнике научных статей: Психологические исследования в Ульяновском институте гражданской авиации / Под ред. Д.А. Евстигнеева. Ульяновск: УИ ГА, 2020. С. 71–82.

8. **Евстигнеев Д.А.** Авиационная психология: учебник для вузов. В 2-х тт. Т. 2. Ульяновск: УВАУГА (И), 2012. 220 с.

9. **Солдатов С.К.** Профессионально важные качества операторов управления воздушным движением / С.К. Солдатов, К.И. Засядько, А.В. Богомолов, А.П. Вонаршенко, А.В. Соломка // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2017. № 1 (51). С. 30–34. DOI: 10.21687/0233-528X-2017-51-1-30-34

10. **Булатова А.Е.** Разработка программы для расчета яркостных характеристик ин-

дикаторных устройств на рабочем месте авиадиспетчера / А.Е. Булатова, Д.А. Евсевичев, О.В. Максимова, М.К. Самохвалов // Радиоэлектронная техника. 2020. № 1 (13). С. 202–206.

11. **Булатова А.Е., Введенский А.В.** Применимость информационных дисплеев на рабочих местах авиационных специалистов // Интеграция науки, общества, производства и промышленности: проблемы и перспективы: материалы Международной научно-практической конференции. Волгоград, 29 мая 2021 г. С. 89–91.

12. **Brezonakova A.** The effects of back lit aircraft instrument displays on Pilots fatigue and performance / A. Brezonakova, I. Skvarekova, P. Pecho, R. Davies, M. Bugaj, B. Kandra // Transportation Research Procedia. 2019. Vol. 40. Pp. 1273–1280. DOI:10.1016/j.trpro.2019.07.177

13. **Халфина Р.Р., Галин М.Р., Минуллин А.З.** Психофизиологические особенности сенсомоторных качеств сотрудников, обеспечивающих государственную защиту // Успехи современного естествознания. 2014. № 11-3. С. 99–102.

14. **Полевщиков М.М., Дорогова Ю.А., Роженцов В.В.** Оценка реакции на движущийся объект [Электронный ресурс] // Электронный научно-образовательный Вестник «Здоровье и образование в XXI веке». 2017. Т. 19, № 7. С. 34–36. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-reaktsii-na-dvizhuschiysya-obekt/viewer> (дата обращения: 25.11.2021).

15. **Смирнова Т.М.** Система оценки психической работоспособности как важного показателя здоровья / Т.М. Смирнова, А.Ф. Быстрицкая, В.Н. Крутько, В.С. Морозов // Труды Института системного анализа Российской академии наук. 2005. Т. 13. С. 170–194.

## References

1. **Banks, S., Landon, L.B., Dorrian, J., Waggoner, L.B., Centofanti, S.A., Roma, P.G. & Van Dongen Hans, P.A.** (2019). *Effects of fatigue on teams and their role in 24/7 opera-*

tions. *Sleep Medicine Reviews*, vol. 48. ID: 101216. DOI: 10.1016/j.smrv.2019.101216 (accessed: 25.11.2021).

2. **Abd-Elfattah, H.M., Abdelazeim, F.H. & Elshennawy, S.** (2015). *Physical and cognitive consequences of fatigue: A review*. *Journal of Advanced Research*, vol. 6, issue 3, pp. 351–358. DOI: 10.1016/j.jare.2015.01.011

3. **Wingelaar-Jagt, Y.Q., Wingelaar, T.T., Riedel, W.J. & Ramaekers, J.G.** (2021). *Fatigue in aviation: Safety risks, preventive strategies and pharmacological interventions*. *Frontiers in Physiology*, vol. 12, ID: 712628. DOI: 10.3389/fphys.2021.712628 (accessed: 25.11.2021).

4. **Honn, K.A., Van Dongen Hans, P.A. & Dawson, D.** (2019). *Working time society consensus statements: Prescriptive rule sets and risk management-based approaches for the management of fatigue-related risk in working time arrangements*. *Industrial Health*, vol. 57, pp. 264–280. DOI: 10.2486/indhealth.SW-8

5. **Göker, Z.** (2018). *Fatigue in the aviation: An overview of the measurements and countermeasures*. *Journal of Aviation*, vol. 2, issue 2, pp. 185–194. DOI: 10.30518/jav.451741

6. **Miller, M. & Holley, S.** (2021). *Air traffic controller resource management: An approach for reducing cognitive loading and increasing situational awareness*. *Advances in Human Aspects of Transportation. AHFE 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 270, pp. 535–542. DOI: 10.1007/978-3-030-80012-3\_61

7. **Yevstigneev, D.A. & Torosyan A.A.** (2020). *Phenomena of emotional tension and stability in air traffic control*. *V sbornike nauchnykh statey: Psikhologicheskkiye issledovaniya v Ulyanovskom institute grazhdanskoy aviatsii*, in Yevstigneev D.A. (Ed.). Ulyanovsk: UIGA, pp. 71–82. (in Russian)

8. **Yevstigneev, D.A.** (2012). *Aviation psychology: a textbook for universities*. In two volumes. Volume 2. Ulyanovsk: UVAUGA, 220 p. (in Russian).

9. **Soldatov, S.K., Zasyadko, K.I., Bogomolov, A.V., Vonarshenko, A.P. & Sol-**

**omka, A.V.** (2017). *Professionally important skills of air traffic controllers*. *Aerospace and Environmental Medicine*, vol. 51, no. 1, pp. 30–34. DOI: 10.21687/0233-528X-2017-51-1-30-34 (in Russian)

10. **Bulatova, A.E., Evsevichev, D.A., Maksimova, O.V. & Samokhvalov, M.K.** (2020). *The development of a program for calculating the luminance characteristics of display devices at the air traffic controller's workplace*. *Radioelektronnaya tekhnika*, no. 1 (13), pp. 202–206. (in Russian)

11. **Bulatova, A.E. & Vvedenskii, A.V.** (2021). *The usage of informational displays at aviation specialists workplace*. *Integratsiya nauki, obshchestva, proizvodstva i promyshlennosti: problemy i perspektivy: materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Volgograd, pp. 89–91. (in Russian)

12. **Brezonakova, A., Skvarekova, I., Pecho, P., Davies, R., Bugaj, M. & Kandra, B.** (2019). *The effects of back lit aircraft instrument displays on Pilots fatigue and performance*. *Transportation Research Procedia*, vol. 40, pp. 1273–1280. DOI: 10.1016/j.trpro.2019.07.177

13. **Khalfina, R.R., Galin, M.R. & Minulin, A.Z.** (2014). *Psychophysiological features of the sensorimotor qualities of employees providing state protection*. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*, no. 11-3, pp. 99–102. (in Russian)

14. **Polevshchikov, M.M., Dorogova, Y.A. & Rozhentsov, V.V.** (2017). *Assessment of reaction to a moving object*. *Online Scientific & Educational Bulletin Zdorove i Obrazovanie v XXI veke*, no. 7, pp. 34–36. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-reaktsiina-dvizhuschiysya-obekt/viewer> (accessed: 25.11.2021). (in Russian)

15. **Smirnova, T.M., Bystritskaya, A.F., Krutko, V.N. & Morozov, V.S.** (2005). *The system for assessing mental performance as an important indicator of health*. *Proceedings of the Institute for Systems Analysis Russian Academy of Sciences*, no. 13, pp. 170–194. (in Russian)

### Сведения об авторах

**Булатова Анастасия Евгеньевна**, аспирант кафедры авиационной техники Ульяновского института гражданской авиации им. Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, bulatova26nastya@gmail.com.

**Бузаева Елена Александровна**, аспирант кафедры авиационной техники Ульяновского института гражданской авиации им. Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, buzaeva6373@mail.ru.

**Евсевичев Денис Александрович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры авиационной техники Ульяновского института гражданской авиации им. Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, denistk\_87@mail.ru.

### Information about the authors

**Anastasia E. Bulatova**, Postgraduate of the Aeronautical Equipment Chair, Ulyanovsk Civil Aviation Institute named after Air Chief Marshal B.P. Bugaev, bulatova26nastya@gmail.com.

**Elena A. Buzaeva**, Postgraduate of the Aeronautical Equipment Chair, Ulyanovsk Civil Aviation Institute named after Air Chief Marshal B.P. Bugaev, buzaeva6373@mail.ru.

**Denis A. Evsevichev**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Aeronautical Equipment Chair, Ulyanovsk Civil Aviation Institute named after Air Chief Marshal B.P. Bugaev, denistk\_87@mail.ru.

Поступила в редакцию 27.12.2021  
Принята в печать 24.03.2022

Received 27.12.2021  
Accepted for publication 24.03.2022



УДК 621.78  
DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-41-53

## Увеличение срока эксплуатации элементов конструкции авиационной техники с использованием упрочняющих технологий на основе пульсирующих дозвуковых газовых потоков

Д.А. Иванов<sup>1</sup>, Т.В. Петрова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации,  
г. Санкт-Петербург, Россия

**Аннотация:** Дальнейшее совершенствование методологии восстановительного ремонта авиационной техники возможно только при условии широкого использования современных бездеформационных технологий увеличения и восстановления ресурса элементов их конструкции, например, таких как обработка пульсирующими дозвуковыми воздушными потоками – газоимпульсная обработка. В данной статье представлены результаты разработки методологии использования технологий повышения жизненного ресурса подверженных усталостному разрушению элементов авиационного двигателя и системы шасси, оказывающих существенное влияние на безопасность полетов, путем использования перспективной технологии повышения надежности деталей на основе обработки нестационарными дозвуковыми воздушными потоками, результаты разработки методов, направленных на повышение эффективности и безопасности авиаперевозок за счет повышения надежности и увеличения срока эксплуатации элементов конструкции авиационных транспортных средств, оборудования и механизмов, оптимизации сроков проверок и ремонтов с использованием технологии повышения и восстановления ресурса путем обработки пульсирующими дозвуковыми газовыми потоками. Результаты исследований, направленных на оптимизацию восстановительного ремонта воздушных судов за счет использования газоимпульсной обработки элементов их конструкции, а также алгоритмы обработки трещины элемента конструкции воздушного судна с целью воспрепятствования ее дальнейшему распространению, восстановления механических свойств элемента конструкции ВС, снизившихся в результате воздействия нестационарных воздушных потоков в ходе эксплуатации и обработки областей с повышенной плотностью дислокаций с целью предотвращения образования трещин. Результаты разработки методологии использования бездеформационных упрочняющих технологий, в частности на основе пульсирующих дозвуковых воздушных потоков (газоимпульсная обработка), в процессе восстановительного ремонта воздушных судов и оптимизации диагностирования авиационной техники с учетом влияния сред, в том числе нестационарных воздушных потоков, на свойства материала элементов конструкции.

**Ключевые слова:** воздушный транспорт, ресурс, бездеформационная обработка.

**Для цитирования:** Иванов Д.А., Петрова Т.В. Увеличение срока эксплуатации элементов конструкции авиационной техники с использованием упрочняющих технологий на основе пульсирующих дозвуковых газовых потоков // Научный Вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 2. С. 41–53. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-41-53

## Increasing the service life of structural elements of aviation equipment using strengthening technologies based on pulsating subsonic gas flows

D.A. Ivanov<sup>1</sup>, T.V. Petrova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint Petersburg State University of Civil Aviation, Saint Petersburg, Russia

**Abstract:** Further improvement of the methodology of maintenance and repair of aviation equipment is possible only if modern non-deformational technologies are widely used to increase and restore the durability of their structural elements, for example, such as processing with pulsating subsonic air flows – gas pulse processing. This article presents the results of the methodology development for using the technologies to increase the durability of the aircraft engine and landing gear system components subject to fatigue destruction, having a significant impact on flight safety, by using a promising technology to enhance the reliability of the parts based on processing by non-stationary subsonic air flows, the results of the development of methods, aimed at improving the efficiency and safety of air transportation by increasing the reliability and service life of structural elements of aircraft, equipment

and mechanisms, optimizing the timing of inspections and repairs using the technology to increase and restore the durability by processing with pulsating subsonic gas flows. The results of the research aimed at optimizing the maintenance and repair of aircraft through the use of gas-pulse processing of their structural elements, as well as algorithms for processing cracks in the aircraft structural element in order to prevent its further spread, restoring the mechanical properties of the aircraft structural element that decreased as a result of the impact of non-stationary air flows during operation and processing areas with increased location density in order to prevent the formation of cracks. The results of the development of a methodology for the use of non-deformational strengthening technologies, especially based on pulsating subsonic air flows (gas pulse treatment) in the process of aircraft maintenance and optimization of diagnostics of aviation equipment, considering the influence of media, including non-stationary air flows on the material properties of structural elements.

**Key words:** air transport, durability, non-deformational processing.

**For citation:** Ivanov, D.A. & Petrova, T.V. (2022). Increasing the service life of structural elements of aviation equipment using strengthening technologies based on pulsating subsonic gas flows. Civil Aviation High Technologies, vol. 25, no. 2, pp. 41–53. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-41-53

## Введение

Дальнейшее совершенствование методологии восстановительного ремонта авиационной техники возможно только при условии широкого использования современных бездеформационных технологий увеличения и восстановления ресурса элементов их конструкции, например, таких как обработка пульсирующими дозвуковыми воздушными потоками – газоимпульсная обработка [1]. Многие конструктивные элементы двигателя и шасси склонны к усталостному разрушению из-за мало- и многоцикловых нагрузок.

Естественно, что для повышения жизненного ресурса элементов двигателя и шасси необходимо увеличить время до зарождения трещин и замедлить их распространение.

Существующая методология ремонта авиационной техники представляет собой совокупность методов, позволяющих приостанавливать и тормозить рост трещин. Как правило, это трудоемкие и недешевые операции, не всегда приводящие к желаемому результату, и зачастую принимается решение заменить изношенную деталь новой.

Предварительный обдув пульсирующим воздушным потоком позволяет локализовать скрытые дефекты материала не только на поверхности, но и по всему объему элементов конструкции воздушного судна и затормозить развитие микротрещины, что задержит образование макротрещин.

## Постановка задачи

Основная задача ремонта воздушного судна может быть охарактеризована как поддержание надежности его узлов [2–15].

Для обеспечения восстановления первоначальных механических и эксплуатационных свойств отремонтированных элементов конструкции воздушного судна и авиационного двигателя, а в ряде случаев и их повышения, методологически является перспективным использование современных бездеформационных технологий повышения конструктивной прочности, таких как ультразвуковое упрочнение, магнитно-импульсная упрочняющая обработка, упрочнение с применением импульсных плазменных и электронных пучков, ударно-волновое и термическое лазерное упрочнение, виброобработка. Рассмотрим методологию их использования на примере газоимпульсной обработки, отличающейся от упомянутых выше технологий как комбинированным характером воздействия газовых импульсов и звукового давления, так и техническим результатом комплексного повышения механических и эксплуатационных свойств.

## Решение задачи

При появлении в конструктивном элементе воздушного судна трещины возникает задача управления последующим ее ростом [16] таким образом, чтобы за известный интервал

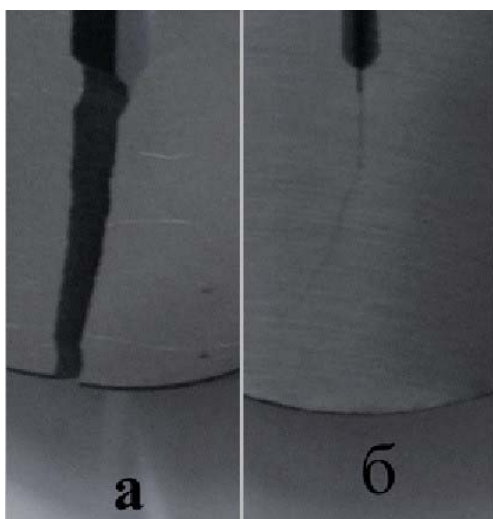
времени эксплуатационного нагружения увеличение размера трещины происходило в пределах ее стабильного развития.

Такого эффекта можно достичь воздействием на трещину нестационарного дозвукового потока воздуха, пульсирующего с определенной частотой и натекающего на обрабатываемое изделие с определенной средней скоростью в течение малого промежутка времени (5–15 мин).

На рис. 1 представлен результат обдува изделий из легированных сталей с использованием малошумного (не более 40 дБ) генератора пульсирующих газовых потоков на основе вентилятора осевого типа (рис. 2).

Частота колебаний параметров газового потока составляла 500 Гц. Обдув осуществлялся перпендикулярно плоскости изделия. Исследования проводились на образцах для испытания на вязкость разрушения (трещиностойкость) из стали 38ХС в высокопрочном состоянии. Диаметр образцов составлял 50 мм, а толщина – 10 мм.

Результат испытания образцов свидетельствует о существенно меньшем распространении трещины у обдутого образца при той же нагрузке.



**Рис. 1.** Распространение трещины в стальном изделии при одинаковой нагрузке: *а* – без обдува; *б* – обдув дозвуковым пульсирующим воздушным потоком в течение 15 мин

**Fig. 1.** Crack propagation in a steel product at the same load: *a* – without blowing; *b* – blowing with subsonic pulsating airflow for 15 minutes

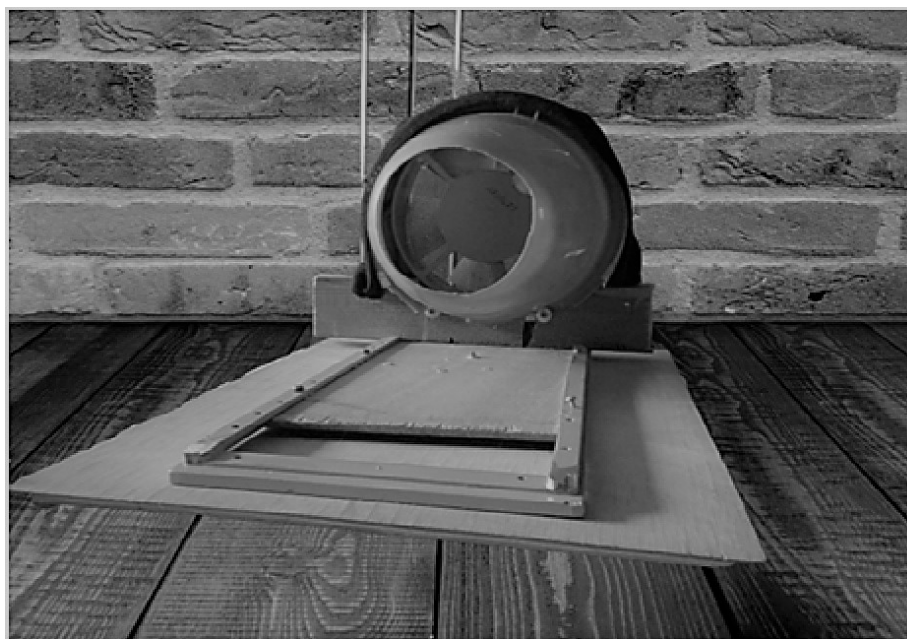
Также испытания на вязкость разрушения (ГОСТ 25.506-85) осуществлялись после обработки пульсирующим воздушным потоком в течение 15 минут при частоте колебаний параметров потока 900 Гц и импульсном звуковом давлении 130 дБ. Для испытаний на вязкость разрушения использовались плоские образцы с боковым односторонним надрезом и трещиной для испытаний на растяжение. Обдув во всех случаях выполнялся при расположении образцов поперек потока (плоскостью навстречу потоку).

Использовались образцы из аустенитной стали 5Х10Г15СФ2АЦР после закалки. Среднее значение HRC образцов составляло 39 единиц. Значение коэффициента, характеризующего интенсивность растягивающих напряжений в устье трещины при переходе ее к самопроизвольному росту  $K_{IC}$  у образцов, подвергавшихся газоимпульсной обработке, оказалось выше на 30 %, что также свидетельствует о замедлении роста трещин в результате обработки пульсирующими дозвуковыми газовыми потоками.

Обработка элемента конструкции воздушного судна или авиадвигателя пульсирующим газовым потоком приводит к положительным результатам независимо от вида трещины.

Подобная обработка не влечет за собой видимые внешние изменения, однако в процессе эксплуатации наблюдается положительный эффект. Результаты экспериментов позволили установить режимы обдува (сочетание средней скорости натекания воздуха на поверхность детали, частоты пульсаций и времени обдува) позволяющие получить эффект повышения конструктивной прочности и эксплуатационных свойств для стандартных ударных и разрывных образцов, изготовленных из различных материалов, а также конкретных деталей (болтов, кронштейнов, пружин и др.).

Так как используемые генераторы колебаний параметров газового потока изменяют скорость и частоту, были определены оптимальные временные режимы обдува для разных сочетаний частот и скоростей потока и разных целей [1].



**Рис. 2.** Генератор на основе осевого вентилятора с конфуззором для увеличения скорости воздушного потока  
**Fig. 2.** A generator based on an axial fan with a confuser to increase the air flow velocity

Для обработки конкретных конструктивных элементов воздушных судов в качестве генератора импульсных потоков воздуха можно использовать осевые вентиляторы, дополненные, в случае необходимости увеличения скорости потока с целью уменьшения времени достижения заданного эффекта, конфуззорами. Подобные вентиляторы обладают определенной частотой вращения, производительностью и количеством лопастей. Зная частоту и скорость этого генератора, для получения желаемого результата достаточно задать продолжительность обдува элемента конструкции воздушного судна, определяемую исходя из формы, массы, размеров, материала, вида закрепления, и определить направление обдува в зависимости от приоритета в повышении свойств (приоритет в повышении показателей прочности, приоритет повышения показателей вязкости, их сочетание при меньшем приросте каждого свойства) с обязательным учетом эксплуатационной нагрузки, включая газодинамическое воздействие.

Техническое обслуживание и ремонт авиационной техники требуют оптимизации. В качестве критерия оптимизации можно использовать следующий:

$$K = 1 - (\sum_{i=1}^m \tau_{oi} + \sum_{i=1}^p \tau_{pi} + \sum_{i=1}^n \tau_{ni}) / \tau.$$

Здесь  $\tau_o$ ,  $\tau_n$  и  $\tau_n$  – продолжительность технического обслуживания, плановых и внеплановых ремонтов соответственно в часах;  $m$ ,  $p$  и  $n$  – их количество за год;  $\tau$  – количество часов в году (8760).

Значение критерия  $K$  во всех случаях меньше 1, при этом чем оно ближе к 1, тем выше оптимизация.

Обработка пульсирующими дозвуковыми воздушными потоками конструктивных элементов воздушных судов с целью повышения их ресурса положительно влияет на величину критерия оптимизации технического обслуживания и ремонта.

Результатом нахождения повреждений в ходе осмотров становятся внеплановые ремонты, количество которых, благодаря повышению устойчивости элементов конструкции к деградационным эксплуатационным факторам путем газоимпульсной обработки, может быть соответственно уменьшено.

В качестве критерия оптимизации продолжительности газоимпульсной обработки было принято повышение механических и эксплуатационных свойств, таких как прочность, пластичность, ударная вязкость, кор-

розионная стойкость, сопротивление усталости, хладостойкость, жаропрочность в комплексе, когда при росте одних характеристик не допускается снижение других ниже первоначальных значений:

$$K_{cvi} \geq 1,$$

где  $K_{cvi}$  – значение  $i$ -го свойства, достигнутое в результате газоимпульсной обработки, отнесенное к его первоначальному значению.

Так, в ходе технического обслуживания вертолетов проверяют отсутствие деформаций и трещин обшивки, силового набора планера и рамы двигателей, забоин на лопастях несущего и рулевого винтов, других повреждений. При обнаружении подобных дефектов рекомендуется использовать газоимпульсную обработку с целью повышения и восстановления механических свойств в месте повреждения и воспрепятствования его дальнейшему развитию.

Обладая свойством малой (10–30 мин) продолжительности, газоимпульсная обработка может осуществляться как при оперативном ТО, особенно на этапах после загрузки (выгрузки) багажа, так и при очередном ТО по форме 1 и др.

Обобщая предлагаемую методологию использования обработки пульсирующими дозвуковыми газовыми потоками в процессе технического обслуживания и восстановительного ремонта элементов конструкции воздушных судов, следует отметить, что элементы конструкции воздушного судна можно разделить на две группы исходя из того, обдувается в процессе эксплуатации данный элемент воздушными потоками или не подвержен данному воздействию.

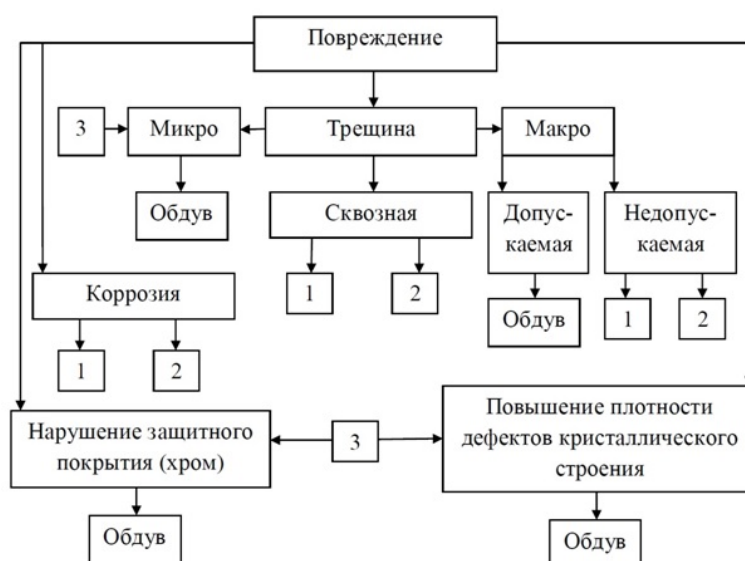
При техническом обслуживании и восстановительном ремонте последних можно не учитывать деградиационные процессы, связанные с воздействием колебаний параметров воздушного потока на структуру и свойства материала элемента конструкции. Использование газоимпульсной обработки подобных элементов в процессе технического обслуживания и восстановительного ремонта решит задачу повышения стойкости к усталостному

разрушению, а также устойчивости к динамическим нагрузкам. Направление обработки должно выбираться с учетом эксплуатационных статических и динамических нагрузок. При обнаружении трещины допустимых регламентом размеров или области с повышенной плотностью дислокаций, предшествующей образованию трещины, следует проводить газоимпульсную обработку соответствующей области элемента конструкции в течение расчетной продолжительности, перпендикулярно поверхности элемента конструкции (рис. 3).

В случае если в процессе эксплуатации элемент конструкции воздушного судна испытывает деградиационное воздействие натекающих нестационарных воздушных потоков, выражающееся в увеличении плотности дефектов кристаллического строения в поверхностных слоях, устранить его можно газоимпульсной обработкой в направлении, противоположном эксплуатационному воздействию воздушных потоков. В остальном газоимпульсная обработка микротрещин и других дефектов, а также обработка с целью повышения трещиностойкости и устойчивости к динамическим нагрузкам осуществляется аналогично таковой для элементов конструкции воздушного судна, не подвергающихся воздействию воздушных потоков при эксплуатации.

Различают внезапные и постепенные отказы [17]. Первые возникают неожиданно, в короткий промежуток времени и характеризуются хрупким разрушением. Особенность постепенных отказов – накопление за время эксплуатации воздушного судна необратимых повреждений, вызванных усталостью материала, пластическими деформациями, ползучестью, старением или механическим износом.

Каждый агрегат или узел воздушного судна состоит из конструктивных элементов, надежность которых неодинакова. Своевременная бездеформационная обработка, такая как обработка пульсирующими дозвуковыми воздушными потоками (газоимпульсная обработка), практически любого конструктивного элемента позволяет существенно повы-



**Рис. 3.** Использование газоимпульсной обработки (обдув) в процессе технического обслуживания и ремонта: 1 – замена поврежденного конструктивного элемента воздушного судна или аэродромной техники новым обдудым; 2 – ремонт с последующим обдувом, если конструктивный элемент ремонтпригоден; 3 – упреждающий обдув до начала эксплуатации (желателен для всех нагруженных конструктивных элементов)

**Fig. 3.** The use of gas pulse treatment (blowing) in the process of maintenance and repair: 1 – replacement of a damaged structural element of an aircraft or airfield equipment with a new blown one; 2 – repair followed by blowing, if the structural element is repairable; 3 – anticipatory blowing before operation (desirable for all loaded structural elements)

суть срок его службы (ресурс), а значит, и его надежность [1].

С точки зрения механики конструкций воздушных судов типовыми элементами, образующими агрегаты систем механического оборудования и систем жизнеобеспечения летательных аппаратов являются стержневые элементы, пластины, оболочки и т. п.

Исследование амплитудно-частотных характеристик дозвукового воздушного потока, натекающего на подобные элементы, осуществлялось при помощи программы SpectraPLUS Professional Edition 5.0.

При встрече с обдуваемым элементом конструкции воздушного судна происходит смещение доминирующей частоты в область более низких значений, практически независимо от формы элемента конструкции, при условии его малого размера в сравнении с поперечным сечением натекающего на него потока. В обратном случае наблюдается появление дополнительных амплитудных всплесков, которые могут служить дополнительными рабочими частотами.

В случае близкого расстояния до обдуваемого объекта амплитуда гармоник уменьшается. По мере увеличения расстояния амплитуда доминирующей частоты меняется циклически, с максимумом на расстоянии порядка 30 мм от обдуваемого объекта.

В случае крупного объекта обдува по мере удаления от объекта доминирующая частота смещается в более низкочастотную область. В случае увеличения скорости воздушного потока при прочих равных условиях доминирующая частота потока, натекающего на преграду, смещается в область более высоких частот.

Знание амплитудно-частотной характеристики импульсной струи, натекающей на конструктивный элемент воздушного судна, позволяет установить доминирующие частоты колебаний и таким образом выявить рабочие частоты, при которых наблюдается значительный рост амплитуды колебаний.

Близость собственной частоты колебаний обдуваемого объекта к одной из рабочих частот натекающего на него пульсирующего

газового потока создает резонансный эффект и значительно уменьшает требуемую продолжительность обработки.

На авиаремонтных предприятиях для восстановления изношенных или поврежденных металлических элементов конструкции воздушных судов и авиадвигателей используют операции наплавки, в процессе которых на поврежденном участке образуется слой литого металла. По своим механическим и эксплуатационным свойствам наплавленный участок будет отличаться от остального элемента конструкции, вне зависимости от того, был ли элемент получен обработкой давлением или литьем, упрочнен термически, деформационно или, как в случае литых корпусов насосов и других подобных устройств из силумина, не подвергался иной обработке. В последнем случае наплавленный участок будет отличаться размером и формой зерна, которые в основном и определяют механические свойства литых конструкций. Если элемент конструкции был получен холодным пластическим деформированием в результате использования для его восстановления наплавки или сварки, включая электроконтактную, в зоне термического влияния происходит снятие наклепа и прочностные свойства снижаются. При восстановлении подобных элементов конструкции рихтовкой, наоборот, возникает дополнительный наклеп, приводящий к локальному охрупчиванию и образованию концентраторов напряжений. Практически все операции восстановительного ремонта, связанные с нагревом и (или) восстановлением формы, добавляют в отремонтированный объект остаточные напряжения, которые могут представлять опасность в процессе эксплуатации. Разделим ремонтируемые объекты, элементы конструкции воздушных судов, авиационных двигателей и аэродромной техники на четыре основные группы по используемому виду упрочнения при их изготовлении.

1. Термоупрочняемые детали и элементы конструкции, изготавливаемые механической обработкой (валы двигателей) или горячей обработкой давлением (как лопасти вентиляторов и компрессорные лопатки), включая

полученные термомеханической обработкой или литые с последующим термическим упрочнением (такие как турбинные лопатки).

2. Детали и элементы конструкции, полученные холодной объемной или листовой штамповкой и упрочненные деформационно.

3. Литые нетермоупрочняемые элементы конструкции.

4. Детали, окончательные свойства которых формируются химико-термической обработкой.

Рассмотрим пути совершенствования технологии их восстановительного ремонта в направлении обеспечения конструктивной прочности восстанавливаемых элементов конструкции, не уступающей первоначальной, и сокращения стоимости и продолжительности ремонта.

1. Стальные термоупрочняемые детали упрочняют закалкой с последующим отпуском, за исключением деталей из аустенитных сталей с карбидным и интерметаллидным упрочнением, а также мартенситностареющих сталей, подвергаемых после закалки искусственному старению. В зависимости от критической скорости закалки, для перезакалки отремонтированных стальных элементов конструкции воздушных судов может быть использован пульсирующий воздушный поток или пульсирующая водовоздушная смесь, причем в случае легированных сталей, используемых в основном для изготовления стальных элементов конструкции воздушных судов, авиационных двигателей и аэродромной техники, закалка в большинстве случаев может осуществляться без введения в пульсирующий дозвуковой воздушный поток охлаждающей жидкости. Результатом использования в качестве закалочной среды пульсирующего воздушного потока будет измельчение структуры мартенсита закалки и более высокая конструктивная прочность после окончательной термической обработки, в сравнении со стандартной закалкой в воде, масле, синтетических закалочных средах. При этом используемая среда более экономична и экологична в сравнении с машинным маслом и синтетическими закалочными средами. Вода же не может быть использована в

качестве закалочной среды для большинства легированных сталей из-за их склонности к растрескиванию. При закалке в пульсирующем воздушном или водовоздушном потоке благодаря сглаживанию пиков структурных напряжений под действием колебаний параметров потока, закалочная деформация и закалочные остаточные напряжения малы в сравнении с традиционными закалочными средами, что снижает количество брака при закалке и уменьшает вероятность растрескивания в период между закалкой и отпуском. Пульсирующий воздушный поток может быть использован как замена низкого отпуска при термообработке ремонтируемых элементов конструкции воздушных судов на высокопрочное состояние. Подобная технология позволяет в несколько раз уменьшить время термообработки без ущерба для механических и эксплуатационных свойств [1]. Особенно эффективна замена отпускного нагрева воздействием на закаленное изделие пульсирующим воздушным потоком, если закалка осуществлялась в том же потоке. В этом случае устраняется такой недостаток практикуемого термоупрочнения, увеличивающий его продолжительность, как разделение операций закалки и последующего отпуска [1]. Газоимпульсная обработка может быть использована в качестве дополнительной как после закалки с последующим низким отпуском (высокопрочное состояние), так и после широко применяемого к стальным деталям авиационной и аэродромной техники термоулучшения [1]. В том и другом случае техническим результатом использования технологии газоимпульсной обработки является повышение надежности отремонтированных деталей за счет повышения значений показателей ударной вязкости и пластичности без снижения показателей прочности. Данная технология может быть применена и к термоупрочненным элементам конструкции воздушных судов, не подвергавшимся восстановительному ремонту. В этом случае перекалывание не используется и газоимпульсная обработка осуществляется в качестве средства дополнительного повышения конструктивной прочности. Повысить значения пока-

зателей надежности термообработанных металлических элементов конструкции воздушных судов и авиационных двигателей, как подвергавшихся, так и не подвергавшихся повторной термической обработке после восстановительного ремонта вне зависимости от направления эксплуатационного нагружения, позволяет многосторонняя газоимпульсная обработка. Элементы конструкции воздушных судов изготавливают из термоупрочняемых титановых, алюминиевых и никелевых, магниевых и других сплавов. В процессе ремонта восстановление изношенных и поврежденных деталей также осуществляют наплавкой, создающей область крупнозернистого литого металла и зону термического влияния с пониженными механическими свойствами, которые в процессе эксплуатации могут стать источником разрушения, в особенности по линии сплавления. Для восстановления надежности на уровне исходных изделий, после использования наплавки или сварки их необходимо снова термоупрочнять. Цветные сплавы термоупрочняют закалкой с последующим старением. Закалка цветных сплавов традиционно осуществляется в воде, что в случае сложной конфигурации может привести к отклонениям от заданной формы. Для закалки изделий из титановых сплавов применяется пульсирующий водовоздушный поток, у которого при скорости пульсирующего воздушного потока от 25 до 30 м/с расход воды на закалку изделия составляет не более 1,5 л, что дополнительно обеспечивает после старения повышение столь важной для компрессорных лопаток твердости, а стало быть – износостойкости [1]. Аналогично могут закаливаться отремонтированные элементы конструкции из жаропрочных никелевых сплавов, а также магниевых сплавов. Закалка алюминиевых сплавов может быть осуществлена в пульсирующем дозвуковом воздушном потоке, начиная со скорости потока 20 м/с. При этом при последующем естественном старении наблюдается более интенсивный рост прочностных свойств в сравнении с закалкой в воде. Готовые термоупрочненные детали из цветных сплавов, так же как и термоупрочненные стальные детали,



перед установкой в отремонтированные узлы и агрегаты авиационной техники могут быть дополнительно обработаны пульсирующими воздушными потоками с целью повышения их конструктивной прочности и надежности.

2. Существенную часть элементов конструкции воздушных судов и аэродромной техники получают холодной объемной или листовой штамповкой, без дальнейшего термоупрочнения, при этом прочностные свойства определяются степенью пластической деформации либо изначально присутствующей в прежде всего листовом прокате или бесшовных трубах (как правило, 50 %), либо приобретаемой в процессе получения изделий пластическим формоизменением. Если восстановительный ремонт подобных элементов конструкции воздушного судна сопровождается нагревом, например при использовании газопламенной и электроконтактной сварки, подогрева при устранении вмятин и т. п., в зоне термического влияния, наклеп полностью или частично снимается, что приводит к опасному локальному разупрочнению элемента конструкции. Восстановить утраченные прочностные свойства позволит локальная обработка бездеформационными методами, в частности газоимпульсная обработка, при использовании которой упрочнение реализуется без снижения пластичности и ударной вязкости. При восстановлении утраченной первоначальной конфигурации элемента конструкции воздушного судна рихтовкой в поверхностных слоях могут возникать опасные растягивающие остаточные напряжения. В этом случае обработка пульсирующими газовыми потоками, в зависимости от режима обработки, позволит снять растягивающие остаточные напряжения до нулевого значения либо же создать в поверхностных слоях благоприятные сжимающие остаточные напряжения [1], способствующие повышению коррозионной стойкости и устойчивости к циклическим нагрузкам. Использование газоимпульсной обработки для ремонтируемых элементов конструкции воздушных судов наиболее эффективно при учете частоты собственных колебаний элемента конструкции [1], когда при совпадении частоты собственных колебаний

или кратной ей частоты с частотой колебаний параметров потока снимающие остаточные напряжения процессы интенсифицируются и продолжительность газоимпульсной обработки может быть снижена в два и более раза. Также газоимпульсная обработка позволяет обеспечить повышенную релаксационную стойкость витых пружин [1], имеющих, в частности, в системе шасси.

3. При восстановительном ремонте термически не упрочненных литых элементов конструкции воздушного судна, прежде всего корпусных силуминовых изделий, размер зерна и, стало быть, механические свойства наплавленного материала зачастую отличаются в худшую сторону от остального изделия, кроме того, в зоне термического влияния происходит рост зерна, сопровождающийся снижением конструктивной прочности. Градиент температур при наплавке ведет к возникновению в поверхностных слоях литого элемента конструкции растягивающих остаточных напряжений. У ремонтируемых литых деталей газоимпульсная обработка зоны наплавки и термического влияния обеспечивает повышение механических свойств, а также снятие опасных растягивающих остаточных напряжений, что дополнительно повышает устойчивость к циклическим и динамическим нагрузкам, а также коррозионную стойкость [1].

Перспективным является использование бездеформационных технологий, позволяющих в ходе осуществления ремонта восстановить первоначальные прочностные свойства элементов конструкции воздушных судов, снизившихся под действием эксплуатационных факторов [10], таких как газоимпульсная обработка, которая, кроме того, при использовании в процессе восстановительного ремонта металлических элементов конструкции воздушных судов обеспечивает повышение таких механических и эксплуатационных свойств, как усталостная прочность, трещиностойкость, жаропрочность, хладостойкость [1].

Как и в случае восстановительного ремонта, перспективным является использование в ходе технического обслуживания воздушных судов и авиадвигателей технологий, основан-

ных на обработке материалов и изделий пульсирующими дозвуковыми воздушными потоками, позволяющих восстановить первоначальные прочностные свойства элементов конструкции воздушных судов, снизившихся под действием эксплуатационных факторов [18], и, более того, повысить их надежность. Так, остаточные напряжения, которые присутствуют в сварных конструкциях, эффективно снимаются газоимпульсной обработкой области сварного шва. Остаточные напряжения могут возникать не только в ходе изготовления элементов конструкции воздушных судов и авиадвигателей или их восстановительного ремонта, но и при эксплуатации. Регулярная обработка пульсирующим воздушным потоком или иными бездеформационными способами элементов конструкции воздушных судов, в которых могут образовываться остаточные напряжения, позволит предотвратить образование трещин, в том числе усталостных, эрозии, а также коробления, снижение статической, динамической и усталостной прочности. Дополнительная обработка пульсирующим воздушным потоком деталей воздушных судов и авиационных двигателей, подвергавшихся термообработке на высокопрочное состояние, применяемой, в частности, к переднему подшипнику компрессора – роликовому, который воспринимает нагрузку от веса и центробежную силу от дисбаланса ротора, и заднему подшипнику компрессора – шариковому, радиально-упорному, который кроме радиальной нагрузки воспринимает суммарную осевую нагрузку, действующую на ротор двигателя и равную разности осевых сил от роторов компрессора и турбины, обеспечит повышение надежности деталей за счет повышения значений показателей ударной вязкости и пластичности без снижения показателей прочности. То же относится к термоулучшенным валам авиадвигателей и деталям редукторов, нормализованным деталям авиационной и аэродромной техники. Данную обработку предлагается осуществлять непосредственно в ходе технического обслуживания воздушных судов. Пружины, которыми, к примеру, могут устанавливаться в исходное положение штоки

гидроцилиндров замков шасси после газоимпульсной обработки, осуществляющейся в процессе технического обслуживания, приобретут более высокую релаксационную стойкость, что будет способствовать безотказности работы всей системы шасси. Практикуется эксплуатация элементов конструкции воздушных судов и авиадвигателей с повреждениями, которые относят к незначительным. Например, для лопаток компрессора двигателя ТВЗ-117 в ряде случаев могут допускаться забоины и вмятины глубиной до 1 мм и длиной до 5 мм. Важно предотвратить развитие подобных дефектов, особенно при повторном динамическом воздействии, что может быть обеспечено локальным восстановлением пластичности и ударной вязкости путем газоимпульсной обработки дефектной области. В случае лопаток входного направляющего аппарата можно производить обработку непосредственно на двигателе. Обдув следует осуществлять перпендикулярно поврежденной поверхности. Такое направление обработки обеспечивает значительный рост трещиностойкости и одновременно меньшую подверженность влиянию на структуру материала, а стало быть и достигнутый обработкой эффект воздушных потоков, обтекающих элемент конструкции воздушного судна в процессе эксплуатации. То же может быть отнесено к другим допускаемым трещинам и иным дефектам элементов конструкции воздушного судна, включая вентиляторные лопатки, стойки шасси, лопасти винта турбовинтового двигателя и любые другие элементы, в которых могут возникать повреждения от внешних воздействий и которые могут быть обработаны непосредственно на воздушном судне. Для сложнонагруженных элементов при использовании газоимпульсной обработки в ходе технического обслуживания с целью повышения их надежности, обеспечить необходимую изотропию свойств позволит многосторонний обдув. При обнаружении в ходе технического обслуживания трещин или забоин допустимого регламентом размера можно рекомендовать обработку поврежденных областей пульсирующими газовыми потоками, что позволит избежать их

распространения и обеспечить надежность в случае повторного внешнего динамического воздействия на ту же область.

## Заключение

В заключение можно сделать вывод о том, что повышающая или восстанавливающая эксплуатационные свойства бездеформационная обработка пульсирующими газовыми потоками эффективна и может осуществляться в ходе выполнения всех форм технического обслуживания и ремонта воздушных судов.

Результаты исследований и расчетов в области использования технологий обработки элементов конструкции авиационных транспортных средств, оборудования и механизмов на основе пульсирующих дозвуковых воздушных потоков свидетельствуют о высокой эффективности их применения для решения задач повышения надежности и увеличения срока эксплуатации авиационных деталей, оптимизации сроков проверок и ремонтов.

Перечисленные методологические изменения, направленные на обнаружение таких дефектов, которые могут быть устранены газоимпульсной или иной бездеформационной обработкой, в практике организации технического обслуживания потребуют разработки рекомендаций по внесению изменений в соответствующие регламенты и программы.

## Список литературы

1. **Иванов Д.А.** Воздействие нестационарных газовых потоков на структуру и свойства материалов, используемых в авиационной промышленности. СПб.: СПбГУГА, 2017. 328 с.
2. **Tomblin J., Seneviratne W.** Determining the fatigue life of composite aircraft structures using life and load-enhancement factors // Report DOT/FAA/AR-10/6, June 2011. 155 p.
3. **Burhan I., Kim H.S.** S-N curve models for composite materials characterisation: an evaluative review // Journal of Composites Science. 2018. Vol. 2, iss. 3. ID: 38. DOI: 10.3390/JCS2030038

4. **Лапаев А.В., Шапкин В.С.** К вопросу оценки влияния коррозионных поражений планера на летную годность воздушных судов по условиям усталостной прочности // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2014. № 4 (315). С. 17–21.

5. **Разиньков Ф.Ф., Акоюн К.Э.** Анализ изменения параметров коррозионных повреждений элементов конструкции центральной части фюзеляжа с увеличением сроков службы вертолетов типа Ми-8 // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2020. № 32. С. 53–64.

6. **Роберов И.Г.** Комплексная диагностика технического состояния и оценка работоспособности металлических материалов методами неразрушающего контроля / И.Г. Роберов, Д.К. Фигуровский, М.А. Киселев, В.С. Грама, Д.Б. Матвеев, В.О. Иванов // Заготовительные производства в машиностроении. 2020. Т. 18, № 4. С. 178–181.

7. **Mishchenko A.** Analysis of residual stresses resulting from the surface preparation for X-ray diffraction measurement / A. Mishchenko, L. Wu, V.K. da Silva, A. Scotti // Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2018. Vol. 40, iss. 2. Article number: 94. DOI: 10.1007/s40430-018-1036-5

8. **Акоюн К.Э.** Экспериментальная оценка влияния технологии восстановления материала конструкционных алюминиевых сплавов при коррозионном поражении на статическую прочность для решения задач по поддержанию летной годности воздушных судов / К.Э. Акоюн, С.А. Грачев, А.В. Лапаев, В.К. Орлов, А.О. Титов, В.С. Шапкин, С.А. Школин // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2015. № 8 (319). С. 7–15.

9. **Акоюн К.Э.** Экспериментальная оценка влияния коррозионного поражения на статическую прочность конструкционного алюминиевого сплава / К.Э. Акоюн, С.А. Грачев, А.В. Лапаев, В.С. Шапкин // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2016. № 12 (323). С. 7–14.

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

11. **Ицкович А.А.** Повышение эффективности процессов поддержания летной годнос-

ти воздушных судов на основе методологии управления проектами / А.А. Ицкович, А.О. Чернов, Г.Д. Файнбург, И.А. Файнбург // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 1. С. 26–35.

**12. Vaskic L., Paetzold K.** A critical review of the integrated logistics support suite for aerospace and defence programmes // Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design. ICED, 2019. Vol. 1, iss. 1. Pp. 3541–3550. DOI: 10.1017/dsi.2019.361

**13. Strohmeier M.** On perception and reality in wireless air traffic communication security / M. Strohmeier, M. Schäfer, R. Pinheiro, V. Lenders, I. Martinovic // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2017. Vol. 18, no. 6. Pp. 1338–1357. DOI: 10.1109/TITS.2016.2612584

**14. Ben Mahmoud M.S., Larrieu N., Pirovano A.** A risk propagation based quantitative-assessment methodology for network security-aeronautical network case study // 2011 Conference on Network and Information Systems Security. LaRochelle, 2011. Pp. 1–9. DOI: 10.1109/SAR-SSI.2011.5931372

**15. Зыбин Е.Ю., Косьянчук В.В., Сельвсюк Н.И.** Электрификация и интеллектуализация – основные тенденции развития энергокомплекса воздушных судов // Авиационные системы. 2016. № 5. С. 45–51.

**16. Шанявский А.А.** Безопасное усталостное разрушение элементов авиаконструкций: монография. Уфа: Уфимский полигр. комб., 2003. 803 с.

**17. Оболенский Е.П., Сахаров Б.И., Стрекозов Н.П.** Прочность агрегатов оборудования и элементов систем жизнеобеспечения летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1989. 248 с.

**18. Иванов Д.А.** Способ обработки металлических элементов конструкции воздушных судов. Патент RU № 2702885 С2, МПК С21D 7/00: опублик. 11.10.2019, Бюл. № 29. 4 с.

## References

**1. Ivanov, D.A.** (2017). *The effect of unsteady gas flows on the structure and properties of materials used in the aviation industry*. St.Petersburg: SPbGUGA, 328 p. (in Russian)

**2. Tomblin, J. & Seneviratne, W.** (2011). *Determining the fatigue life of composite aircraft structures using life and load-enhancement factors*. Report DOT/FAA/AR-10/6, 155 p.

**3. Burhan, I. & Kim, H.S.** (2018). *S-N curve models for composite materials characterisation: an evaluative review*. Journal of Composites Science, vol. 2, issue 3, ID: 38. DOI: 10.3390/JCS2030038

**4. Lapaev, A.V. & Shapkin, V.S.** (2014). *To the question of the evaluation of influence of corrosion defects of the airframe on the flight validity of aircrafts under the terms of fatigue durability*. Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA), no. 4 (315), pp. 17–21. (in Russian)

**5. Razinkov, F.F. & Akopyan, K.E.** (2020). *Analysis of changes in parameters of corrosion damage to structural elements of the central fuselage with an increase in the service life of Mi-8 helicopters*. Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA), no. 32, pp. 53–64. (in Russian)

**6. Roberov, I.G., Figurovsky, D.K., Kiselev, M.A., Grama, V.S., Matveev, D.B. & Ivanov, V.O.** (2020). *Integrated diagnostics of technical condition and serviceability evaluation of metal materials by nondestructive testing methods*. Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii, vol. 18, no. 4, pp. 178–181. (in Russian)

**7. Mishchenko, A., Wu, L., da Silva, V.K. & Scotti, A.** (2018). *Analysis of residual stresses resulting from the surface preparation for X-ray diffraction measurement*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, vol. 40, issue 2, article number: 94. DOI: 10.1007/s40430-018-1036-5

**8. Akopyan, K.E., Grachev, S.A., Lapaev, A.V., Orlov, V.K., Titov, A.O., Shapkin, V.S. & Shkolin, S.A.** (2015). *Experimental assessment of influence of technology of restoration of material constructional aluminum alloys at corrosion defeat on static durability for the solution of tasks of maintenance of the flight validity of aircrafts*. Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA), no. 8 (319), pp. 7–15. (in Russian)

9. Akopyan, K.E., Grachev, S.A., Lapaev, A.V. & Shapkin, V.S. (2016). *Experimental assessment of corrosion defeat on static durability for constructional aluminum alloy*. Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA), no. 12 (323), pp. 7–14. (in Russian)

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

11. Itskovich, A.A., Chernov, A.O., Faynburg, G.D. & Faynburg, I.A. (2017). *Increasing the aircraft airworthiness maintenance efficiency based on the project management methodology*. Civil Aviation High Technologies, vol. 20, no. 1, pp. 26–35. (in Russian)

12. Vaskic, L. & Paetzold, K. (2019). *A critical review of the integrated logistics support suite for aerospace and defence programmes*. Proceedings of the Design Society: International Conference on Engineering Design. ICED, vol. 1, issue 1, pp. 3541–3550. DOI: 10.1017/dsi.2019.361

13. Strohmeier, M., Schäfer, M., Pinheiro, R., Lenders, V. & Martinovic, I. (2017). *On perception and reality in wireless air traffic communication security*. IEEE Transactions on Intelligent

Transportation Systems, vol. 18, no. 6, pp. 1338–1357. DOI: 10.1109/TITS.2016.2612584

14. Ben Mahmoud, M.S., Larrieu, N. & Pirovano, A. (2011). *A risk propagation based quantitative assessment methodology for network security-aeronautical network case study*. 2011 Conference on Network and Information Systems Security, La Rochelle, pp. 1–9. DOI: 10.1109/SAR-SSI.2011.5931372

15. Zybin, E.Yu., Kosyanchuk, V.V. & Selvesyuk, N.I. (2016). *Electrification and intellectualization are the main trends in the development of the aircraft power complex*. Aviationsionnye sistemy, no. 5, pp. 45–51. (in Russian)

16. Shanyavsky, A.A. (2003). *Tolerance fatigue failures of aircraft components: Monograph*. Ufa: Ufimskiy poligraficheskiy kombinat, 803 p. (in Russian)

17. Obolensky, E.P., Sakharov, B.I. & Strekozov, N.P. (1989). *Strength of equipment aggregates and elements of aircraft life support systems*. Moscow: Mashinostroyeniye, 248 p. (in Russian)

18. Ivanov, D.A. (2019). *A method of processing metal elements of the aircraft structure*. Patent RU, no. 2702885 C2, MPK C21D 7/00: publ. October 11, byulyuten no. 29, 4 p. (in Russian)

## Сведения об авторах

**Иванов Денис Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры авиационной техники и диагностики, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации» (СПбГУ ГА), ivanov.denis.71@mail.ru.

**Петрова Татьяна Владимировна**, кандидат технических наук, и. о. заведующего кафедрой авиационной техники и диагностики, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации» (СПбГУ ГА), ptata@ya.ru.

## Information about the authors

**Denis A. Ivanov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Aeronautical Equipment and Diagnostics Chair, Saint Petersburg State University of Civil Aviation, ivanov.denis.71@mail.ru.

**Tatyana V. Petrova**, Candidate of Technical Sciences, Acting Head of the Aeronautical Equipment and Diagnostics Chair, Saint Petersburg State University of Civil Aviation, ptata@ya.ru.

Поступила в редакцию 16.01.2022  
Принята в печать 23.03.2022

Received 16.01.2022  
Accepted for publication 23.03.2022

УДК 656.7.076

DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-54-69

## Роль малой авиации в обеспечении транспортной доступности арктических регионов: проблемы и направления развития

И.О. Полешкина<sup>1</sup>

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

**Аннотация:** На основании особенностей природно-климатических условий регионов восточной части Арктической зоны Российской Федерации в статье определена главенствующая роль малой авиации в обеспечении пассажирских перевозок и оказания услуг санитарной авиации и МЧС. Проанализировано современное состояние транспортной системы этой территории, которое характеризуется отсутствием железнодорожного сообщения, наличием автомобильных дорог только сезонного пользования в виде автозимников, главенствующей ролью водного транспорта в организации грузовых перевозок на основе сложных долгосрочных (более одного года) мультимодальных схем доставки, крайне высокой стоимостью региональных и местных авиаперевозок. Целью исследования является анализ состояния системы малой авиации в восточной Арктике России, выявление факторов, сдерживающих ее развитие, и разработка предложений по их устранению. В статье рассматривается состояние действующей аэропортовой сети, маршрутной сети и парка эксплуатируемых воздушных судов действующих авиакомпаний, обслуживающих эти территории. Ограниченная аэропортовая сеть не обеспечивает авиационную доступность каждого населенного пункта Арктической зоны и приводит к транспортной дискриминации. Отсутствие регулярных рейсов во внутрилулусном (местном) сообщении приводит к увеличению времени ожидания перевозки и снижает спрос на нее. Устаревший парк судов малой авиации с низкой экономической эффективностью приводит к вытеснению их вертолетным сообщением. Стоимость летного часа вертолетов в условиях Арктики составляет 500 000–650 000 руб. В статье рассмотрены правовые ограничения, сдерживающие развитие местных авиаперевозок в Арктической зоне, которые заключаются в завышенных требованиях к компаниям и авиапредприятиям, обслуживающим деятельность малой авиации. На основании анализа зарубежного опыта предложены направления совершенствования российского законодательства, регулирующего деятельность малой авиации, которые позволят снизить затраты на содержание аэропортовой сети, тем самым стимулируя ее расширение, повышая уровень транспортной доступности отдаленных населенных пунктов Арктической зоны. Разработаны целевые показатели, на достижение которых направлены предложенные мероприятия совершенствования системы воздушного транспорта Арктической зоны.

**Ключевые слова:** транспортная доступность, подвижность населения, малая авиация, Арктическая зона, аэропортовая сеть, местные авиаперевозки.

**Для цитирования:** Полешкина И.О. Роль малой авиации в обеспечении транспортной доступности арктических регионов: проблемы и направления развития // Научный Вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 2. С. 54-69. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-54-69

## Contribution of general aviation to ensuring transport accessibility to the Arctic regions: the challenges and areas of focus

I.O. Poleshkina<sup>1</sup>

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

**Abstract:** The article defines the dominant position of general aviation to ensure passenger transportation, to render the sanitary aviation and the Ministry of Emergencies services, taking into consideration the natural and climatic conditions of the Russian Federation Eastern Arctic. It analyzes the current state of the transport system of this territory, which is characterized by the railway communication lack, available roads for only seasonal purpose – winter roads, and the key role of water transport in the organization of freight transport based on the complex long-term (more than one year) multimodal

delivery schemes, extremely high cost of regional and local air transportation. The purpose of the study is to analyze the state of the general aviation system in the Eastern Arctic of Russia and identify the factors, constraining its development, and to formulate proposals for their elimination. The article examines the state of the operating airport network, route network and operators' fleet of aircraft – in service which render services to these territories. The limited airport network does not provide aviation accessibility to each settlement of the Arctic zone and causes transport discrimination. The lack of scheduled flights in local communication leads to increased waiting time for transportation and reduces demand. The outdated general aviation fleet with low economic efficiency is outcompeted by the helicopter service. The cost of a helicopter flight hour in the Arctic is 500–650 thousand rubles. The article considers the legal restrictions, that are associated with overstated requirements for companies and aviation enterprises serving the general aviation activities and hinder the development of local air transportation in the Arctic zone. Based on the analysis of foreign experience, the areas of focus to improve the Russian legislation, regulating the general aviation activities, which will allow us to reduce the costs to maintain the airport network, thereby stimulating its expansion for the purpose of increasing the level of transport accessibility to remote settlements of the Arctic zone, are proposed. The proposed measures to improve the air transport system in the Arctic zone are aimed to achieve the formulated targets.

**Key words:** transport accessibility, population mobility, general aviation, Arctic zone, airport network, local air transportation.

**For citation:** Poleshkina, I.O. (2022). Contribution of general aviation to ensuring transport accessibility to the Arctic regions: the challenges and areas of focus. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 25, no. 2, pp. 54–69. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-54-69

## Введение

Малая авиация является незаменимым элементом транспортной системы арктических регионов в силу географических и природно-климатических особенностей этих территорий. Площадь Арктической зоны Российской Федерации составляет около 2,2 млн кв. км суши, то есть 12,8 % площади всей страны, с населением более 2,5 млн человек. Для регионов Арктической зоны России характерна низкая плотность населения, дисперсионное расселение и крайне суровые природно-климатические условия. Вместе с тем на этих территориях сосредоточен основной запас полезных ископаемых страны, освоение которых требует привлечения высококвалифицированных специалистов и рабочей силы, а также развития транспортной инфраструктуры. По территории Арктической зоны проходит самая протяженная морская граница страны длиной 22 600 км. Всю территорию Арктической зоны России с точки зрения особенностей природно-климатических условий можно разделить на две зоны: Арктическую зону регионов Европейской части России (до Уральских гор) и Арктическую зону регионов Восточной части России (за Уральскими горами). В состав Арктической зоны России включены территории шести регионов Европейской части: Мурман-

ская область, территории муниципальных образований «Беломорский муниципальный район», «Лоухский муниципальный район» и «Кемский муниципальный район» Республики Карелия, территории муниципальных образований «Город Архангельск», «Мезенский муниципальный район», «Новая Земля», «Город Новодвинск», «Онежский муниципальный район», «Приморский муниципальный район», «Северодвинск» Архангельской области, Ненецкий и Ямало-Ненецкий автономные округа, городской округ «Воркута» Республики Коми, и три региона Восточной части страны: Чукотский автономный округ, территории городского округа города Норильска, Таймырского Долгано-Ненецкого муниципального района, Туруханского района Красноярского края и территории 13 районов Республики Саха (Якутия), а также земли и острова, расположенные в Северном Ледовитом океане, указанные в постановлении Президиума ЦИК СССР от 15 апреля 1926 г. и других актах СССР<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Указ президента Российской Федерации О сухопутных территориях Арктической зоны Российской Федерации в редакции указов от 27.06.2017 № 287, от 13.05.2019 № 220, от 05.03.2020 № 164 [Электронный ресурс] // Pravo. URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&firstDoc=1&lastDoc=1&nd=102349446> (дата обращения: 27.10.2021).

Анализу состояния и путей развития транспортной системы европейской части российской Арктики посвящено большое количество исследований [1–4]. Для районов восточной части Арктической зоны России характерны более суровые природно-климатические условия, чем для районов западной ее части. Пороговые значения минимальной температуры зимой в европейской части составляют  $-31^{\circ}\text{C}$ , а в восточной части эти значения опускаются ниже  $-60^{\circ}\text{C}$ . На этой территории наблюдается максимальный перепад суточных и годовых температур. Перепад годовых температур может превышать  $80^{\circ}\text{C}$ . В связи с этим восточная часть Арктической зоны России, в границах от Таймыра до Чукотки, относится к абсолютно неблагоприятной зоне природной дискомфортности [5].

Природно-климатические условия и особенность очагового размещения населенных пунктов и хозяйствующих субъектов Арктической зоны накладывают жесткие ограничения на развитие транспортной инфраструктуры. Анализ состояния транспортной системы восточной части Арктической зоны показал, что:

- на этих территориях отсутствует железнодорожное и круглогодичное автомобильное сообщение;
- автомобильные магистрали представлены исключительно автозимниками с мало развитой инфраструктурой (недостаточным количеством заправочных станций, гостиниц, пунктов питания, автомастерских);
- в летнее время основу транспортного сообщения составляют водные пути, которые в летний период также имеют ограниченные сроки навигации в связи с обмелением русел рек и распространением пожаров;
- грузовые перевозки осуществляются по многоступенчатым безальтернативным долгосрочным мультимодальным схемам доставки (сроком более одного года), имеющим жесткие сезонные ограничения и требующим большого

количества пунктов депонии (хранения) грузов в местах стыковок видов транспорта и сезонного ожидания открытия следующих участков путей сообщения, пассажирские перевозки по таким схемам осуществляются лишь на ограниченных участках маршрутов [6];

- воздушный транспорт является безальтернативным в обслуживании не только межрайонных, но зачастую и внутрирайонных пассажирских перевозок, однако уровень развития системы воздушного транспорта в Арктической зоне России существенно отстает от уровня его развития в Арктической зоне развитых стран мира.

Опыт развитых стран по организации транспортного сообщения в Арктике доказывает, что именно воздушный транспорт является основой не только пассажирских, но и срочных грузовых перевозок, имеющих большое социальное значение. Это обусловлено его гибкостью и отсутствием жестких сезонных ограничений эксплуатации<sup>2,3</sup>. Отсутствие же нормально действующей системы воздушного транспорта в арктических регионах в условиях безальтернативности используемых видов транспорта приводит к серьезной транспортной дискриминации данных территорий. Исследованию вопросов транспортной дискриминации местного населения северных территорий посвящено большое количество исследований, которые отражают последствия такой дискриминации. Среди них можно выделить низкую подвижность населения, отсутствие доступа к социально значимым услугам, плохое продоволь-

<sup>2</sup> Alaska aviation system plan, Phase III, CFAP00484 | AIP 3-02-0000-024-2018. Alaska Department of Transportation & Public Facilities Statewide Aviation, January 2021. 34 p.

<sup>3</sup> Civil aviation infrastructure in the North. Transport Canada. Spring Reports of the Auditor General of Canada to the Parliament of Canada [Электронный ресурс] // oag-bvg. 2017. URL: [https://www.oag-bvg.gc.ca/internet/English/parl\\_oag\\_201705\\_06\\_e\\_42228.html](https://www.oag-bvg.gc.ca/internet/English/parl_oag_201705_06_e_42228.html) (дата обращения: 27.10.2021).



ственное обеспечение, завышенный уровень стоимости жизни [7–14].

Целью данного исследования является анализ состояния системы воздушного транспорта в восточной части Арктической зоны России, определение в ней места малой авиации, выявление проблем и направлений ее развития.

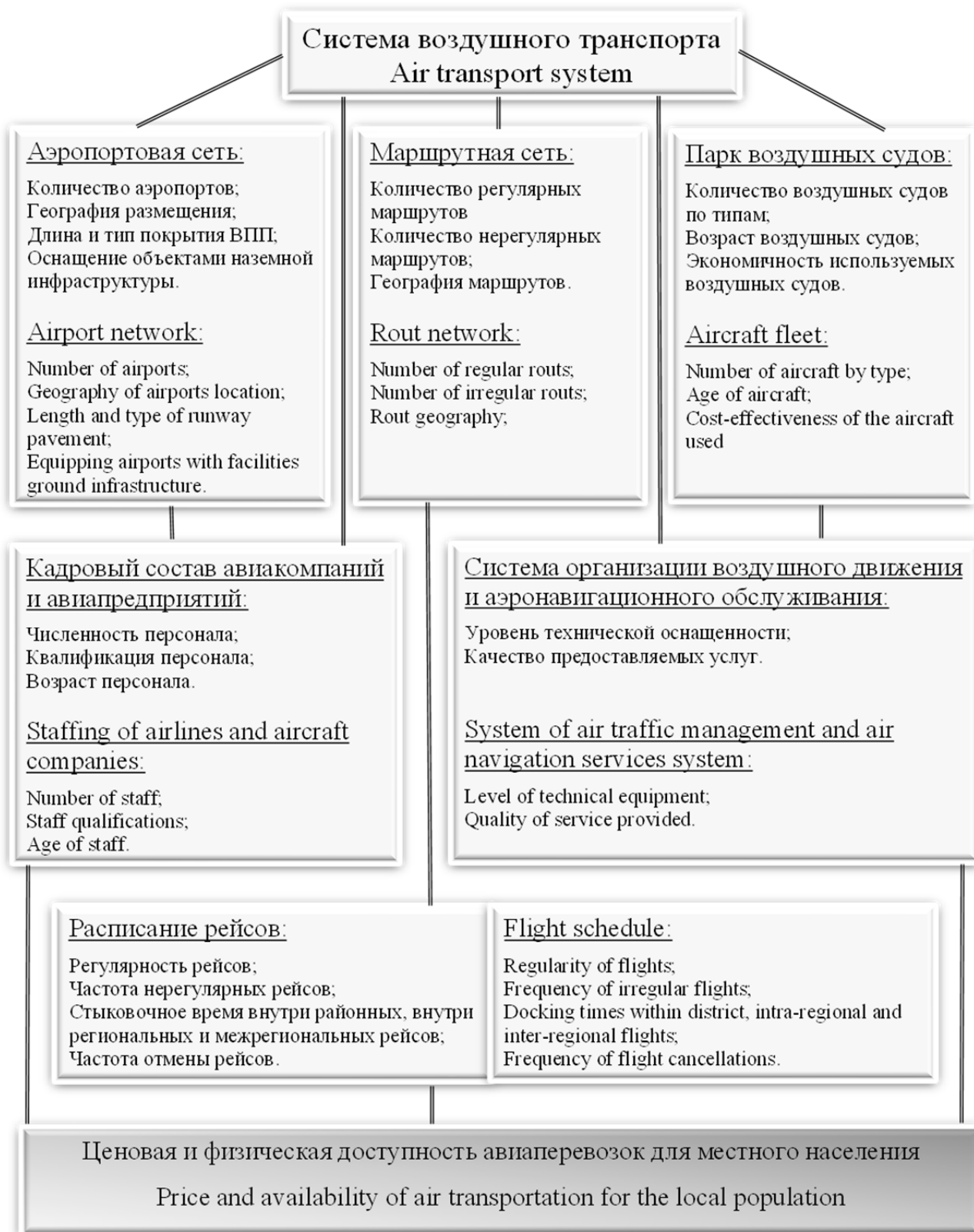
## **Структура системы воздушного транспорта в Арктической зоне**

Функционирование системы воздушного транспорта Арктической зоны России определяет состояние шести ее составляющих: аэропортовой сети; действующей маршрутной сети авиакомпаний, обслуживающих эти территории; расписания рейсов; состояния и достаточности парка воздушных судов; кадрового состава авиакомпаний и авиапредприятий, обслуживающего деятельность авиаперевозок; наличие технической и технологической инфраструктуры для организации воздушного движения и обслуживания полетов (метеорологическое, навигационное, техническое обслуживание). Состояние этих шести составляющих определяет ценовую и физическую доступности авиаперевозок для местного населения.

Каждый элемент системы воздушного транспорта в Арктической зоне предлагается оценивать по следующим показателям, представленным на рис. 1. Состояние аэропортовой сети можно оценить по количеству действующих аэропортов в Арктической зоне РФ, плотности и географии их размещения в расчете на площадь обслуживаемой территории и численность местного населения, длине и типу покрытия взлетно-посадочной поло-

сы (ВПП), а также оснащению аэропорта объектами наземной инфраструктуры для обслуживания воздушных судов (ВС), пассажиров и грузов. Состояние парка ВС предлагается оценивать по количеству воздушных судов различных типов в парке авиакомпаний, обслуживающих эти территории, возрасту воздушных судов и экономичности их использования. Состояние маршрутной сети определяется количеством регулярных и нерегулярных маршрутов, а также их географией. Маршрутная сеть влияет на составление расписания полетов, которое в арктических регионах предлагается оценивать показателями регулярности рейсов в разрезе направлений перевозки, частотой нерегулярных рейсов при организации местных перевозок, временем ожидания стыковочных рейсов при организации местных региональных и межрегиональных перевозок, а также частотой отмены рейсов в связи с природно-климатическими условиями этих территорий. Кадровый состав авиакомпаний и авиапредприятий оценивается количеством персонала, его средним возрастом и уровнем квалификации в разрезе специальностей. Система организации воздушного движения и аэронавигационного обслуживания оценивается качеством предоставляемых услуг.

Для выявления проблем обеспечения транспортной доступности населенных пунктов Арктической зоны России было проанализировано состояние шести составляющих системы воздушного транспорта (рис. 1). Для каждого из составляющих элементов предложены мероприятия, направленные на решение выделенных проблем в системе воздушного транспорта Арктических регионов.



**Рис. 1.** Элементы системы воздушного транспорта, определяющие ценовую и физическую доступность авиаперевозок Арктической зоны

**Fig. 1.** Elements of the air transport system determining the price affordability and availability of air transportation in the Arctic zone

Таблица 1  
Table 1

Характеристика аэропортовой сети восточной части Арктической зоны Российской Федерации  
Indicators of the airport network in the Arctic zone eastern part of the Russian Federation

Регион	Площадь АЗ, тыс. кв. км	Численность населения АЗ, чел.	Количество населенных пунктов АЗ, шт.	Количество аэропортов в АЗ, шт.	Количество аэропортов в расчете на 1 000 кв. км, единиц	Количество аэропортов в расчете на 1 000 жителей, единиц
Красноярский край	1 095,12	237 247	72	9	0,01	0,15
Республика Саха (Якутия)	1 625,62	67 652	130	14	0,01	0,21
Чукотский автономный округ	723,50	49 300	43	9	0,01	0,18
Итого	3 444,24	354 199	245	32	0,01	0,18

### Состояние системы воздушного транспорта в районах арктической зоны Российской Федерации и предложения по ее развитию

Аэропортовая сеть восточной части российской Арктики представлена 32 аэропортами регионального и местного значения (табл. 1) [15]. По сравнению с 1991 г. количество аэропортов на этой территории сократилось в 3 раза. Так, в настоящих границах Арктической зоны Красноярского края в 1991 г. действовало 14 аэропортов, в Арктической зоне Республики Саха (Якутия) – 42 аэропорта, в Чукотском автономном округе – 43 аэропорта. То есть в расчете на 1 000 кв. км площади в среднем приходилось 0,03 аэропорта.

Все действующие на сегодняшний день аэропорты в Арктической зоне Российской Федерации расположены преимущественно в районных центрах. Исключение составляет только Арктическая зона Красноярского края. Отсутствие аэропортов за пределами районных центров делает регулярные авиаперевозки недоступными для отдаленных населенных пунктов, что снижает авиационную подвижность населения и, как следствие, увеличивает их стоимость [16].

Для сравнения, территорию Аляски площадью 1 718 000 кв. км обслуживает 459 аэропортов. В расчете на 1000 кв. км приходится 0,26 аэропорта. Численность населения Аляски составляет 731 454 человека. Если исключить численность населения самого крупного города – Анкориджа (около 300 000 чел.), то в расчете на 1 000 жителей на Аляске приходится 1,06 аэропорта, что в 100 раз больше, чем в восточной части Арктической зоны России [17].

Причиной столь значительного сокращения количества аэропортов в России являются крайне высокие финансовые затраты на обеспечение требований ФАП-142 «Требования авиационной безопасности к аэропортам». Согласно данным требованиям, к региональным и местным аэропортам в Арктике предъявляются такие же требования, как и к крупнейшим международным аэропортам России. Помимо требований авиационной безопасности равные требования к международным, региональным и местным аэропортам применяются в отношении еще целого ряда параметров. Так, ФАП-262 регламентируют требования к аэродромам; ФАП-251 регламентируют правила регистрации аэродромов и вертодромов; ФАП-121 определяют требования к организациям, осуществляющим аэропортовую деятельность; ФАП-286

регламентируют требования к операторам аэродромов ГА. Из-за столь жесткого правового регулирования аэропортовой и аэродромной деятельности количество аэродромов авиации общего назначения и взлетных площадок в России составляет всего 400 единиц, в то время как в ЕС – 4 200, в США – 19 300, где действуют более мягкие авиационные правила [18].

В воздушном кодексе и ФАПх Российской Федерации в настоящее время отдельно не выделено понятие малой авиации, воздушных судов малой авиации, аэродромов, посадочных площадок и их классификации с регламентированием деятельности, к которой, по мнению специалистов, должны применяться более упрощенные требования [9–22]. Понятие вертолетной площадки определено в Воздушном кодексе с упрощенной процедурой эксплуатации, однако если посадочная площадка эксплуатируется больше 30 дней в году, она становится объектом транспортной инфраструктуры и регламент по упрощению процедур уже не действует. В настоящее время вопрос упрощения требований к аэропортам с малой интенсивностью полетов решается в рамках поручения Правительства Российской Федерации от 05.12.2019 № МА-П9-10724 о проработке вопросов в отношении оптимизации требований к проектным решениям по строительству малых региональных аэропортов на труднодоступных территориях, оптимизации стоимости содержания объектов инфраструктуры аэропортов с малой интенсивностью полетов. На основании данного поручения разрабатываются проекты приказов Минтранса России «Об утверждении Федеральных авиационных правил "Требования авиационной безопасности к аэропортам"», «Об утверждении Правил проведения предполетного и послеполетного досмотра»<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Доклад «Об итогах работы Федерального агентства воздушного транспорта в 2020 году, основных задачах на 2021 год и среднесрочную перспективу» [Электронный ресурс] // Федеральное агентство воздушного транспорта Российской Федерации. URL: <https://favt.gov.ru/public/materials/1/7/0/9/7/170970c75541832932338f8fd4c2f59.pdf> (дата обращения: 27.10.2021).

Вторым обязательным элементом системы воздушного транспорта в Арктике является маршрутная сеть действующих авиакомпаний и стыковка рейсов между ними. Анализ маршрутной сети авиакомпаний восточной части российской Арктики показал, что маршрутная сеть авиакомпаний в каждом из рассматриваемых регионов обеспечивает лишь связь столицы региона с административными центрами арктических районов. При этом регулярные межрайонные авиаперевозки внутри регионов практически отсутствуют, как и межрегиональные перевозки между населенными пунктами арктической зоны. Незрелость маршрутной сети авиакомпаний обусловлена недостаточным уровнем платежеспособного спроса для открытия новых маршрутов и несогласованностью действий региональных авиаперевозчиков. Отсутствие спроса связано с чрезмерно высокой стоимостью авиаперевозок, что является следствием завышенных правовых требований к региональным и местным аэропортам, а также самим перевозчикам местного значения. Существенные ограничения на организацию местных авиаперевозок оказывают ФАП № 246, содержащие требования к коммерческим авиаперевозчикам и порядок их сертификации; ФАП № 128 «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации», которые регламентируют избыточные требования к наземному обслуживанию судов малой авиации, не выделяя их в отдельный тип воздушных судов, ФАП № 147, регламентирующие требования к членам экипажа ВС, специалистам по техническому обслуживанию ВС и сотрудникам по обеспечению полетов гражданской авиации.

Для решения проблемы связанности маршрутных сетей региональных авиакомпаний Правительством Российской Федерации было принято решение о создании на территории Сибири и Дальнего Востока единого авиаперевозчика в лице уже существующего АО «Авиакомпания «Аврора»<sup>5</sup>.

Третьей неотъемлемой составляющей системы воздушного транспорта в Арктике яв-

<sup>5</sup> Там же.

Таблица 2  
Table 2

Структура парка и возраст воздушных судов авиакомпании «Полярные авиалинии»<sup>\*</sup>  
Structure of the fleet and age of Polar Airlines aircraft

Тип воздушного судна	Количество в парке авиакомпании, шт.	Средний возраст, лет	Максимальное количество кресел, шт.
АН-24	12	35–40	48
АН-26	3	30–35	43
Л-410	5	20–25	19
Ми-8Т	9	30–35	22
Ми-8МТВ	16	5–10	22
АН-2	7	40–45	12
АН-3	6	10–15	9
Da-40	1	0–5	6
Рс-6	2	0–5	2
<b>Всего</b>	<b>61</b>	<b>X</b>	<b>X</b>

\* Годовой отчет АО «Авиакомпания «Полярные авиалинии» 2020 г. Якутск, 2021 г.

ляется действующий парк воздушных судов. Суровые природно-климатические условия, низкая плотность населения и рассеянность населенных пунктов на большой территории предъявляют особые требования к воздушным судам. С одной стороны, эксплуатируемые воздушные суда должны выдерживать воздействие низких температур и иметь сертификацию на эксплуатацию при температурах  $-60^{\circ}\text{C}$ . Сертификация воздушных судов для эксплуатации в таких условиях осложняется наличием большого количества электроники на борту, особенно чувствительной к низким температурам [23]. К отечественным воздушным судам, отвечающим этим требованиям, относятся: Ан-24, Ан-26, Ан-2, Ан-3, Ми-8. Кроме того, на Уральском заводе гражданской авиации организована сборка чешского самолета Л-410 «Тундра» и австрийского самолета Diamond DA-40. Однако эти суда находятся за гранью своего допустимого срока эксплуатации и требуют обновления. В табл. 2 приведены структура и средний возраст парка воздушных судов авиакомпании «Полярные авиалинии», обслуживающей территорию Республики Саха (Якутия).

Для решения проблемы обновления парка воздушных судов на региональных и местных перевозках в России разрабатываются новые

самолеты «Байкал» и ТВРС-44 (его название еще выбирается). Самолет «Байкал» будет иметь полезную нагрузку – 2 т, дальность полета – 1500 км, крейсерскую скорость – 300 км/ч. Для взлета ему требуется грунтовая взлетно-посадочная полоса длиной 250 метров. Таким образом, планируется, что данное воздушное судно сможет полностью заменить самолеты Ан-2. Предполагается, что самолет ТВРС-44 будет иметь взлетную массу 17 500 кг, максимальную крейсерскую скорость – 510 км/ч, дальность полета – 1250 км, пассажироместимость 40–44 чел. Требуемая длина ВПП составит 1 300 м. Этот самолет сможет заменить выбывающие из эксплуатации ВС Ан-24 и Ан-26. Однако проведение летных испытаний и сертификация займут еще не один год. Серийное производство самолета «Байкал» планируется запустить в 2024 г., а самолета ТВРС-44 – в 2025 г.

С другой стороны, низкая плотность населения и его дисперсионное расселение для организации экономически целесообразного регулярного авиасообщения с малонаселенными пунктами требует наличия судов малой вместимости, которые в зарубежной практике называются воздушными судами малой авиации. Под малой авиацией понимается сегмент региональных и местных авиаперевозок, экс-

платящий самолеты взлетной массой до 5,7 тонны или вертолеты до 3,1 тонны. Среди воздушных судов российского производства это Ан-2 и Ан-28, канадский Twin Otter, американский Cessna 208, вертолет Ми-2. Только 20 коммерческих эксплуатантов в России имеют в своем парке какие-либо из этих судов. Например, авиакомпания «Полярные авиалинии», обслуживающая 96 % внутриулусных (местных) социально значимых авиаперевозок в своем составе имеет семь судов Ан-2 и шесть судов Ан-3. Местные авиаперевозки осуществляются преимущественно вертолетами Ми-8, которых в парке авиакомпании насчитывается 25 шт. Из-за завышенных правовых требований к коммерческим эксплуатантам судов малой авиации их количество в России постоянно сокращается, что приводит к наличию неудовлетворенного спроса на местные авиаперевозки. По данным Федерации авиации общего назначения в российский парк самолетов малой авиации насчитывает 7 500 судов, в то время как в ЕС он составляет 110 000, а в США – 221 743 [18]. В США в расчете на 100 000 человек приходится 76,5 судов малой авиации, в России – только 3,1 самолета. По оценкам специалистов, потребность российской Арктики в судах малой авиации, вертолетах и региональных самолетах составляет от 1 000 до 3 000 единиц. Потребность в самолетах «Байкал», которые должны заменить устаревшие суда Ан-2, на период до 2030 г. руководство уральского авиационного завода оценивает в 500–650 судов.

В Российском законодательстве есть понятие «авиация общего назначения», к деятельности которой предъявляются более мягкие требования, чем к деятельности коммерческой авиаперевозки на основе специально разработанных Федеральных авиационных правил: ФАП 147 определяют требования к эксплуатантам авиации общего назначения и порядок их сертификации; ФАП 118 – допуск к эксплуатации единичных ВС АОН; ФАП 29 – требования по авиационной безопасности к эксплуатантам АОН. Однако авиация общего назначения запрещена коммерческая перевозка людей и грузов. 1 янва-

ря 2021 г. вступили в силу ФАП-429, которые определяют перечень девяти видов работ, разрешенных для выполнения авиации общего назначения. Среди них выделены транспортно-связанные работы, которые включают транспортировку персонала и груза заказчика авиационной работы. Однако этот пункт имеет множество нерешенных ограничений.

Отсутствие специальных ФАПов, регламентирующих деятельность коммерческих эксплуатантов судов малой авиации, приводит к сокращению их числа и наличию неудовлетворенного спроса на местные авиаперевозки. В США легкомоторные воздушные суда перевозят 120 000 000–165 000 000 пассажиров в год. В России, по данным Росавиации, объем местных авиаперевозок составляет около 1,97 млн пассажиров в год.

Результатом столь жестких правовых требований к коммерческим эксплуатантам судов малой авиации становится тот факт, что эксплуатанты авиации общего назначения или частные предприниматели начинают незаконно выполнять услуги коммерческой перевозки, так как их затраты существенно ниже затрат коммерческих авиаперевозчиков [24]. На наш взгляд, необходимо малой авиации предоставить разрешение осуществлять коммерческую перевозку пассажиров с упрощенной процедурой сертификации и самой перевозки, но для этого необходимо введение термина малой авиации в Воздушный кодекс РФ. По словам зампреда Комитета Совета Федерации по конституционному законодательству и государственному строительству Максима Кавджарадзе, «если регион становится труднодоступен даже для малой авиации, он закрывается для экономического развития, начинается неконтролируемая депопуляция». В Якутии по сравнению с 1989 г. авиационная подвижность населения на региональных маршрутах сократилась в 5 раз, а на внутриулусных – в 25 раз, что говорит о крайне недостаточном обеспечении региона услугами воздушного транспорта и о проблемах состояния его сети.

В США данная проблема решена за счет разграничения документов, регламентирующих деятельность коммерческих магистраль-

ных авиаперевозок и коммерческих перевозок малой авиации [23]. Кроме того, сертификация коммерческих перевозчиков малой авиации также имеет градацию в зависимости от вида и объема осуществляемых перевозок. АОН в США имеет право осуществлять коммерческие перевозки. Базирование малой авиации осуществляется на частных вертолетных площадках и корпоративных аэродромах, не получающих субсидии от государства. В России готовится проект ФАП, регламентирующий требования к коммерческим авиаперевозчикам, эксплуатирующим суда малой авиации. Согласно проекту данного документа, сократится количество обязательных руководящих должностей на предприятиях малой авиации с семи до трех. Обязательным останется наличие в штате директора по управлению безопасностью полетов, директора по реализации системы управления качеством и генерального директора. Новые правила предполагают сокращение плановых проверок для малых авиакомпаний. Например, для объектов аэродромной инфраструктуры планируется сократить количество проверок в год до одной вместо существующих четырех [25].

Серьезной проблемой в развитии авиационных перевозок на севере является отсутствие достаточного притока квалифицированных специалистов, в особенности летного персонала. Средний возраст действующих пилотов региональных авиакомпаний составляет более 50 лет. Решение данной проблемы требует разработки программ привлечения молодых специалистов в Арктические регионы путем создания благоприятных условий работы и проживания [26–27].

Еще одним важным элементом системы воздушных перевозок является техническая и технологическая инфраструктура для организации и обслуживания полетов. Серьезной проблемой арктических аэропортов является организация системы аэронавигационного обслуживания, отсутствие современного оснащения свето- и радиотехнического оборудования, облегчающего полеты во время полярной ночи, неудовлетворительное состояние топливозаправочных комплексов. Важ-

ной задачей в организации аэронавигационного обслуживания Арктики является потребность повышения точности навигации, снижение метеоминимумов за счет перехода к спутниковым технологиям навигации. В настоящее время готовятся изменения в Федеральных авиационных правилах, которые позволят использовать средства удаленного видеонаблюдения для управления воздушным движением.

Состояние всех вышеперечисленных элементов системы воздушного транспорта российской Арктики определяет ценовую и физическую доступность авиаперевозок для населения. Опросы местного населения поселений арктических районов Республики Саха (Якутия) показали, что из-за высокой стоимости билетов на воздушный транспорт данная услуга становится недоступной для местного населения. Например, стоимость перелета из Москвы в Якутск на расстояние 4 883 км в среднем составляет 17 500 руб. А стоимость внутриулусного перелета из Якутска в Чокурдах на расстояние 1 245 км в среднем составляет 30 000 руб. Стоимость перелета из Якутска в Тикси составляет около 27 000 руб. Такая стоимость местных авиационных перевозок обусловлена высокой стоимостью авиационного топлива вследствие высоких затрат на его доставку, низкой топливной эффективностью эксплуатируемых воздушных судов, высокой стоимостью поддержания летной годности в связи со стоимостью и логистическими проблемами поставки запасных частей [28].

Регулярная маршрутная сеть авиакомпании «Полярные авиалинии», обслуживающей местные пассажирские перевозки в Республике Саха (Якутия), соединяет только административные районные центры со столицей республики. Прямое регулярное авиационное сообщение между арктическими улусами республики не осуществляется. Высокая стоимость перелета и ограниченность маршрутной сети приводит к снижению спроса на авиаперевозки со стороны местного населения. Снижение спроса на авиаперевозки приводит к недозагрузке рейсов и потере прибыли авиакомпаний, которые в свою очередь

Таблица 3  
Table 3

Целевые показатели развития системы воздушного транспорта Арктической зоны России\*  
Targets for the development of the air transport system in the Arctic zone of Russia

Элемент системы воздушного транспорта	Наименование мероприятия	Целевые показатели	Ожидаемый результат
Аэропортовая сеть	Снижение требований к авиационной безопасности для аэропортов с малой интенсивностью полетов и упрощение авиационных правил, регламентирующих их деятельность	Сокращение затрат на содержание аэропортов в Арктической зоне	Увеличение количества аэропортов
		Сокращение аэропортовых сборов	Сокращение стоимости перелета
	Строительство и реконструкция аэропортов и взлетно-посадочных площадок в населенных пунктах, которые не покрываются зоной притяжения действующих аэропортов в АЗ	Увеличение количества аэропортов в АЗ и обеспечение для каждого населенного пункта доступности аэропорта в радиусе не более 150 км	Повышение транспортной доступности населенных пунктов АЗ, находящихся за пределами зоны притяжения действующих аэропортов
Парк воздушных судов	Производство отечественных ВС требуемых типов и в необходимом количестве для обновления парка авиакомпаний	Сокращение среднего возраста ВС в парке авиакомпаний Арктической зоны до 5–10 лет	Сокращение затрат на ремонт и эксплуатацию устаревших типов ВС
	Упрощение порядка получения сертификата типа на легкое и сверхлегкое ВС, его двигатель и воздушный винт	Сертификация новых легких и сверхлегких типов ВС	Производство отечественных легких и сверхлегких ВС
	Упрощение требований к коммерческим эксплуатантам судов малой авиации	Увеличение коммерческих эксплуатантов судов малой авиации в АЗ	Увеличение предложений на перевозку пассажиров в АЗ и снижение стоимости перевозки
Маршрутная сеть	Открытие новых прямых социально-значимых маршрутов между населенными пунктами АЗ	Снижение количества стыковок на востребованных социально значимых маршрутах	Повышение уровня транспортной доступности населенных пунктов АЗ
		Снижение стоимости перевозки между востребованными пунктами отправления и назначения	

сокращают количество регулярных рейсов и увеличивают стоимость билетов. В результате ценовая доступность услуги перевозки уменьшается и увеличивается время ожидания перевозки, сокращая ее физическую доступность. Эти особенности оценки транспортной доступности территорий страны были отмечены в работах П.А. Лавриненко [29].

Для оценки полноты и степени воздействия предложенных мероприятий на систему воздушного транспорта Арктической зоны России и повышение ее транспортной доступности необходима разработка целевых показателей, на достижение которых будет направлена их реализация. Мы разработали возможный перечень плановых целевых по-



Продолжение таблицы 3  
Continuation of Table 3

Элемент системы воздушного транспорта	Наименование мероприятия	Целевые показатели	Ожидаемый результат
Расписание полетов	Составление расписания полетов, направленных на минимизацию стыковочного времени при организации межрайонных перевозок через столицу региона	Сокращение стоимости и времени, затрачиваемого на перелет	Повышение уровня транспортной доступности населенных пунктов АЗ
Кадровый состав	Разработка программ привлечения молодых специалистов (пилотов и техников) в авиакомпании и авиапредприятия АЗ	Сокращение среднего возраста пилотов региональных авиакомпаний до 40 лет	Решение проблемы дефицита кадров региональных авиакомпаний
Организация воздушного движения и аэронавигационного обслуживания	Оснащение аэропортов (аэродромов) АЗ средствами аэронавигационного обслуживания полетов, радио- и светотехническим оборудованием	Повышение точности навигации, снижение метеоминимумов для разрешения полетов, облегчение полетов в условиях полярной ночи	Сокращение вероятности отмены рейсов из-за природно-климатических условий

\* Собственная разработка автора.

казателей для каждого элемента системы воздушного транспорта Арктической зоны с учетом предложенных нами мероприятий, который представлен в табл. 3.

## Заключение

На основании проведенного исследования можно выделить несколько необходимых направлений развития малой авиации для обеспечения потребностей Арктических регионов России.

Во-первых, упрощение Федеральных авиационных правил, регламентирующих деятельность авиапредприятий, обеспечивающих функционирование подсистемы малой авиации (разработка упрощенных требований к обеспечению безопасности и сертификации аэродромов с малой интенсивностью полетов, разработка упрощенных требований к коммерческим авиаперевозчикам, эксплуатирующим суда малой авиации). Опыт зарубежных стран показывает, что малая авиация

может стать значительным источником дохода для регионов при условии снижения затрат на ее содержание. Опыт Аляски и Северной Канады доказывает возможность обеспечения нормальной транспортной доступности арктических населенных пунктов за счет развитой подсистемы малой авиации.

Во-вторых, развитие производства воздушных судов малой авиации позволит заменить эксплуатацию экономически дорогих вертолетов МИ-8, стоимость летного часа которого в арктических условиях обходится в 500 000–600 000 руб. легкими воздушными судами со стоимостью летного часа в 60 000–80 000 руб. для организации местных пассажирских перевозок и выполнения большого спектра авиационных работ. Для разработки плана производства отечественных судов малой авиации необходимо рассчитать потребность и вместимость воздушных судов данного класса.

Третьим направлением развития малой авиации в Арктике является расширение действующей аэропортовой сети за счет восста-

новления нефункционирующих взлетно-посадочных полос советского периода, позволяющих принимать легкие воздушные суда небольшой вместимости. Опыт США и Канады также доказывает возможность нормальной эксплуатации грунтовых взлетно-посадочных полос для обслуживания легких воздушных судов.

Четвертым направлением является расширение маршрутной сети авиакомпаний, которая будет включать наиболее востребованные направления внутри региональных и межрегиональных перевозок. Для реализации данного направления необходимо проведение глубокого исследования спроса населения арктических поселений на авиационные маршруты перевозки.

Пятым направлением развития малой авиации является совершенствование системы аэронавигационного и метеорологического обслуживания полетов гражданской авиации в арктических регионах. В качестве альтернативы государственного финансирования малой авиации в Арктике по опыту США может быть создан фонд, в который добывающие компании, функционирующие на этих территориях, будут отчислять часть своей прибыли. Данные средства могут быть направлены на покрытие аэропортовых сборов за обслуживание воздушных судов. Использование опыта США и Канады позволит увеличить привлекательность малой авиации для бизнеса и повысить транспортную доступность российской Арктики.

## Список литературы

1. **Киселенко А.Н.** О развитии транспортной системы Европейского Севера России // Региональная экономика: теория и практика. 2014. № 11 (338). С. 2–11.
2. **Киселенко А.Н., Малащук П.А., Фомина И.В.** Исследование транспортной доступности европейского и приуральского севера России на основе модифицированного показателя Энгеля // Региональная экономика: теория и практика. 2019. Т. 17, № 9 (468). С. 1668–1680. DOI: 10.24891/re.17.9.1668
3. **Киселенко А.Н.** Прогнозные ориентиры развития транспортных подходов к западной части арктической транспортной системы / А.Н. Киселенко, П.А. Малащук, Е.Ю. Сундуков, И.В. Фомина // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2019. № 3 (65). С. 63–73. DOI: 10.25702/KSC.2220-802X.2019.65.3.63-73
4. **Karpechko V.A.** Water transport and energetic of north European part of Russia (a review) / V.A. Karpechko, A.V. Litvinenko, M.S. Bogdanova, N.N. Filatov // Arctic: Ecology and Economy. 2017. № 1 (25). 75–85. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-1-75-85
5. **Золотокрылин А.Н. и др.** Природно-климатические условия и социально-географическое пространство России / ред. А.Н. Золотокрылин, В.В. Виноградова, О.Б. Глезер. М.: Институт географии РАН, 2018. 154 с. DOI: 10.15356/ncsgsrus
6. **Неретин А.С.** Транспортная связанность и освоенность Восточных регионов России / А.С. Неретин, М.В. Зотова, А.И. Ломакина, С.А. Тархов // Известия РАН. Серия Географическая. 2019. № 6. С. 35–52. DOI: 10.31857/S2587-55662019635-52
7. **Tatarkin A.I., Loginov V.G., Zakhar-chuk E.A.** Socioeconomic problems in development of the Russian Arctic zone // Herald of the Russian Academy of Sciences. 2017. Vol. 87 (1). Pp. 12–21. DOI: 10.1134/S101933161701004X
8. **Ayele Y.Z., Barabadi A., Barabady J.** Dynamic spare parts transportation model for Arctic production facility // International Journal of System Assurance Engineering and Management. 2016. Vol. 7 (1). Pp. 84–98. DOI: 10.1007/s13198-015-0379-x
9. **Baker D., Merkert R., Kamruzzaman M.** Regional aviation and economic growth: cointegration and causality analysis in Australia // Journal of Transport Geography. 2015. Vol. 43. Pp. 140–150. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2015.02.001
10. **Button K.J., Doh S., Yuan J.** The role of small airports in economic development // Journal of airport management. 2010. Vol. 4, no. 2. Pp. 125–136.
11. **Фаузер В.В.** Демографический потенциал северных регионов России – фактор

и условие экономического освоения Арктики // Экономика региона. 2014. № 4 (40). С. 69–81. DOI: 10.17059/2014-4-5

**12. Fiser A.** Report on infrastructure for development in Canada's North. Aboriginal affairs and northern development Canada, Canadian high Arctic research station. The Conference Board of Canada, Ottawa, 2015. 79 p.

**13. Fiser A., Fournier S.** Study on Addressing the Infrastructure Needs of Northern Aboriginal Communities. The Conference Board of Canada, Ottawa, 2014. 94 p.

**14. Widener M.J., Saxe S., Galloway T.** The relationship between airport infrastructure and flight arrivals in remote northern Canadian communities // Arctic. 2017. Vol. 70, no. 3. Pp. 249–258. DOI: 10.14430/arctic4663

**15. Poleshkina I.O., Gorbunov V.P.** Development of the air transport network in the Arctic zone of Eastern Siberia // Transportation Research Procedia. 2021. Vol. 57. Pp. 443–451. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.09.071

**16. Соболев Л.Б.** Большая миссия малой авиации // Экономический анализ: теория и практика. 2016. № 3 (450). С. 4–16.

**17. Дарбасов В.Р., Охлопков Н.М., Федорова Е.Я.** Анализ и оценка продовольственного рынка Республики Саха (Якутия) // Региональная экономика: теория и практика. 2021. Т. 19, № 4 (487). С. 755–777. DOI: 10.24891/re.19.4.755

**18. Мельник Г.** Пилотам-частникам разрешили возить грузы и отстреливать волков [Электронный ресурс] // Парламентская газета. Издание Федерального Собрания Российской Федерации. URL: <https://www.pnp.ru/economics/pilotam-chastnikam-razreshili-voztit-gruzu-i-otstrelivat-volkov.html> (дата обращения: 16.01.2021).

**19. Просвирина Н.В.** Анализ проблем малой авиации в России и возможные пути их решения // Естественно-гуманитарные исследования. 2020. № 28 (2). С. 232–238. DOI: 10.24411/2309-4788-2020-10107

**20. Холдин Р.С., Фарафонтова Е.Л.** Большие правовые проблемы малой Российской авиации // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2010. Т. 2, № 6. С. 350–352.

**21. Туров Н.А.** Перспективы развития малого и среднего предпринимательства в гражданской авиации // Транспортное дело России. 2017. № 1. С. 100–105.

**22. Дикань Н.С., Туманик Г.Н.** Общественный статус малой авиации в системе современной Новосибирской агломерации // Творчество и современность. 2020. № 1 (12). С. 163–170.

**23. Gorbunov V.** Methodological aspects of avionics reliability at low temperatures during aircraft operation in the Far North and the Arctic / V. Gorbunov, S. Kuznetsov, A. Savvina, I. Poleshkina // Transportation Research Procedia. 2021. Vol. 57. Pp. 220–229. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.09.045

**24. Бирюков П.А.** Проблемы и ограничения государственного регулирования на примере авиации общего назначения в России // Бизнес. Общество. Власть. 2018. № 1 (27). С. 179–196.

**25. Лукьянова А., Кузьмина В.** Минтранс хочет упростить требования к малой авиации [Электронный ресурс] // Ведомости. 2021. URL: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2021/05/12/869467-uprostit-aviatsii> (дата обращения: 10.01.2022).

**26. Große C.** Airports as critical infrastructure: The role of the transportation-by-air system for regional development and crisis management // 2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Macao, China, 2019. Pp. 440–444. DOI: 10.1109/IEEM44572.2019.8978905

**27. Biosca O., Spiekermann K., Stepniak M.** Transport accessibility at regional scale // Europa XXI. 2013. Vol. 24. Pp. 5–17. DOI: 10.7163/Eu21.2013.24.1

**28. Волосов Е.Н.** Региональная авиация Сибири и Дальнего Востока // Проблемы социально-экономического развития Сибири. 2016. № 4 (26). С. 60–68.

**29. Лавриненко П.А.** Транспортная доступность как индикатор развития региона / П.А. Лавриненко, А.А. Ромашина, П.С. Степанов, П.А. Чистяков // Проблемы прогнозирования. 2019. № 6 (177). С. 136–146.

## References

1. **Kiselenko, A.N.** (2014). *On development of the transport system of the European North of Russia*. Regional Economics: Theory and Practice, no. 11 (338), pp. 2–11. (in Russian)
2. **Kisilenko, A.N., Malashchuk, P.A. & Fomina, I.V.** (2019). *Studying the transport accessibility of the European and Cis-Ural regions in the North of Russia based on a modified Engel's coefficient*. Regional Economics: Theory and Practice, vol. 17, no. 9 (468), pp. 1668–1680. DOI: 10.24891/re.17.9.1668 (in Russian)
3. **Kiselenko, A.N., Malashchuk, P.A., Sundukov, E.Yu. & Fomina, I.V.** (2019). *Forecasts of development of transport approaches to the west part of Arctic transport system*. The North and the Market: Forming the Economic Order, no. 3 (65), pp. 63–73. DOI: 10.25702/KSC.2220-802X.2019.65.3.63-73 (in Russian)
4. **Karpechko, V.A., Litvinenko, A.V., Bogdanova, M.S. & Filatov, N.N.** (2017). *Water transport and energetic of north European part of Russia (a review)*. Arctic: Ecology and Economy, no. 1 (25), pp. 75–85. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-1-75-85
5. **Zolotokrylin, A.N. et al.** (2018). *Natural and climatic conditions and socio-geographical space of Russia*, in Zolotokrylin A.N., Vinogradova V.V., Glaser O.B. (Ed.). Moscow: Institut geografii RAN, 154 p. DOI: 10.15356/ncsgsrus (in Russian)
6. **Neretin, A.S., Zotova, M.V., Lomakina A.I. & Tarkhov, S.A.** (2019). *Transport connection and development of the eastern regions of Russia*. Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya, vol. 6, pp. 35–52. DOI: 10.31857/S2587-55662019635-52 (in Russian)
7. **Tatarkin, A.I., Loginov, V.G. & Zakharchuk E.A.** (2017). *Socioeconomic problems in development of the Russian Arctic zone*. Herald of the Russian Academy of Sciences, vol. 87 (1), pp. 12–21. DOI: 10.1134/S101933161701004X
8. **Ayele, Y.Z., Barabadi, A. & Barabady, J.** (2016). *Dynamic spare parts transportation model for Arctic production facility*. International Journal of System Assurance Engineering and Management, vol. 7 (1), pp. 84–98. DOI: 10.1007/s13198-015-0379-x
9. **Baker, D., Merkert, R. & Kamruzaman, M.** (2015). *Regional aviation and economic growth: cointegration and causality analysis in Australia*. Journal of Transport Geography, vol. 43, pp. 140–150. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2015.02.001
10. **Button, K.J., Doh, S. & Yuan, J.** (2010). *The role of small airports in economic development*. Journal of airport management, vol. 4, no. 2, pp. 125–136.
11. **Fauzer, V.V.** (2014). *Demographic potential of the Russia's northern regions as a factor and condition of economic development of the Arctic*. Economy of Region, no. 4 (40), pp. 69–81. DOI: 10.17059/2014-4-5 (in Russian)
12. **Fiser, A.** (2015). *Report on Infrastructure for Development in Canada's North*. Aboriginal Affairs and Northern Development Canada, Canadian High Arctic Research Station. The Conference Board of Canada, Ottawa, 79 p.
13. **Fiser, A. & Fournier, S.** (2014). *Study on Addressing the Infrastructure Needs of Northern Aboriginal Communities*. The Conference Board of Canada, Ottawa, 94 p.
14. **Widener, M.J., Saxe, S. & Galloway, T.** (2017) *The relationship between airport infrastructure and flight arrivals in remote northern Canadian communities*. Arctic, vol. 70, no. 3, pp. 249–258. DOI: 10.14430/arctic4663
15. **Poleshkina, I.O. & Gorbunov, V.P.** (2021). *Development of the air transport network in the Arctic zone of Eastern Siberia*. Transportation Research Procedia, vol. 57, pp. 443–451. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.09.071
16. **Sobolev, L.B.** (2016). *A high mission of general aviation*. Economic Analysis: Theory and Practice, no. 3 (450), pp. 4–16. (in Russian)
17. **Darbasov, V.R., Okhlopkov, M.N. & Fedorova, E.Ya.** (2021). *Analysis and evaluation of the food market of the Republic of Sakha (Yakutia)*. Regional Economics: Theory and Practice, vol. 19, no. 4 (487), pp. 755–777. DOI: 10.24891/re.19.4.755 (in Russian)
18. **Melnik, G.** (2021). *Private pilots were allowed to carry cargo and shoot wolves*. Parliament newspaper. Available at:

<https://www.pnp.ru/economics/pilotam-chastnikam-razreshili-vozit-gruzy-i-otstrelivat-volkov.html> (accessed: 16.01.2021). (in Russian)

19. **Prosvirina, N.V.** (2020). *Analysis of small aviation problems in Russia and possible ways of their solution*. Natural humanitarian studies, no. 28 (2), pp. 232–238. DOI: 10.24411/2309-4788-2020-10107 (in Russian)

20. **Holdin, R.S. & Farafontova, E.L.** (2010). *Great legal problems of Russian general aviation*. Aktualnyye problemy aviatsii i kosmonavтики, vol. 2, no. 6, pp. 350–352. (in Russian)

21. **Turov, N.A.** (2017). *Prospects for the development of small and medium-sized businesses in civil aviation*. Transport business of Russia, no. 1, pp. 100–105. (in Russian)

22. **Dikan, N.S. & Tumanik, G.N.** (2020). *Public status of small aviation in the system of current Novosibirsk agglomeration*. Tvorchestvo i sovremennost, no. 1 (12), pp. 163–170. (in Russian)

23. **Gorbunov, V., Kuznetsov, S., Savvina, A. & Poleshkina, I.** (2021). *Methodological aspects of avionics reliability at low temperatures during aircraft operation in the Far North and the Arctic*. Transportation Research Procedia, vol. 57, pp. 220–229. DOI: 10.1016/j.trpro.2021.09.045

24. **Biryukova, P.A.** (2018). *Problems and limitations of government regulation by the ex-*

*ample of the general aviation in Russia*. Business. Society. Power, no. 1 (27), pp. 179–196. (in Russian)

25. **Lukyanova, A. & Kuzmina, V.** (2021). *The Ministry of Transport wants to simplify the requirements for general aviation*. Vedomosti. Available at: <https://www.vedomosti.ru/business/articles/2021/05/12/869467-uprostit-aviatsii> (accessed: 10.01.2022). (in Russian)

26. **Große, C.** (2019). *Airports as critical infrastructure: The role of the transportation-by-air system for regional development and crisis management*. 2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Macao, China, pp. 440–444. DOI: 10.1109/IEEM44572.2019.8978905

27. **Biosca, O., Spiekermann, K. & Stepniak, M.** (2013). *Transport accessibility at regional scale*. Europa XXI, vol. 24, pp. 5–17. DOI:10.7163/Eu21.2013.24.1

28. **Volosov, E.N.** (2016). *Regional aviation on Siberia and Far East: challenges and opportunities*. Issues of Social-Economic Development of Siberia, no. 4 (26), pp. 60–68. (in Russian)

29. **Lavrinenko, P.A., Romashina, A.A., Stepanov, P.S. & Chistyakov, P.A.** (2019). *Transport accessibility as an indicator of regional development*. Studies on Russian Economic Development, vol. 30, no. 6, pp. 694–701. DOI: 10.1134/S1075700719060091

## Сведения об авторе

**Полешкина Ирина Олеговна**, доцент, кандидат экономических наук, старший научный сотрудник отдела научных исследований МГТУ ГА, [i.poleshkina@mstuca.aero](mailto:i.poleshkina@mstuca.aero).

## Information about the author

**Irina O. Poleshkina**, Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Senior Researcher in the Scientific Research Department, Moscow State Technical University of Civil Aviation, [i.poleshkina@mstuca.aero](mailto:i.poleshkina@mstuca.aero).

Поступила в редакцию 23.01.2022  
Принята в печать 24.03.2022

Received 23.01.2022  
Accepted for publication 24.03.2022

**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 629.7.016:533.68

DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-70-80

## **Impact of the atmosphere state on interaction of aircraft vortex and condensation trails**

**A.I. Zhelannikov<sup>1</sup>, A.N. Zamyatin<sup>2</sup>, Yu.M. Chinyuchin<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovsky, Russia*

<sup>2</sup>*Gromov Flight Research Institute, Zhukovsky, Russia*

<sup>3</sup>*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

**Abstract:** Currently, much emphasis is given to the environmental problems. This article is not an exception. It is devoted to the issue of propagation and interaction of vortex and condensation trails that form behind aircraft when flying in the atmosphere, depending on its state. A vortex trail is an area of disturbed air flow behind an aircraft formed as a result of its motion. A condensation trail is a product of the aviation fuel combustion in the engine and represents condensed moisture in the form of ice crystals, which is generated under certain ambient conditions. As the numerous studies and observations have shown, condensation trails can affect the heat exchange processes in the atmosphere, contributing to the greenhouse effect, deteriorate the environment. It is especially relevant for the area where numerous transitional airways pass. Therefore, it is essential to understand behind what aircraft type the condensation trail, interacting with the vortex one, dissipates in the atmosphere, and the substances composing the condensation trail lose their concentration. And on the contrary, behind what aircraft type the condensation trail does not dissipate for a long term, and the substances, composing the contrail, retain concentration for a long time. It should also be noted that the contrail, while interacting with the vortex wake, can reveal its structure and visualize the processes of propagation and attenuation of the vortex wake. This paper uses a special computational software application, based on the discrete vortex method, to study the interaction of condensation and vortex trails. It considers the flight weight, aircraft speed and altitude, its in-flight configuration, atmospheric conditions, axial velocity in the vortex core and some other factors, when calculating the vortex wake performance. This complex passed the required testing and state registration. Several procedures were executed to validate and verify the developed complex, confirming its program efficiency and the reliability of the results obtained. The Airbus A320 and A380 were selected as the research object of this article. The flight mode and atmospheric conditions are similar for all aircraft. The results obtained allow us to understand how atmospheric conditions affect the propagation of contrails behind aircraft of different classes, provided their interaction with vortex trails.

**Key words:** ecology, condensation trail, vortex wake, aircraft, interaction of trails, concentration.

**For citation:** Zhelannikov, A.I., Zamyatin, A.N. & Chinyuchin, Yu.M. (2022). Impact of the atmosphere state on interaction of aircraft vortex and condensation trails. Civil Aviation High Technologies, vol. 25, no. 2, pp. 70–80. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-70-80

## Влияние состояния атмосферы на взаимодействие вихревых и конденсационных следов воздушных судов

А.И. Желанников<sup>1</sup>, А.Н. Замятин<sup>2</sup>, Ю.М. Чинючин<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Центральный аэрогидродинамический институт имени проф. Н.Е. Жуковского,  
г. Жуковский, Россия

<sup>2</sup>Летно-испытательный институт имени М.М. Громова, г. Жуковский, Россия

<sup>3</sup>Московский государственный технический университет гражданской авиации,  
г. Москва, Россия

**Аннотация:** В настоящее время много внимания уделяется экологическим проблемам. Данная работа не исключение. Она посвящена проблеме распространения и взаимодействия вихревых и конденсационных следов, образующихся за воздушными судами при полете в атмосфере в зависимости от ее состояния. Вихревой след – это область возмущенного воздушного потока за самолетом, образующаяся в результате его движения. Конденсационный след является продуктом сгорания авиационного топлива в двигателе и представляет собой сконденсированную влагу в виде ледяных кристаллов, которая образуется при определенных состояниях атмосферы. Как показали многочисленные исследования и наблюдения, конденсационные следы могут влиять на теплообменные процессы в атмосфере и, способствуя парниковому эффекту, ухудшать экологию. Особенно это актуально для местности, где проходят многочисленные воздушные транзитные трассы воздушных судов. Поэтому важно понимать, за какими воздушными судами конденсационный след, взаимодействуя с вихревым, рассеивается в атмосфере, а вещества, входящие в состав конденсационного следа, теряют свою концентрацию. И, наоборот, за какими воздушными судами конденсационный след долго не рассеивается, а вещества, входящие в состав конденсационного следа, длительное время сохраняют концентрацию. Отметим также, что конденсационный след, взаимодействуя с вихревым следом, может выявлять его структуру, а также визуализировать процессы распространения и затухания вихревого следа. В данной статье для исследования взаимодействия конденсационных и вихревых следов был использован специальный расчетно-программный комплекс, базирующийся на методе дискретных вихрей. В нем при расчете характеристик вихревого следа учитываются полетный вес, скорость и высота полета самолета, его полетная конфигурация, атмосферные условия, осевая скорость в ядре вихря и некоторые другие факторы. Этот комплекс прошел необходимую апробацию и государственную регистрацию. Был выполнен ряд мероприятий по валидации и верификации разработанного комплекса, подтверждающих работоспособность программ, входящих в него, и достоверность получаемых результатов. В данной статье в качестве объектов исследования были выбраны воздушные суда А-320 и А-380. Режим полета и атмосферные условия для всех самолетов выбраны одни и те же. Получены результаты, которые позволяют понять, как влияют атмосферные условия на распространение конденсационных следов за воздушными судами разного класса при условии их взаимодействия с вихревыми следами.

**Ключевые слова:** экология, конденсационный след, вихревой след, воздушное судно, взаимодействие следов, концентрация.

**Для цитирования:** Желанников А.И., Замятин А.Н., Чинючин Ю.М. Влияние состояния атмосферы на взаимодействие вихревых и конденсационных следов воздушных судов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25, № 2. С. 70-80. DOI: 10.26467/2079-0619-2022-25-2-70-80

### Introduction

It is known that under certain flight conditions, a contrail is formed behind flying aircraft (fig. 1). When aviation fuel combusts in the engine at the outlet of the nozzle, there is water vapor among other combustion products. Under certain atmospheric conditions, this water vapor together with atmospheric moisture condense in the form of drops and ice crystals and become visible [1–4]. As the numerous studies and ob-

servations have shown, contrails degenerate into thin cirri high-altitude clouds as time progresses and can affect the Earth's climate, as well as the heat exchange processes in the atmosphere, contributing to the greenhouse effect and deteriorating ecology. This is especially relevant for the areas with intensive air traffic, where numerous airways pass. At present, various methods to reduce or even eliminate the contrail are being developed. For example, if ultra-low sulfur fuel is used, it is claimed by the authors that the contrail can be almost fully eliminated (US Applica-



**Fig. 1.** Example of a condensation trail behind an airplane

tion No. 12/614,640 dated November 9, 2009). The options for changing the altitude and flight route are also considered, but these alternatives can lead to an increase in flight time, which means additional carbon dioxide emission [2, 3]. A local increase in carbon dioxide can result in acid rain [1–4]. Several works [5–7] study aircraft vortex and contrails. This research has shown that contrails behind aircraft of modern aerodynamic configuration of the Airbus A320 and A380 types are drawn into wake vortices and their further propagation in the atmosphere depends on a variety of factors. Among these factors we can mention the flight speed and altitude, aerodynamic configuration of the aircraft, its flight configuration, as well as the atmospheric conditions in which a flight operates [8–14]. The paper [1] shows that some aircraft aerodynamic configuration can have a favorable effect on contrail propagation, in terms of its dispersion in the atmosphere. The engines of these aircraft are located short of the wingtip, which means that tip vortices releasing the wing, capture the contrail and disperse it partially or completely,

thus reducing the negative impact of the contrail on the environment.

On the other hand, if the contrail is not drawn into the wake vortex, and there are such aircraft aerodynamic configurations, its propagation in the atmosphere will occur according to the physical principles. In the non-turbulent atmosphere, the contrail can remain long, but in the turbulent atmosphere it can do considerably shorter [1].

This article explores the process of contrail propagation under the conditions of its interaction with wake vortex. The wake vortex effect on the contrail is prioritized but not atmospheric turbulence. It is common knowledge that [12–18], the atmospheric turbulence effect is by an order of magnitude weaker than wake vortex. Wake vortex propagation, in its turn, depends significantly on the ambient conditions [5].

It is known [2, 3, 5] that the ambient conditions can vary from highly stable to highly unstable, depending on the turbulent processes occurring in the meteorological atmosphere. This article carries out the study of the various atmospheric conditions effect on contrail propagation in the conditions of its interaction with wake vortex.

## Methodology of the research

The studies on the interaction and propagation of vortex and condensation trails were carried out using the computational software application [15] which basics and ideas are described in the monographs [5–18] and articles [19–23].

The foundation of the computational software application is a mathematical model of the long-range wake vortex [5], in which speeds disturbed by aircraft are obtained, based on an accurate solution of the Helmholtz equation [17]. This allowed us to consider the dissipation and diffusion of vortices, modeling wake vortex. These phenomena are associated with the natural process of vortices attenuation in the meteorological atmosphere. The contrail was modeled in the following way: eight markers, which simulated the contrail boundary, were located around the nozzle contour of each engine. Another marker was placed in the center of the nozzle.



Таблица 1  
Table 1

Assessment of ambient conditions

Richardson number $Ri$	Ambient condition (AC)	Estimates
$Ri < -1.0$	Highly unstable	5
$-0.01 > Ri \geq -1.0$	Unstable	4
$0.01 \geq Ri \geq -0.01$	Neutral	3
$2.5 \geq Ri > 0.01$	Steady	2
$Ri > 0.25$	Highly stable	1

The markers were considered weightless. The problem was solved in a nonlinear non-stationary setting by the method of discrete vortices. The markers moved in space within the time frame, considering the effect of aircraft wake vortex. The problem was solved in the dimensional format; therefore, the graphs below show calculation data for the specific aircraft flight conditions. In order to simplify understanding of the process of vortex and contrails interaction, the graphs below only monitor the marker movement, which was placed in the center of the nozzle. The paper [1] shows the movement of other markers, which simulate the engine contour.

To assess the ambient condition in the mathematical model of the long-distance wake vortex of the computational software application, the Richardson number was used.

$$Ri = \frac{g}{T} \frac{\Delta \bar{T} / \Delta z}{(\Delta \bar{N} / \Delta z)^2}.$$

Here  $g$  is acceleration of free fall,  $T$  is the average temperature of the layer  $\Delta z$  thick.  $\Delta \bar{T} / \Delta z$  and  $\Delta \bar{N} / \Delta z$  are respectively the average horizontal wind velocity temperature gradients in the layer  $\Delta z$  thick.

The Richardson number characterizes the ratio of buoyancy forces (numerator) and dynamic factor (denominator), id est, the ratio of the contributions of free and forced convection in the formation of atmospheric turbulence. Thus, the increase in the temperature gradient modulus corresponds to the state in which buoyancy forces dominate. The increase in the velocity gradient corresponds to the increase in the dynamic

factor and characterizes the atmosphere as unstable. The ambient condition is considered neutral if  $-0.01 \leq Ri \leq 0.01$ , in this case, the thermal influence is minimal so only forced convection can exist. When the  $Ri < -0.01$  number decreases, buoyancy forces become more apparent, mixed convection arises, and at  $Ri < -1.0$ , a free convection mode is established. On the contrary, with an increase in  $Ri > 0.01$  buoyancy forces begin to impede the turbulence development. At  $Ri > 0.25$  the current becomes almost laminar, turbulent mixing is virtually absent.

So, at  $Ri < -1.0$  the ambient condition is considered highly unstable (AC = 5), at  $-0.01 > Ri \geq -1.0$  unstable (AC = 4), at  $0.01 \geq Ri \geq -0.01$  neutral (AC = 3), at  $2.5 \geq Ri > 0.01$  steady (AC = 2) and at  $Ri > 0.25$  highly stable (AC = 1). All the above argumentations can be narrowed down to Table 1.

To make the application of this table and the introduction of initial data into the mathematical model of long-distance wake vortex convenient, the ambient condition estimates are given. A highly unstable atmosphere is rated at 5 points, and strongly stable at 1 point. From Table 1, we can see the estimates of other ambient conditions. The flight experiments as well as the observations of real aircraft flights showed that the position and propagation of vortex as well as aircraft contrails significantly depend on the ambient condition. In a non-turbulent atmosphere, vortex trails exist for prolonged time, while in the unstable atmosphere they quickly disappear due to dissipation and diffusion. It means, contrails, when interacting with vortex

ones, will behave differently. The rapid destruction of the wake vortex in a highly unstable atmosphere leads to the cessation of its effect on the contrail, which can exist for more extended time. Vice versa, the long-term existence of wake vortex in a highly stable atmosphere leads to the rapid destruction of the contrail and its dispersion in the atmosphere. Turbulence of the atmosphere itself also affects the contrail dispersion. This mathematical model also takes into consideration this fact.

## Results of the research

Twin-engine Airbus A320 and four-engine A380 were chosen as the objects of this investigation. The similar flight mode and atmospheric conditions were chosen for both aircraft. The altitude was  $H = 10,000$  m, air speed  $V = 850$  km/h, the distance behind the aircraft, to which vortex and contrails were calculated, was equal to 25 km. The Airbus A320 and A380 weight came to 77 tons and 560 tons respectively. Furthermore, the ambient condition, in the calculations, was introduced as highly stable ( $AC = 1$ ), neutral ( $AC = 3$ ) and highly unstable ( $AC = 5$ ) in accordance with Table 1. In the graphs below, all linear dimensions are made on a scale for the convenient perception.

Figure 2 represents the calculation results for position of the Airbus A320 contrails in a highly stable atmosphere ( $AC = 1$ ). Herewith, the movement of the marker in the oval form, originally located in the center of the nozzle, is shown. The time of wake vortex impact on the contrails will be assessed by the length of its trajectory. The longer the trajectory is, the longer the interaction time of these trails. The vertical axis of the charts shows the aircraft altitude  $H$  (m), so does the horizontal axis – the distance (offset) to the right from the aircraft  $Z$  (m). The presented trajectories of the marker are obtained by taking into consideration the Airbus A320 wake vortex effect. The vortex trail exists in the non-turbulent atmosphere for a long space of time.

We can see that the vortex trail, having captured the condensation one, commences long

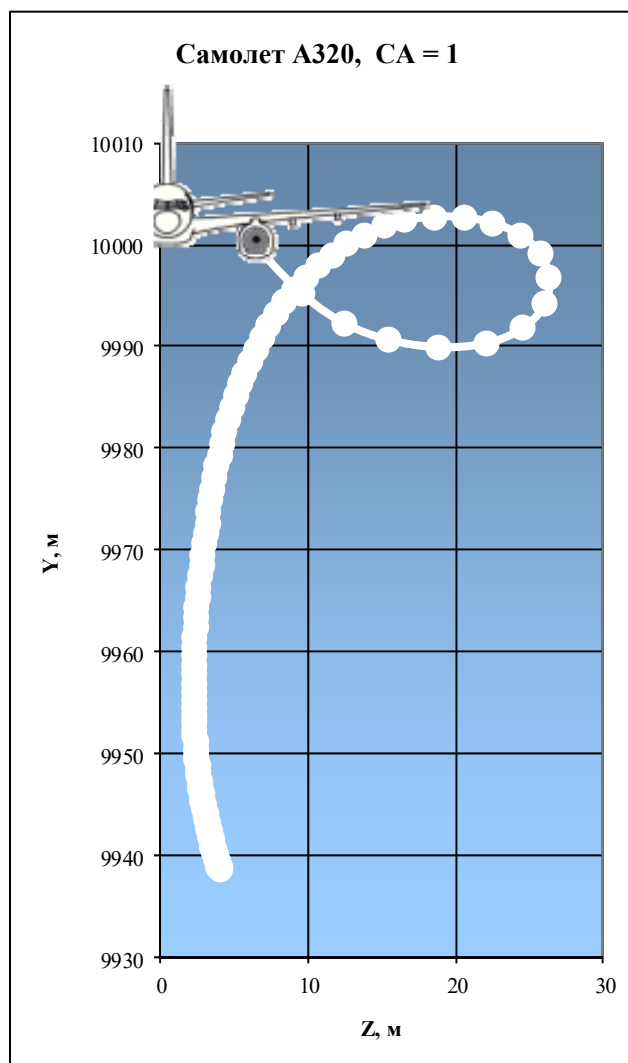


Fig. 2. Propagation of a condensation trail in a highly stable atmosphere

interaction with it, thereby, more diffuses it in the atmosphere.

Figure 3 shows the calculation results of position of the Airbus A320 contrails in a neutral atmosphere ( $AC = 3$ ).

In this case, due to atmospheric turbulence, the vortex trail fades faster. As in a highly stable atmosphere, after capturing the contrail, it disperses. But here the time for dispersing the trail is significantly shorter. In gusty air ( $AC = 5$ ), the vortex trail fades more quickly and its interaction with the contrail, weakens more greatly (fig. 4).

The contrail retains its structure and concentration of inclusive substances for a long time. The contrail “hangs” at one height. In this case,

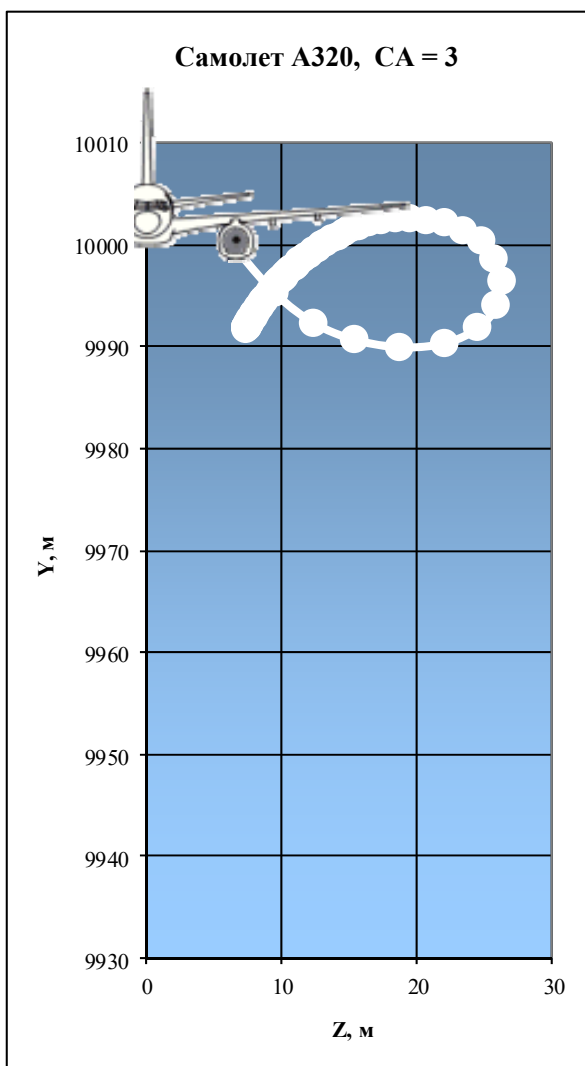


Fig. 3. Propagation of a contrail in a neutral atmosphere

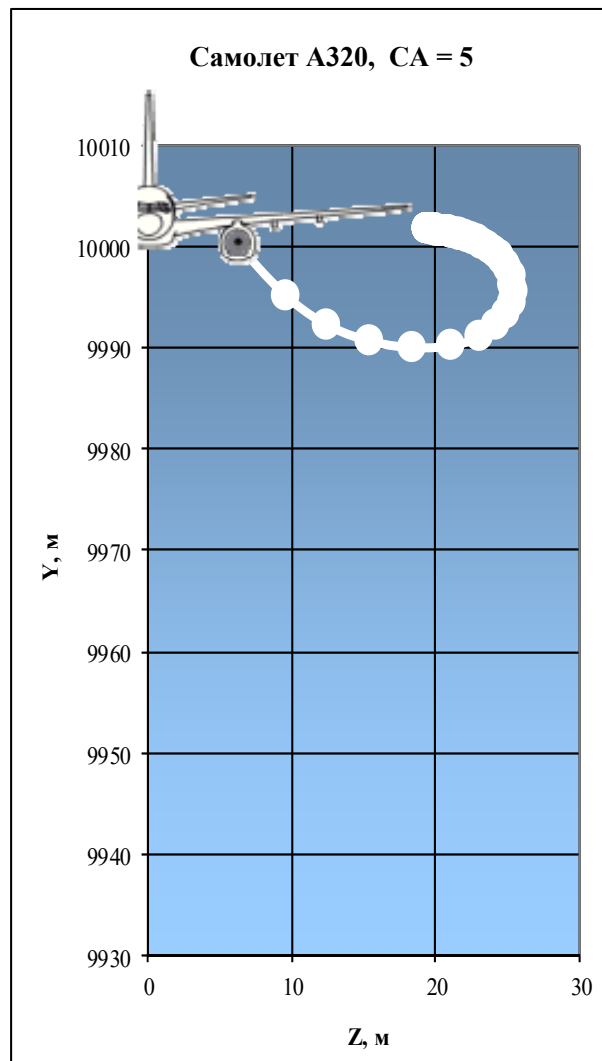


Fig. 4. Propagation of a contrail in a highly unstable atmosphere

only processes, taking place in a turbulent atmosphere, have an impact on it. Let us take notice that these processes in their effect are by an order of magnitude weaker than the vortex trail effect [12, 15].

The similar results are obtained for the Airbus A380. Figure 5 shows the calculation results of the contrail position in a highly stable atmosphere. The movement of two markers, originally located in the center of each engine nozzle, is also shown. The presented trajectories of markers are obtained by means taking into consideration the Airbus A380 vortex trail effect. The argumentation for the Airbus A320 is also reasonable. In the non-turbulent air ( $AC = 1$ ), the vortex trail, having

captured the contrail and interacting with it, disperses quickly it in the atmosphere. In a neutral atmosphere ( $AC = 3$ ), the vortex trail fades faster than in a highly stable atmosphere. Therefore, the contrail dispersion time is substantially shorter (fig. 6). In a turbulent atmosphere ( $AC = 5$ ), the vortex trail fades more quickly and its interaction with the contrail weakens more greatly (fig. 7).

The contrail retains its structure and, therefore, the concentration of inclusive substances. In this case, only processes, taking place in a turbulent atmosphere, affect it. But these processes in their effect, as it has been noted above, are by an order of magnitude weaker than the vortex trail effect [12, 15].

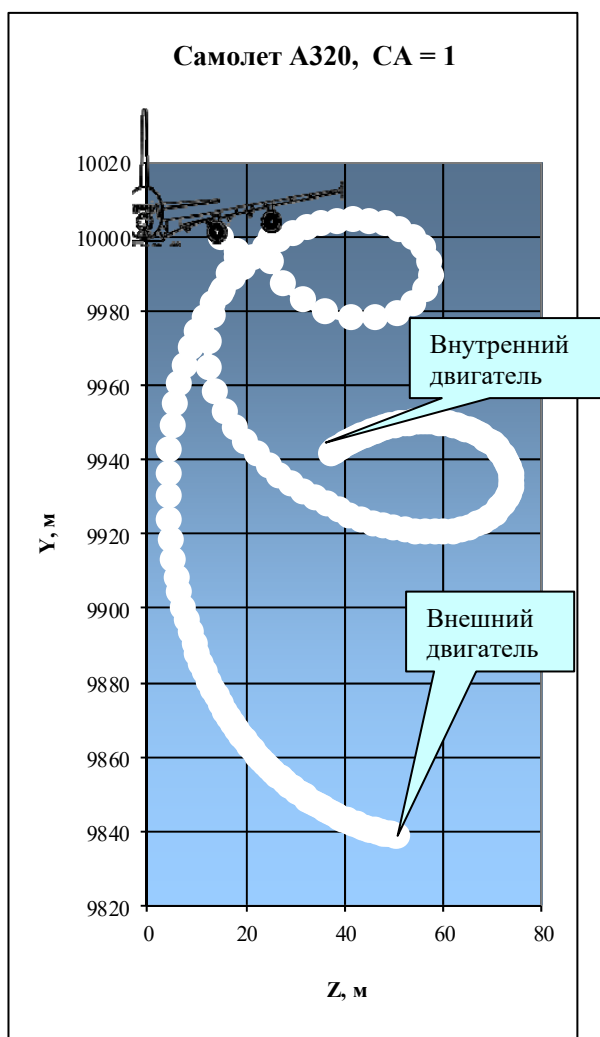


Fig. 5. Propagation of a condensation trail in a highly stable atmosphere

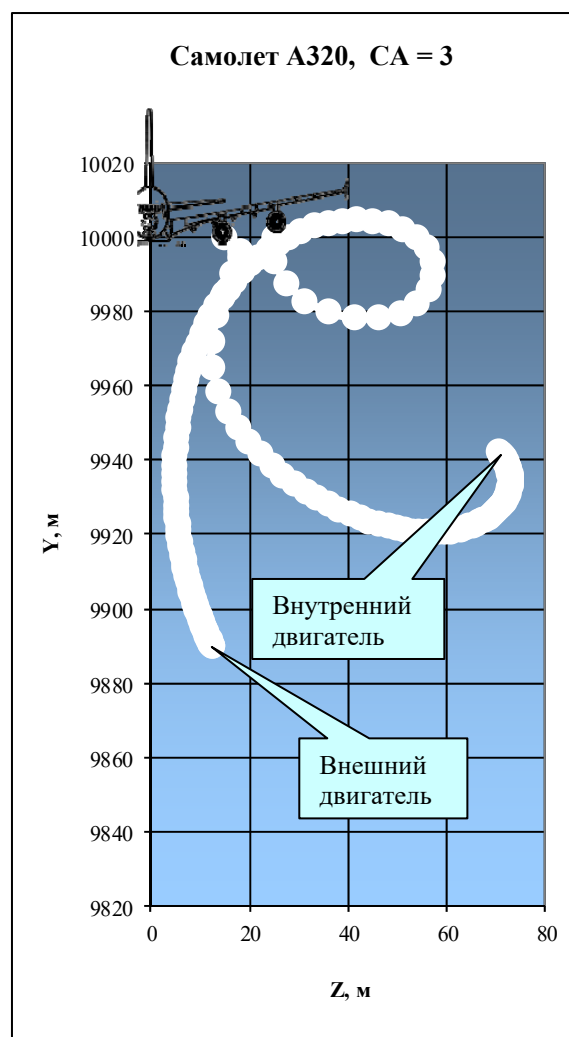


Fig. 6. Propagation of a condensation trail in a neutral atmosphere

## Conclusion

Thus, the calculations showed that in case of the vortex and contrails interaction, the diffusion of the contrail behind aircraft substantially depends on the ambient condition. In a highly stable atmosphere contrail dissipates fastest of all. Here, the vortex trail remains long and affects the contrail continuously. Subsequently, the concentration of inclusive substances decreases due to the longer time of interaction. Conversely, in a highly unstable atmosphere, the vortex trail fades rapidly and its effect on the contrail weakens, afterwards it disappears entirely. The contrail “hangs” at the same height. In this case,

only processes that happen in a turbulent atmosphere, which, as it has been noted above, in terms of their effect on the contrail, are by an order of magnitude weaker than the vortex trail impact. The contrail retains its structure and concentration of inclusive substances for a longer stretch of time.

## References

1. Aubakirov, T.O., Dedesh, V.T., Zhelannikov, A.I. & Zamyatin, A.N. (2015). *Simulation of aircraft condensation trails and wake vortices interaction*. Nauchnyy Vestnik MGTU GA, no. 212, pp. 5–10. (in Russian)

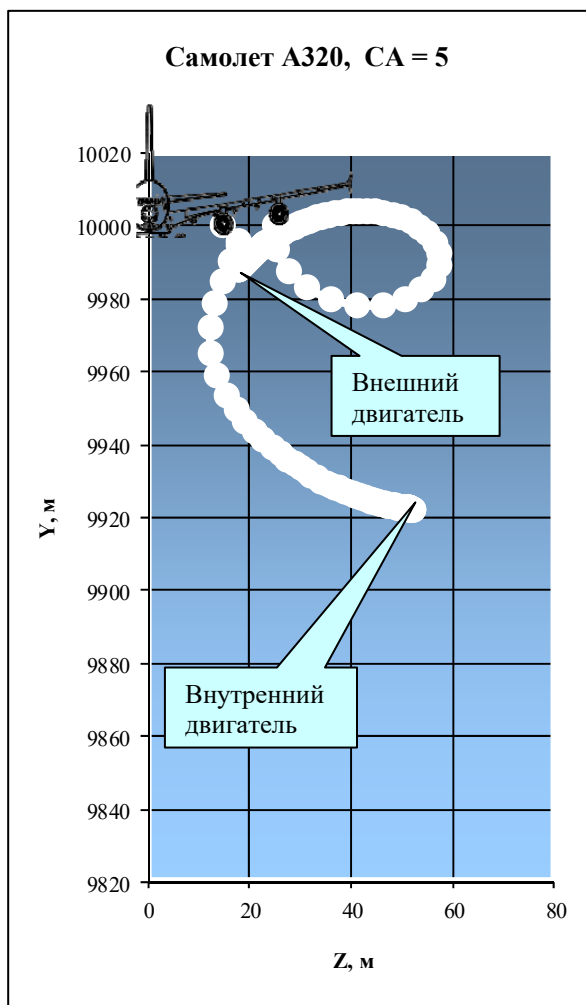


Fig. 7. Propagation of a condensation trail in a highly unstable atmosphere

2. Grigorev, M.A. & Zamyatin, A.N. (2015). *Wake vortices and condensation trails from wide-body aircraft and their interaction*. 14th China-Russia Conference on Fundamental Problem of Aircraft Aerodynamics, Flight Dynamics, Strength and Flight Safety. Shenyang China, pp. 11–17.

3. Grigorev, M.A. & Zamyatin, A.N. (2016). *Experimental and theoretical investigations of large scale vortex flows*. ICVFM 2016, 7th International Conference on Vortex Flows and Vortex Models. Rostock, Germany, pp. 98–99.

4. Grigorev, M.A., Zamyatin, A.N. & Rogozin, V. (2016). *Airflow visualization during research of large scale vortex flows*. ICAS 2016, 30th Congress of the International

Council of the Aeronautical Science in Daejeon, Korea, pp. 1–7.

5. Ginevsky, A.S. & Zhelannikov, A.I. (2009). *Vortex wakes of aircrafts*. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 154 p. DOI: 10.1007/978-3-642-01760-5

6. Winckelmans, G., Cottin, C., Daininck, G. & Leweke, T. (2007). *Experimental and numerical study of counter-rotating vortex pair dynamics in ground defect*. 18th Congress Français de Mécanique, pp. 28–33.

7. Winckelmans, G., Bricteux, L., Cocle, R., Duponcheel, M. & Georges, L. (2007). *Assessment of multiscale models for LES: spectral behavior in very high Reynolds number turbulence and cases with aircraft wakes vortices*. Proceedings 5th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP-5), Garching, Germany, vol. 1, pp. 327–331.

8. Frech, M. & Holzäpfel, F. (2008). *Skill of an aircraft wake-vortex model using weather prediction and observation*. Journal of Aircraft, vol. 45, no. 2, pp. 461–470. DOI: 10.2514/1.28983

9. Holzäpfel, F. & Steen, M. (2007). *Aircraft Wake-Vortex Evolution in Ground Proximity: Analysis and parameterization*. AIAA J, vol. 45, no. 1, pp. 218–227. DOI: 10.2514/1.23917

10. Stephan, A., Rohlmann, D., Holzäpfel, F. & Rudnik, R. (2019). *Effects of detailed geometry on aircraft wake vortex dynamics during landing*. Journal of Aircraft, vol. 56, no. 3, pp. 974–989. DOI: 10.2514/1.C034961

11. Barnes, C.J., Visbal, M.R. & Huang, P.G. (2016). *On the effects of vertical offset and core structure in streamwise-oriented vortex-wing interactions*. Journal of Fluid Mechanics, vol. 799, pp. 128–158. DOI: 10.1017/jfm.2016.320

12. McKenna, C., Bross, M. & Rockwell, D. (2017). *Structure of a stream wise oriented vortex incident upon a wing*. Journal of Fluid Mechanics, vol. 816, pp. 306–330. DOI: 10.1017/jfm.2017.87

13. Unterstrasser, S & Stephan, A. (2021). *Far field wake vortex evolution of two aircraft formation flight and implications on young contrails*. The Aeronautical Journal, vol. 124, issue 1275, pp. 667–702. DOI: 10.1017/aer.2020.3

14. **Stephan, A., Schroll, J. & Holzäpfel, F.** (2017). *Numerical optimization of plate-line design for enhanced wake-vortex decay*. Journal Aircraft, vol. 54, no. 3, pp. 995–1010. DOI: 10.2514/1.C033973
15. **Zhelannikov, A.I. & Zamyatin, A.N.** (2015). *The certificate of state registration of program for computer № 2015614783 "Design-a software package for the system of vortex-Reva security"*.
16. **Belotserkovsky, S.M. & Nisht, M.I.** (1978). *Separation and non-separation flow of thin wings with an ideal liquid*. Moscow: Nauka, 277 p. (in Russian)
17. **Aubakirov, T.O., Belotserkovsky, S.M., Zhelannikov, A.I. & Nisht, M.I.** (1997). *Non-linear theory of the wing and its applications*. Almaty: Gylym, 448 p. (in Russian)
18. **Belotserkovsky, S.M. & Ginevsky, A.S.** (1995). *Modeling of turbulent jets and traces based on the discrete vortex method*. Moscow: Fizmatlit, 1995. 368 p. (in Russian)
19. **Vyshinsky, V.V. & Sudakov, G.G.** (2006). *Vortex trace of an airplane in a turbulent atmosphere*. Trudy TsAGI, issue 2667, 155 p. (in Russian)
20. **Vyshinsky, V.V. & Sudakov, G.G.** (2009). *The vortex track of the aircraft and flight safety issues*. Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology, vol. 1, no. 3, pp. 73–93. (in Russian)
21. **Animitsa, O.V., Gaifullin, A.M., Ryzhov, A.A. & Sviridenko, Yu.N.** (2015). *Modeling on the pilot stand of refueling an airplane in flight*. Proceedings of Moscow Institute of Physics and Technology, vol. 7, no. 1, pp. 3–15. (in Russian)
22. **Bosnyakov, I.S. & Sudakov, G.G.** (2013). *Modeling the destruction of a vortex wake behind a passenger plane using computational aerodynamics methods*. Trudy TsAGI, issue 2730, pp. 3–12. (in Russian)
23. **Aparinov, V.A. & Dvorak, A.V.** (1986). *The method of discrete vortices with closed vortex frames*. Trudy VVIA im. Prof. N.E. Zhukovskogo, issue 1313, pp. 424–432. (in Russian)

## Список литературы

1. **Аубакиров Т.О.** Моделирование взаимодействия конденсационного и вихревого следов за воздушными судами / Т.О. Аубакиров, В.Т. Дедеш, А.И. Желанников, А.Н. Замятин // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 212 (2). С. 5–10.
2. **Grigorev M.A., Zamyatin A.N.** Wake vortices and condensation trails from wide-body aircraft and their interaction // 14th China-Russia Conference on Fundamental Problem of Aircraft Aerodynamics, Flight Dynamics, Strength and Flight Safety. Shenyang China, 15–16 September 2015. Pp. 11–17.
3. **Grigorev M.A., Zamyatin A.N.** Experimental and theoretical investigations of large scale vortex flows // ICVFM 2016. 7th International Conference on Vortex Flows and Vortex Models. Rostock, Germany, 19–22 September 2016. Pp. 98–99.
4. **Grigorev M.A., Zamyatin A.N., Rogozin V.** Airflow visualization during research of large scale vortex flows // ICAS 2016. 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Science in Daejeon. Korea, September 2016. Pp. 1–7.
5. **Ginevsky A.S., Zhelannikov A.I.** Vortex wakes of aircrafts. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2009. 154 p. DOI: 10.1007/978-3-642-01760-5
6. **Winckelmans G.** Experimental and numerical study of counter-rotating vortex pair dynamics in ground defect / G. Winckelmans, C. Cottin, G. Daeninck, T. Leweke // 18th Congress Français de Mécanique. Grenoble, France, 27–31 August 2007. Pp. 28–33.
7. **Winckelmans G.** Assessment of multiscale models for LES: spectral behavior in very high Reynolds number turbulence and cases with aircraft wakes vortices / G. Winckelmans, L. Bricteux, R. Cocle, M. Duponcheel, L. Georges // Proceedings 5th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP-5). Garching, Germany, 27–29 August 2007. Vol. 1. Pp. 327–331.
8. **Frech M., Holzäpfel F.** Skill of an aircraft wake-vortex model using weather prediction and



observation // *Journal of Aircraft*. 2008. Vol. 45, no. 2. Pp. 461–470. DOI: 10.2514/1.28983

9. **Holzäpfel F., Steen M.** Aircraft wake-vortex evolution in ground proximity: analysis and parameterization // *AIAA J.* 2007. Vol. 45, no. 1. Pp. 218–227. DOI: 10.2514/1.23917

10. **Stephan A.** Effects of detailed aircraft geometry on wake vortex dynamics during landing / A. Stephan, D. Rohlmann, F. Holzäpfel, R. Rudnik // *Journal of Aircraft*. 2019. Vol. 56, no. 3. Pp. 974–989. DOI: 10.2514/1.C034961

11. **Barnes C.J., Visbal M.R., Huang P.G.** On the effects of vertical offset and core structure in streamwise-oriented vortex-wing interactions // *Journal of Fluid Mechanics*. 2016. Vol. 799. Pp. 128–158. DOI: 10.1017/jfm.2016.320

12. **McKenna C., Bross M., Rockwell D.** Structure of a stream wise oriented vortex incident upon a wing // *Journal of Fluid Mechanics*. 2017. Vol. 816. Pp. 306–330. DOI: 10.1017/jfm.2017.87

13. **Unterstrasser S., Stephan A.** Far field wake vortex evolution of two aircraft formation flight and implications on young contrails // *The Aeronautical Journal*. 2020. Vol. 124, iss. 1275. Pp. 667–702. DOI: 10.1017/aer.2020.3

14. **Stephan A., Schrall J., Holzäpfel F.** Numerical optimization of plate-line design for enhanced wake-vortex decay // *Journal Aircraft*. 2017. Vol. 54, no. 3. Pp. 995–1010. DOI: 10.2514/1.C033973

15. **Желанников А.И., Замятин А.Н.** Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015614783 «Расчетно-программный комплекс для системы вихревой безопасности», 2015.

16. **Белоцерковский С.М., Ништ М.И.** Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью. М.: Наука, 1978. 277 с.

17. **Аубакиров Т.О.** Нелинейная теория крыла и ее приложения / Т.О. Аубакиров, С.М. Белоцерковский, А.И. Желанников, М.И. Ништ. Алматы: Гылым, 1997. 448 с.

18. **Белоцерковский С.М., Гиневский А.С.** Моделирование турбулентных струй и следов на основе метода дискретных вихрей. М.: Физматлит, 1995. 368 с.

19. **Вышинский В.В., Судаков Г.Г.** Вихревой след самолета в турбулентной атмосфере // *Труды ЦАГИ*. 2006. Вып. 2667. 155 с.

20. **Вышинский В.В., Судаков Г.Г.** Вихревой след самолета и вопросы безопасности полетов // *Труды МФТИ*. 2009. Т. 1, № 3. С. 73–93.

21. **Анимица О.В.** Моделирование на пилотажном стенде дозаправки самолета в полете / О.В. Анимица, А.М. Гайфуллин, А.А. Рыжов, Ю.Н. Свириденко // *Труды МФТИ*. 2015. Т. 7, № 1. С. 3–15.

22. **Босняков И.С., Судаков Г.Г.** Моделирование разрушения вихревого следа за пассажирским самолетом с помощью методов вычислительной аэродинамики // *Труды ЦАГИ*. 2013. Вып. 2730. С. 3–12.

23. **Апарин В.А., Дворак А.В.** Метод дискретных вихрей с замкнутыми вихревыми рамками // *Труды ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского*. 1986. Вып. 1313. С. 424–432.

### Information about the authors

**Alexander I. Zhelannikov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of Central Aerohydrodynamic Institute, zhelannikov@yandex.ru.

**Andrey N. Zamyatin**, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, the Head of the Department, Gromov Flight Research Institute, frizamyatin@mail.ru.

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

## Сведения об авторах

**Желанников Александр Иванович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, [zhelannikov@yandex.ru](mailto:zhelannikov@yandex.ru).

**Замятин Андрей Николаевич**, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник отделения ЛИИ им. М.М. Громова, [frizamyatin@mail.ru](mailto:frizamyatin@mail.ru).

**Чинючин Юрий Михайлович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиационных двигателей МГТУ ГА, [yu.chinyuchin@mstuca.aero](mailto:yu.chinyuchin@mstuca.aero).

Поступила в редакцию 13.01.2022  
Принята в печать 24.03.2022

Received 13.01.2022  
Accepted for publication 24.03.2022

ББК 05  
Н 34  
Св. план 2022

Научный Вестник МГТУ ГА  
Том 25, № 02, 2022  
Civil Aviation High TECHNOLOGIES  
Vol. 25, No. 02, 2022

Свидетельство о регистрации в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) ПИ № ФС77-47989 от 27 декабря 2011 г.

Оформить подписку на печатную версию журнала можно на сайте Объединенного каталога «Пресса России» [www.pressa-rf.ru](http://www.pressa-rf.ru). Подписной индекс 84254.

---

Подписано в печать 25.03.2022.

Печать цифровая

Формат 60×90/8

10,0 усл. печ. л.

Заказ № 915/39

Тираж 50 экз.

---

Московский государственный технический университет ГА  
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20  
Изготовлено в ИД Академии имени Н. Е. Жуковского  
125167, Москва, 8-го Марта 4-я ул., дом 6А  
Тел.: (495) 973-45-68  
E-mail: [artpress@mail.ru](mailto:artpress@mail.ru)