

Том 26, № 03, 2023

ISSN 2079-0619

e-ISSN 2542-0119

Научный Вестник МГТУ ГА



Civil Aviation High TECHNOLOGIES

Vol. 26, No. 03, 2023

Издается с 1998 г.

Москва
2023

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

Главная редакция

Главный редактор: *Елисеев Б.П.*, заслуженный юрист РФ, проф., д. ю. н., ректор МГТУ ГА, Москва, Россия.

Зам. главного редактора: *Воробьев В.В.*, проф., д. т. н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия.

Ответственные секретари главной редакции: *Наумова Т.В.*, доцент, д. филос. н., профессор кафедры МГТУ ГА, Москва, Россия;
Полешкина И.О., доцент, к. э. н., старший научный сотрудник отдела научных исследований МГТУ ГА, Москва, Россия.

Члены главной редакции:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Editorial Board

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

Chief Editorial Board:

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

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

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

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

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

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

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

Sergey L. Chernishov, Academician, Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Sciences, Vice-President, Russian Academy of Sciences, Academic Adviser, National Research Center "Zhukovsky Institute", Moscow, Russia;

Sergey Y. Zheltov, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Academician, Russian Academy of Sciences, Professor, Doctor of Sciences, First Deputy General Director, State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, Russia;

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

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

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

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

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

Редакционный совет

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

Акиншин Р.Н., проф., д. т. н., в. н. с., секция оборонных проблем МО РФ при президиуме РАН, Москва, Россия;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Полтавский А.В., д. т. н., с. н. с., ведущий научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия;

Рухлинский В.М., д. т. н., председатель комиссии МАК по связям с Международной организацией гражданской авиации, Москва, Россия;

Самохин А.В., д. т. н., в. н. с. Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Россия;

Сарычев В.А., проф., д. т. н., г. н. с. АО «Радар-ММС», Санкт-Петербург, Россия;

Татаринов В.Н., действительный член Академии электромагнетизма США, проф., д. т. н., проф. ТУСУР, Томск, Россия;

Увайсов С.У., проф., д. т. н., зав. каф. МТУ, Москва, Россия;

Халютин С.П., проф., д. т. н., ген. директор ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт», Москва, Россия;

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

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

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

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

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

Editorial Council

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

Ruslan N. Akinshin, Professor, Doctor of Sciences, Leading Researcher, Section of Applied Problems under the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

Boris I. Bachkalo, Professor, Doctor of Sciences, Leading Research Fellow, Russian Air Force Central Scientific Research Institute of Ministry of Defence, Shchelkovo, Russia;

Vladimir S. Brusov, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

К 100-ЛЕТИЮ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

Кузьмин Ю.В.

Пассажирское самолётостроение XX века. Количественный анализ	8
--	---

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Бородкин С.Ф., Волынчук А.И., Киселев М.А., Петров Ю.В.

Возможности и недостатки систем предупреждения выкатывания воздушного судна за пределы взлетно-посадочной полосы	25
--	----

Грядунов К.И., Браилко А.А., Балышин К.Э., Савушкин С.А., Харина В.К.

Применение методов оценки термоокислительной стабильности реактивных топлив в гражданской авиации	38
---	----

Kiselev M.A., Kalyuzhny Yu.S., Karpov A.V.

Analysis of the existing approaches to in-flight aircraft rerouting	53
---	----

Коваленко Н.А., Шорохова Л.С.

Особенности организации туристических маршрутов как одного из методов повышения эффективности использования подвижного состава	66
--	----

Павлова В.И., Старостин И.Е.

Методика определения реактивных параметров авиационных потребителей электрической энергии на основе данных о напряжении и токе в переходных процессах	78
---	----

Селезнев М.В., Грядунов К.И., Балышин К.Э.

Результаты оценки трибологических свойств авиационных масел для двигателей воздушных судов	94
--	----

МАШИНОСТРОЕНИЕ

Zhelannikov A.I.

Features of vortex trace propagation for aircraft with propellers	103
---	-----

CONTENTS

ON THE CENTENNIAL OF DOMESTIC CIVIL AVIATION

Kuzmin Yu.V. Passenger airplane manufacturing in the 20 th century. Quantitative analysis	8
--	---

TRANSPORTATION SYSTEMS

Borodkin S.F., Volynchuk A.I., Kiselev M.A., Petrov Yu.V. Aircraft overrun warning systems capabilities and disadvantages	25
Gryadunov K.I., Brailko A.A., Balyshin K.E., Savushkin S.A., Kharina V.K. The application of methods for assessing the thermal oxidative jet fuel stability in civil aviation	38
Kiselev M.A., Kalyuzhny Yu.S., Karpov A.V. Analysis of the existing approaches to in-flight aircraft rerouting	53
Kovalenko N.A., Shorokhova L.S. The features of organizing tourist routes as one of the methods to increase the efficiency of rolling stock usage	66
Pavlova V.I., Starostin I.E. Methodology for determining the reactive parameters of aviation electrical energy consumers based on voltage and current data in transients	78
Seleznev, M.V., Gryadunov, K.I., Balyshin, K.E. Evaluation results of the tribological properties of aviation oils for aircraft engines	94

MECHANICAL ENGINEERING

Zhelannikov A.I. Features of vortex trace propagation for aircraft with propellers	103
--	-----

К 100-ЛЕТИЮ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

УДК 629.735

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-8-24

**Пассажирское самолетостроение XX века.
Количественный анализ**

Ю.В. Кузьмин¹

¹*Институт истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН,
г. Москва, Россия*

Аннотация: В статье впервые представлена статистика производства и разработки пассажирских самолетов в мире. Приведена методика получения результатов, оценена их погрешность. Уточнено, что именно считается пассажирским самолетом. Показано, что за весь XX век построили только 60 тысяч пассажирских самолетов. Это менее 3 % от общего выпуска самолетов всех классов. Суммарная их вместимость составляет менее 5 млн человек, или менее тысячной доли населения Земли к концу прошлого столетия. И эти 60 тысяч самолетов обеспечили невиданную раньше мобильность населения. Выявлено, что лидирующая роль в пассажирском самолетостроении XX века принадлежит США, СССР занимал устойчивое второе место. Описаны подъемы и спады производства самолетов, в том числе спады во время Великой депрессии, Второй мировой войны и глобальный спад (в СССР, США и других странах) в начале 1960-х годов, сменившийся быстрым ростом выпуска. Показано, что количество производимых самолетов в последнюю треть XX века оставалось примерно постоянным, но их средняя вместимость быстро росла, что во многом обеспечило бурный рост авиаперевозок за этот период. Дана динамика массы конструкции в расчете на одного пассажира. Приведена динамика количества новых моделей пассажирских самолетов. Показано, что в последние 30 лет века это число было примерно постоянным и почти все модели, дошедшие до испытаний, были запущены в серийное производство. В период же между мировыми войнами около половины всех испытанных в полете моделей оставались опытными образцами. Дано изменение соотношения количества самолетов по числу двигателей. Отмечены ренессанс трехмоторных самолетов в 1960-е годы, практически полное исчезновение одномоторных пассажирских самолетов к концу века и стабильный размер небольшой доли четырехмоторных самолетов в последние 30 лет века.

Ключевые слова: самолетостроение; пассажирские самолеты; производство самолетов; пассажироместимость; весовая отдача; совершенство конструкций; фазы развития технологии; история XX века.

Для цитирования: Кузьмин Ю.В. Пассажирское самолетостроение XX века. Количественный анализ // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 6, № 3. С. 8–24. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-8-24

Passenger airplane manufacturing in the 20th century. Quantitative analysis

Yu.V. Kuzmin¹

¹*S. Vavilov Institute for the History of Science and Technology, RAS, Moscow, Russia*

Abstract: The statistics on the production and development of passenger airplanes in the world is presented in this article for the first time. The methods for obtaining the results are described, uncertainties of the results are estimated. It is specified what exactly is considered to be a passenger airplane. It is shown that only 60,000 passenger airplanes were built during the entire 20th century. This is less than 3% of the total production of airplanes of all classes. Their total capacity amounts less than 5 million people, or less than a thousandth of the world's population by the end of the last century. These 60,000 airplanes provided unprecedented mobility of the population. It was revealed that the leading role in the passenger airplane manufacturing belonged to the USA, the USSR took a steady second place. The ups-and-downs in airplane production are described, including the recessions during the Great Depression, World War II and the global economic decline (in the USSR, the USA and other countries) in the early 1960s, which

was replaced by a rapid increase in output. It is indicated that the number of airplanes produced in the last third of the 20th century remained approximately constant, but their average capacity was growing rapidly, which largely ensured the explosive growth of air transportation during this period. The dynamics of the dead weight per one passenger is given. The dynamics of the number of the new passenger airplane models is presented. It is shown that for the last 30 years of the century their number was approximately constant, and almost all the models that reached the test stage were put into serial production. In the period between the world wars, however, about half of all models tested in flight remained prototypes. The change in the ratio of the number of airplanes by the number of engines is given. The renaissance of three-engine airplanes in the 1960s, the almost complete disappearance of single-engine passenger airplanes by the end of the century and the stable amount of a small proportion of four-engine airplanes for the last 30 years of the past century are noted.

Key words: airplane manufacturing, passenger airplanes, airplane production, passenger capacity, weight ratio, design upgrading, phases of technology development, history of the 20th century.

For citation: Kuzmin, Yu.V. (2023). Passenger airplane manufacturing in the 20th century. Quantitative analysis. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 3, pp. 8–24. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-8-24

Введение

В 2023 г. исполняется 100 лет гражданской авиации СССР¹, хотя регулярные пассажирские перевозки в стране – тогда еще не СССР, а Советской России – осуществлялись и раньше, начиная с 1920 г. [1].

Поэтому становится еще более актуальным вопрос – какое место Россия и СССР занимали в производстве пассажирских самолетов? И сколько было построено пассажирских самолетов в мире? Как менялась их пассажировместимость?

Истории мировой пассажирской авиации посвящено множество книг, в том числе и на русском языке, но ответа на поставленные вопросы в них нет (см., например, [1]). И если выпуск магистральных самолетов в XXI веке хорошо документирован, в том числе благодаря информации на сайтах ведущих фирм, то с XX веком ситуация сложнее.

Автор в течение 20 лет собирал данные о характеристиках и выпуске самолетов XX века. Это позволило впервые создать количественную картину самолетостроения прошлого столетия. Предварительные результаты были доложены на Международном конгрессе аэронавтических наук в 2014 г. [2]. Сводные результаты опубликованы в 2022 г. [3].

По каждой из более 22 тыс. моделей самолетов, созданных в XX веке в мире, собра-

ны структурированные данные, включающие около 70 качественных параметров (схема, крыло, силовая установка, шасси, материалы и т. д.) и свыше 40 количественных параметров (массы и нагрузки, мощности, размеры, летно-технические характеристики и т. д.). Структура базы данных и методика их обработки изложены в ряде статей автора [4]. Более 12 тыс. источников информации перечислены в изданном автором библиографическом справочнике [5].

Выяснено, что в мире было построено более 2,2 млн самолетов, из них только около 165 тыс. транспортных и коммерческих.

Эти 165 тыс. делятся на три сопоставимые по размеру группы: транспортные, в том числе военно-транспортные и гражданские грузовые самолеты (свыше 50 тыс., здесь и далее все данные автора), сельскохозяйственные самолеты (чуть менее 39 тыс., количественная история самолетов этого класса изложена в статье автора) и собственно пассажирские самолеты. Кроме того, в группу коммерческих входят менее многочисленные специализированные машины, предназначенные для оказания услуг третьим лицам. Это прежде всего санитарные самолеты и самолеты спасательных служб (около 6,6 тыс. экземпляров), буксировщики планеров (свыше 5 тыс.), почтовые самолеты, весьма популярные между мировыми войнами (менее 1,5 тыс.), специальные самолеты для аэрофотосъемки (около 500), противопожарные и лесопатрульные и т. д.

Данные по количеству построенных в мире в XX веке пассажирских самолетов, тем

¹ 100 лет отечественной гражданской авиации [Электронный ресурс] // Федеральное агентство воздушного транспорта. URL: <https://favt.gov.ru/dejatelnost-100-let/> (дата обращения: 22.11.2022).

более динамика их производства по странам и временным периодам и рост средней пассажироместимости, насколько мне известно, публикуются впервые.

Методика исследования и оценка точности результатов

Что же считать пассажирскими самолетами? Во время и после Второй мировой войны я считаю ими самолеты, удовлетворяющие главе 25 Федеральных авиационных правил², гармонизированных с главой 25 правил FAA³, то есть самолеты с вместимостью не менее 10 пассажиров. Хотя и 9-местные самолеты широко используются на воздушных линиях, в том числе почти все из 1570 различных вариантов самолета Britten Norman BN-2, но выбранный критерий хорош тем, что результаты статьи могут быть сопоставлены с различными отчетами, составляемыми авиационными властями различных стран отдельно по самолетам, удовлетворяющим условиям глав 23 (легкие самолеты) и 25. Всего 9-местных самолетов в 1940–2000 годах построили чуть больше 4000, поэтому их учет серьезно изменил бы результаты.

Но для довоенного периода такой критерий слишком строг. Он исключает большую часть самолетов, реально перевозивших пассажиров, начиная со знаменитого моноплана Junkers F13, вмещавшего в зависимости от варианта 3–5 человек.

Поэтому выбран следующий критерий: до 1931 г. пассажирским считается самолет, перевозящий не менее 3 человек в закрытом салоне (АНТ-2 не подходит под это определение – он брал только двух человек, но все самолеты Калинина уже подходят). Граница периода выбрана так, чтобы в «пассажир-

ские» вошел серийный самолет «Сталь-2», рассчитанный на четырех пассажиров и строившийся именно для регулярных линий ГВФ.

С 1931 г. нижняя граница поднимается до шести пассажиров, с 1936 г. – до семи. Поднятие границы в 1936 г. связано с тем, что иначе многочисленные довоенные британские бипланы de Havilland D.H.89A были бы отнесены к пассажирским, а вот строящиеся после окончания войны D.H.89A Mk.4 и 5, перевозящие тех же шестерых человек, уже к самолетам общего назначения. В такой же ситуации оказались бы и французские Caudron C.445, рассчитанные на шесть пассажиров и выпускавшиеся как до, так и после войны.

Многочисленные У-2, Ш-2, П-5, перевозящие пассажиров на местных воздушных линиях, пассажирскими самолетами в статье не считаются.

Разумеется, с описанной границей, разделяющей два трудно различимых класса самолетов, перевозящих пассажиров, можно спорить. Структура базы данных позволяет пересчитать результаты, исходя из других соглашений. Но важно четко указать, что именно мы считаем.

Временные рамки исследования: от 1919 (выбор границы пояснен далее) до 2000 года включительно. Под СССР понимается СССР в 1923–1991 годах в соответствующих границах (в 1919–1922 годах Советская Россия и Советская Украина пассажирских самолетов не строили), с 1992 г. – Российская Федерация. Под Чехословакией после 1990 г. понимается Чехия. Словакия в 1991–2000 гг. пассажирских самолетов не строила, хотя активно производила легкие летательные аппараты.

Результаты основаны на обработке 3112 записей с данными о выпуске пассажирских самолетов с 1919 по 2000 год включительно, их массе и пассажироместимости.

Неизвестна пассажироместимость только 32 экземпляров самолетов, связанная с этим ошибка пренебрежимо мала.

Намного существенней неопределенность, связанная с тем, что разные авиакомпании используют для одной модели самолета ком-

² Авиационные правила. Часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. М.: Международный авиационный комитет, 1994. Раздел А.

³ Part 25. Airworthiness standards: transport category airplanes [Электронный ресурс] // Code of Federal Regulations 14 (14CFR). URL: <https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-C/part-25?toc=1> (дата обращения: 22.11.2022).

поновки салона с разным расположением кресел и, как следствие, разным числом мест. Можно было бы взять максимальное допустимое число кресел, прописанное в сертификате типа с учетом ограничений безопасности (времени покидания самолета, числа аварийных выходов и т. д.). Мы пошли другим путем, выбрав «типичную двухклассную компоновку» и понимая, что это может создать погрешность в несколько процентов.

Неизвестны массы только 110 экземпляров довоенных самолетов – это в основном редкие опытные модели. Их количество мало по сравнению с общим выпуском.

Как и в предыдущем случае, значительно большую неопределенность создает то, что масса конструкции также отличается у разных экземпляров из-за разного набора съемного и несъемного оборудования, опять-таки связанного с компоновкой салона.

Поэтому точность представленных данных в части массы и пассажироместимости может быть оценена в 1–2 %, в части выпуска – в доли процента.

Источник возможной методической ошибки – вопрос о назначении самолетов An-2 польского производства. Известно, что среди An-2 советского выпуска 1879 были построены в Киеве в пассажирском варианте [6]. С польскими самолетами ситуация сложнее. Если 7805 сельскохозяйственных вариантов легко вычлениваются из общего выпуска [7], то в оставшихся 4150 экземплярах, построенных в XX веке, присутствуют грузовые An-2T, конвертируемые An-2TP, пассажирские An-2P, десантные An-2TD, санитарные An-2S в неизвестной мне пропорции (надпись латиницей соответствует обозначениям моделей, данным производителем – концерном PZL).

Все они отнесены мной к пассажирским самолетам, так как An-2 польской постройки широко использовались и используются для пассажирских перевозок в СССР и в России. Только до конца 1986 г. в СССР на An-2 перевезли 370 млн пассажиров и 9 млн т грузов [8]. Соотношение этих двух чисел говорит, что перевозки были в основном пассажирскими. Но уточнение деления An-2

по модификациям, возможно, приведет к тому, что доля Польши в производстве пассажирских самолетов несколько снизится.

Пассажирские самолеты: начало

Первая регулярная пассажирская линия была открыта в США в январе 1914 г. Летящая лодка Benoist 14 за рейс перевозила между городами Санкт-Петербургом и Тампой (штат Флорида), стоящими на противоположных берегах длинного залива, только одного пассажира. Первый же пассажирский самолет специальной постройки, тоже американский, Air Sedan⁴, Jerom Zerbe сконструировал и построил в штате Аризона заметно раньше. Пятиплан с закрытым салоном совершил первый и единственный полет по прямой в 1909 г. (рис. 1).

До начала Первой мировой войны появилось не менее 22 моделей самолетов (здесь и далее – подсчеты автора), предназначенных специально для перевозки пассажиров, хотя в тот период говорить о конкретном назначении самолета можно только с натяжкой. Нет сомнений, что на основе «Ильи Муромца» можно было бы создать хороший пассажирский самолет, но ни Сикорский, ни Шидловский никогда такое его использование не анонсировали.

Первая мировая война прервала развитие пассажирской авиации, но затем, за год с небольшим от окончания войны и до конца 1919 г., испытали сразу 33 модели пассажирских самолетов, не считая переделок боевых машин. Одиннадцать из них были запущены в серийное производство в шести странах, и среди них революционный цельнометаллический свободнонесущий моноплан с закрытой кабиной Junkers F.13.

Вероятно, самым первым среди послевоенных пассажирских самолетов стал немецкий поплавковый биплан Friedrichshafen FF 67 (рис. 2) [9]. Его испытания начались

⁴ St. Petersburg-Tampa airboat line [Электронный ресурс] // Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/St._Petersburg%E2%80%993Tampa_Airboat_Line (дата обращения: 22.11.2022).



Рис. 1. Первый пассажирский самолет специальной постройки Zerbe Air Sedan, 1909 г.
Fig. 1. The first specially manufactured passenger airplane Zerbe Air Sedan, 1909



Рис. 2. Вероятно, первый послевоенный пассажирский самолет FF 67
Fig 2. Probably, the first post-war passenger airplane Friedrichshafen FF 67

12 декабря 1918 г. Серийно этот самолет не строился.

Динамика выпуска

Пассажирские перевозки – одно из наиболее важных и общественно значимых направлений авиационной деятельности. Тем удивительнее, что среди 2,2 млн самолетов XX века пассажирских было всего 60 тыс., то есть менее 3 %, или один самолет из каждых 37.

Самолеты в XX веке строили свыше 70 стран, но производство пассажирских среди них освоили только 32 страны. Девять из них ограничились выпуском нескольких опытных экземпляров (суммарный выпуск менее 10 машин в стране).

Три первых места по производству пассажирских самолетов в XX веке занимают те же страны, что и по выпуску самолетов в целом: США, СССР/Россия и Великобритания (рис. 3). А вот на четвертое место вышла Польша благодаря массовому производству Ан-2. «Меж-

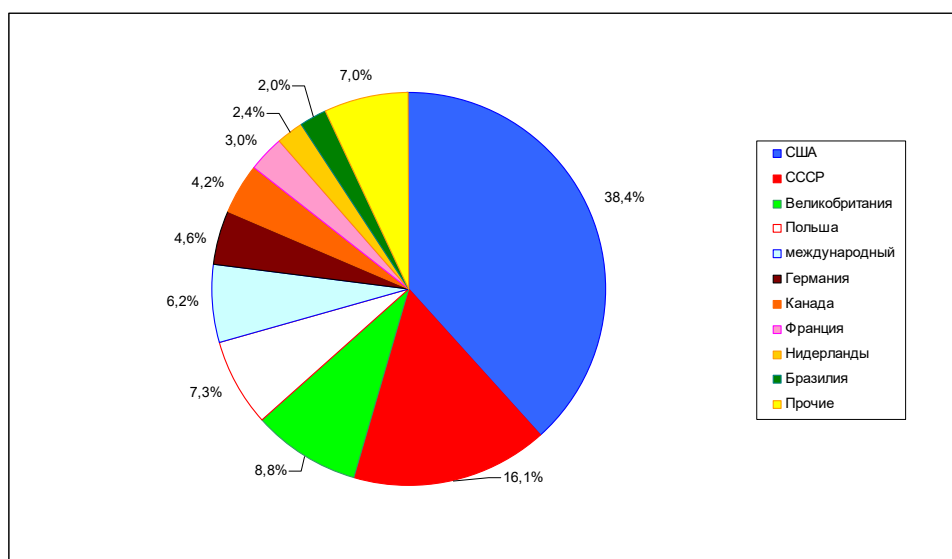


Рис. 3. Распределение выпуска пассажирских самолетов в XX веке по странам
Fig. 3. Distribution of passenger airplane production in XX century by countries

дународный» сектор на рис. 3 – это прежде всего самолеты компании Airbus.

Среди стран, выпускавших пассажирские лайнеры серийно, была и Эстония. В 1922–1923 годах на таллинском заводе Dvigatel по лицензии немецкой компании Sablatnig для авиакомпаний Aeronaut построили 11 вполне современных самолетов Р.III [10].

Отрыв США велик, но, как ни удивительно, среди пассажирских самолетов доля США меньше, чем в общем выпуске (37,6 против 43,6 %) – повлияло огромное число построенных в США легких самолетов, а доля СССР, напротив, чуть больше (15,7 против 14,6 %).

Но подсчет в штуках не учитывает разницу в размерах самолетов, а с этим связана и стоимость, и трудо-, и материалоемкость, а значит, и нагрузка на промышленность. Для их оценки целесообразно сравнивать суммарную массу конструкций самолетов. Такой показатель применяется, например, в отчетах ВВС США⁵. Подробнее методика использования суммарной массы при сравнении промышленного выпуска описывалась в докладе автора.

Для пассажирских самолетов можно предложить еще один параметр, связанный

с их стоимостью и трудоемкостью: пассажироместность. Ее определение обсуждалось в разделе «Методика исследования».

На рис. 4, 5 приведено распределение производства пассажирских самолетов по странам в XX веке в тоннах (рис. 4) и по числу пассажиро-мест (рис. 5). По сравнению с рис. 3 на обеих диаграммах преимущество США выражено заметно сильнее: в этой стране в среднем производились более крупные и вместительные самолеты.

Доля США на графике в тоннах несколько меньше, чем на графике в пассажиро-местах, что говорит о лучшей весовой культуре самолетов.

Более детальная информация может быть извлечена из динамики выпуска. На рис. 6–8 и в табл. 1–3 приведены динамика выпуска пассажирских самолетов по странам в штуках, суммарной массе конструкции и по общему числу пассажиро-мест соответственно.

В таблицах приняты трехбуквенные обозначения стран: USA – США, RUS – СССР/Россия, UK – Соединенное королевство Великобритании и Северной Ирландии, POL – Польша, INT – международные проекты, GER – Германия (ФРГ и ГДР), CAN – Канада, FRA – Франция, NED – Нидерланды, BRA – Бразилия.

⁵ Army air forces statistical digest. Washington: Statistical Control Division, 1947. 231 p.

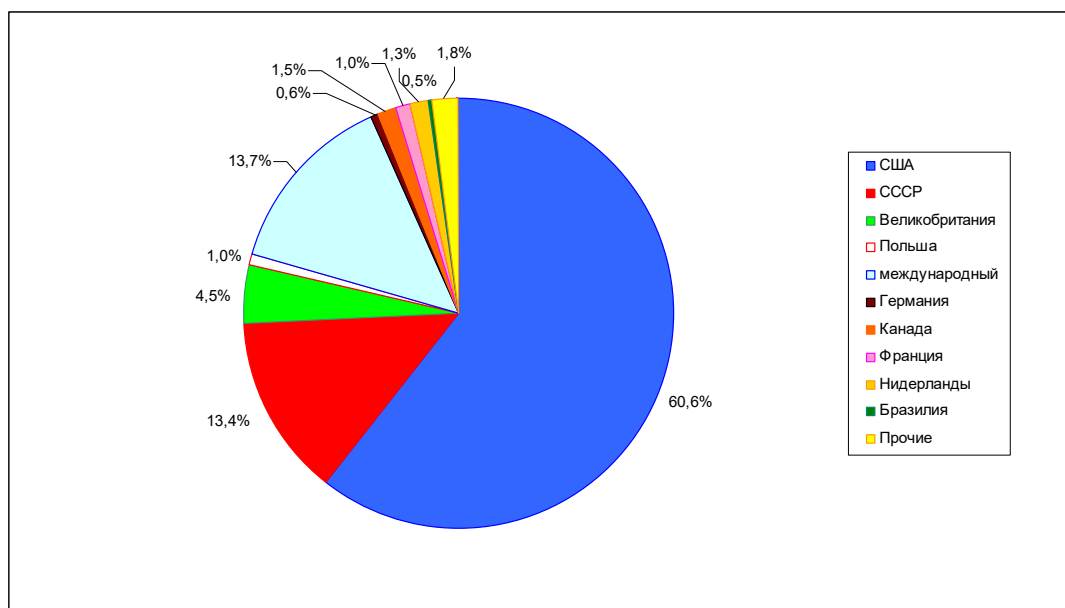


Рис. 4. Распределение выпуска пассажирских самолетов в XX веке по странам (в тоннах)
Fig. 4. Distribution of passenger airplane production in XX century by countries (in tons)

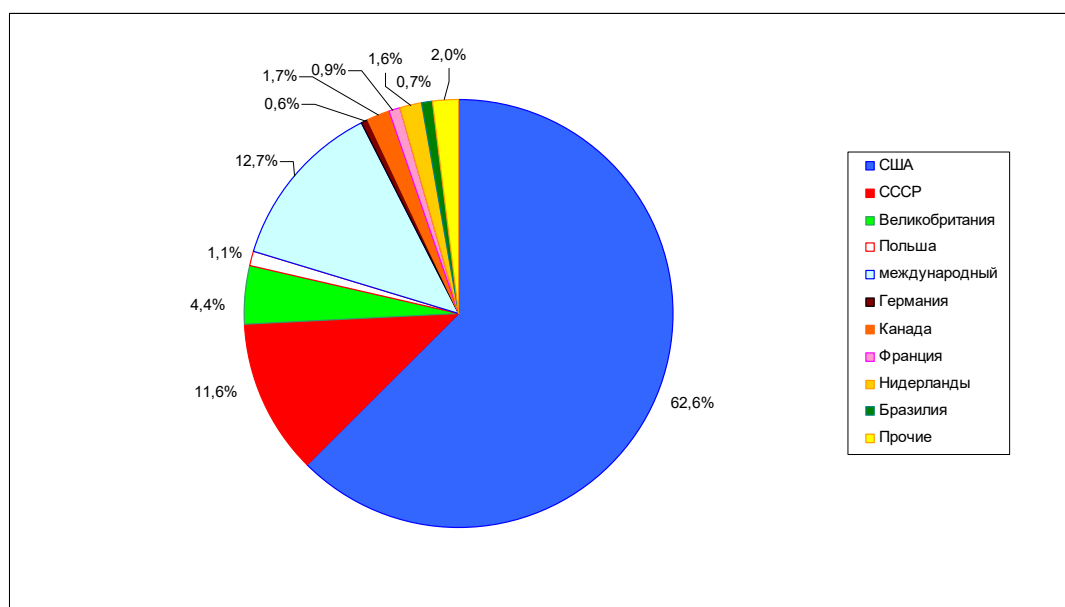


Рис. 5. Распределение выпуска пассажирских самолетов в XX веке (по пассажиро-местам)
Fig. 5. Distribution of passenger airplane production in XX century (in passenger capacity)

Из рис. 6 видно, что за рождение пассажирской авиации были ответственны страны, сражавшиеся в небе Первой мировой войны – Германия и Франция, в заметно меньшей степени – Великобритания и США (столбик 19–25 годов).

Особенно большое внимание уделяла пассажирским перевозкам Германия, в том числе

потому, что военное самолетостроение в стране было запрещено (первые три столбца).

Но во второй половине 1920-х в США произошел бурный расцвет пассажирских авиаперевозок и пассажирского авиастроения. При этом он имел не бюрократически-колониальный характер, как в Великобритании, СССР и Франции, когда основным кон-

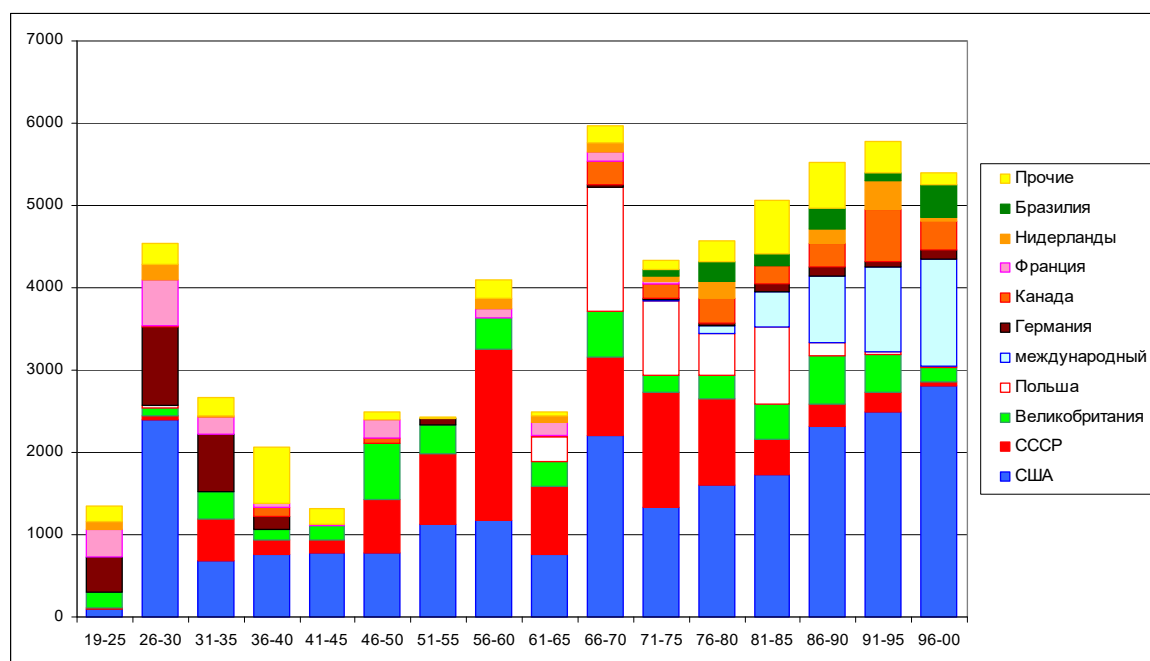


Рис. 6. Производство пассажирских самолетов в XX веке (штук)
Fig. 6. Production of passenger airplanes in XX century (pieces)

Таблица 1
Table 1

Производство пассажирских самолетов в ведущих странах в XX веке (штук)
Production of passenger airplanes in the leading countries in XX century (pieces)

Период	USA	RUS	UK	POL	INT	GER	CAN	FRA	NED	BRA	Прочие	Всего
19–25	101	9	189	0	0	431	0	333	88	0	198	1349
26–30	2398	51	91	35	0	948	20	553	197	0	249	4542
31–35	676	507	337	7	0	691	3	212	14	0	213	2660
36–40	767	169	121	1	0	159	121	40	1	0	692	2071
41–45	782	154	169	0	0	0	2	18	0	1	194	1320
46–50	779	656	669	1	0	0	72	227	0	0	82	2486
51–55	1131	859	337	0	0	80	0	3	1	0	14	2425
56–60	1174	2075	383	1	0	3	2	113	125	0	216	4092
61–65	767	824	298	301	0	2	10	163	72	0	59	2496
66–70	2207	955	558	1500	0	30	297	110	110	0	199	5966
71–75	1334	1401	206	900	12	24	174	36	53	89	103	4332
76–80	1603	1049	285	500	108	23	299	7	201	240	258	4573
81–85	1730	430	434	935	427	94	224	0	1	144	645	5064
86–90	2310	282	590	149	817	103	283	0	181	246	562	5523
91–95	2487	239	462	35	1033	64	639	0	338	92	389	5778
96–00	2816	39	172	13	1307	111	359	0	34	407	131	5389
Итого	23062	9699	5301	4378	3704	2763	2505	1815	1416	1219	4204	60066

тингентом пассажиров были государственные чиновники, а именно рыночный.

Американское правительство активно способствовало становлению авиаперевозок,

и не только субсидиями. Например, авиапочтовые линии первоначально обкатывало военное ведомство. После строительства аэродромов, оборудования трасс в аэронавигаци-

онном отношении и появления устойчивых грузовых потоков линии передавались в эксплуатацию частным компаниям. Первая правительственная регулярная почтовая линия Вашингтон – Нью-Йорк, обслуживаемая военными летчиками, открылась еще во время войны, 15 мая 1918 г. Но к сентябрю 1927 г. уже все почтовые линии обслуживались частными авиакомпаниями согласно контрактам, которые они заключили с почтовой службой США⁶.

Но рыночный характер развития отрасли в США привел и к тому, что именно в этой стране спад из-за Великой депрессии 1929–1933 гг. был наиболее интенсивным (1931–1935 гг.).

За первую половину 1930-х гг. СССР выпустил больше самолетов, чем любая другая страна мира. Рис. 6 показывает, что и среди пассажирских самолетов его доля в это время была велика. Но во второй половине 1930-х гг. авиастроение всех европейских стран быстро милитаризовалось, и выпуск пассажирских самолетов в них снизился в несколько раз. Большая доля «прочих» стран в 1936–1940 годах – это прежде всего рост выпуска пассажирских самолетов в Италии и Японии. Только в 1939 г., например, в Японии построили 302 таких самолета.

Естественно, падение продолжилось и в годы Второй мировой войны. Только в США продолжался значительный выпуск именно пассажирских самолетов (военно-транспортные С-46, С-47, С-121 и т. д. мы, естественно, пассажирскими не считаем), но и они использовались прежде всего для войсковых перевозок.

Окончание войны оживило спрос на перевозку по воздуху. Интересно, что новый взлет произошел отнюдь не в США, а в двух европейских странах: Великобритании и СССР. В 1950-х гг. по числу самолетов (а во второй половине десятилетия – и по их пас-

сажировместимости) СССР занимал ведущее место в мире.

В начале 1960-х произошел очень резкий спад. В нашей стране принято объяснять его волонтаристскими решениями властей, прекращением выпуска многочисленных небольших самолетов Ан-2 и Ил-14, отвлечением сил на ракетно-космическую область [4] и другими национальными причинами. Но рис. 6 показывает, что спад был резким и всеобщим, он затронул и СССР, и Великобританию, и США. Только одна страна демонстрировала бурный рост – это Польша, в которой по лицензии начали массово выпускать самолеты Ан-2.

Во второй же половине 1960-х вновь произошел резкий скачок выпуска во всех ведущих странах, сравнимый только с бумом второй половины 1920-х гг. При этом изменения были не только количественные, но и качественные: так, в 1969 г. взлетел первый широкофюзеляжный авиалайнер Boeing 747.

Затем мировое производство, после переколебания в начале 1970-х, стабилизировалось примерно на одном уровне. Однако распределение долей сильно менялось. Великобритания, СССР и Польша с середины 1970-х гг. сдавали позиции, доля США постоянно росла, а в Европе появился новый сильный игрок – компания Airbus. В результате к началу 1990-х гг. в мире сложилась устойчивая дуополия: США, где самой сильной компанией после слияния с фирмой «Макдоннел – Дуглас» стала фирма Boeing, и Европа, прежде всего – концерн Airbus. Эту дуополию уже 30 лет пытаются нарушить другие игроки: Бразилия, Канада, в последние годы КНР, но она до сих пор сохраняется, причем доля европейского дуополиста растет.

Стабилизация выпуска в последней четверти века отнюдь не означала прекращение развития отрасли, и это отчетливо видно на рис. 7, 8. Самолеты стали намного тяжелее и вместительнее. Если количество пассажирских самолетов меньше 3 % от общего выпуска, то их суммарная масса – примерно $\frac{1}{6}$ массы всех самолетов, построенных в XX веке.

⁶ Airmail history in pictures, 1918-1928 [Электронный ресурс] // Washington: USPS. 2018. 14 p. URL: <https://about.usps.com/who/profile/history/pdf/airmail-history-in-pictures.pdf> (дата обращения: 22.11.2022).

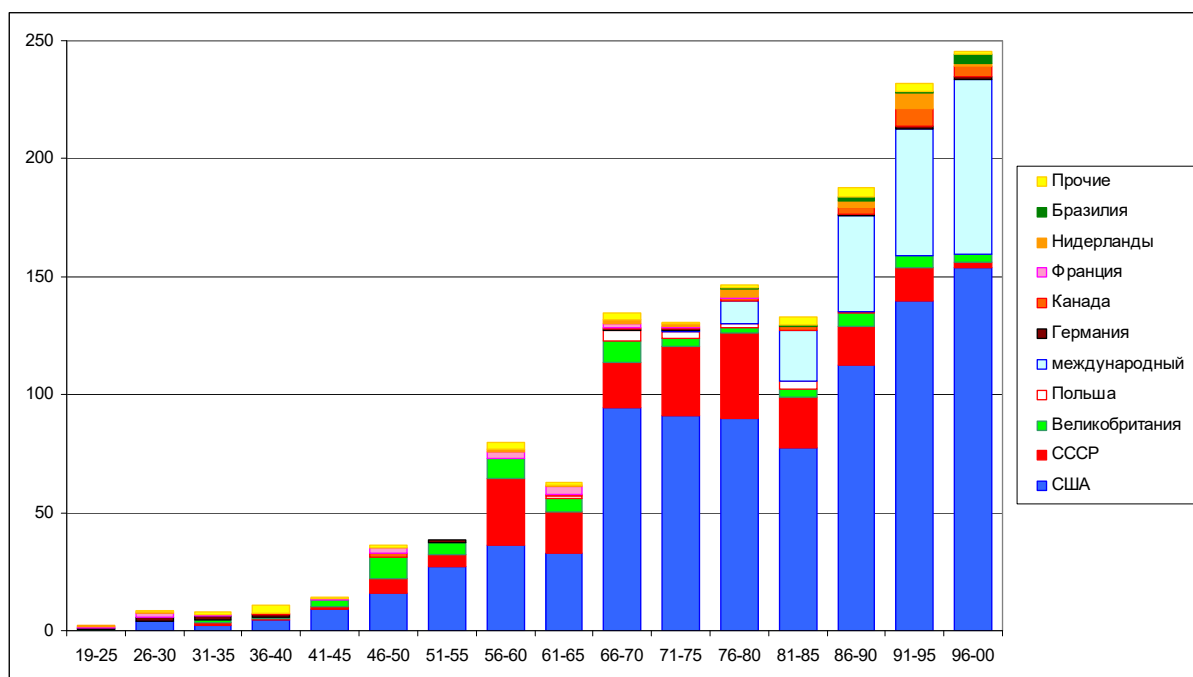


Таблица 2
Table 2

Производство пассажирских самолетов в ведущих странах в XX веке (тысяч тонн)
Production of passenger airplanes in leading countries in XX century (thousands of tons)

Период	USA	RUS	UK	POL	INT	GER	CAN	FRA	NED	BRA	Прочие	Всего
19–25	0,2	0,0	0,5	0,0	0,0	0,7	0,0	0,6	0,1	0,0	0,4	2,4
26–30	3,7	0,1	0,3	0,1	0,0	1,8	0,0	1,1	0,6	0,0	0,8	8,4
31–35	2,3	1,3	0,6	0,0	0,0	1,7	0,0	0,9	0,1	0,0	0,9	7,8
36–40	4,3	0,7	0,9	0,0	0,0	1,1	0,2	0,3	0,0	0,0	3,4	10,9
41–45	8,9	1,1	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	1,1	14,4
46–50	15,9	6,0	9,4	0,0	0,0	0,0	1,4	2,5	0,0	0,0	0,8	36,1
51–55	27,2	4,8	5,3	0,0	0,0	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	38,4
56–60	36,4	28,2	8,4	0,0	0,0	0,1	0,0	2,6	1,3	0,0	2,7	79,7
61–65	33,1	17,4	5,7	1,0	0,0	0,0	0,3	3,7	0,8	0,0	0,8	62,7
66–70	94,6	19,0	9,1	4,8	0,0	0,2	0,9	1,5	1,6	0,0	2,8	134,3
71–75	91,3	29,3	3,0	2,9	1,0	0,2	0,6	0,8	0,8	0,3	0,5	130,7
76–80	89,9	36,1	2,4	1,6	9,5	0,2	1,4	0,5	3,1	0,7	1,1	146,4
81–85	77,7	21,2	3,6	3,0	21,5	0,3	1,6	0,0	0,0	0,5	3,4	132,8
86–90	112,4	16,7	5,5	0,5	40,9	0,4	2,8	0,0	3,1	1,6	4,0	187,8
91–95	139,8	13,8	5,2	0,1	54,0	0,6	7,4	0,0	7,1	0,6	3,2	231,8
96–00	154,1	1,8	3,3	0,1	74,6	1,0	4,6	0,0	0,7	4,0	1,3	245,5
Итого	891,6	197,5	66,0	14,1	201,6	9,0	21,3	14,9	19,4	7,6	27,0	1470,2

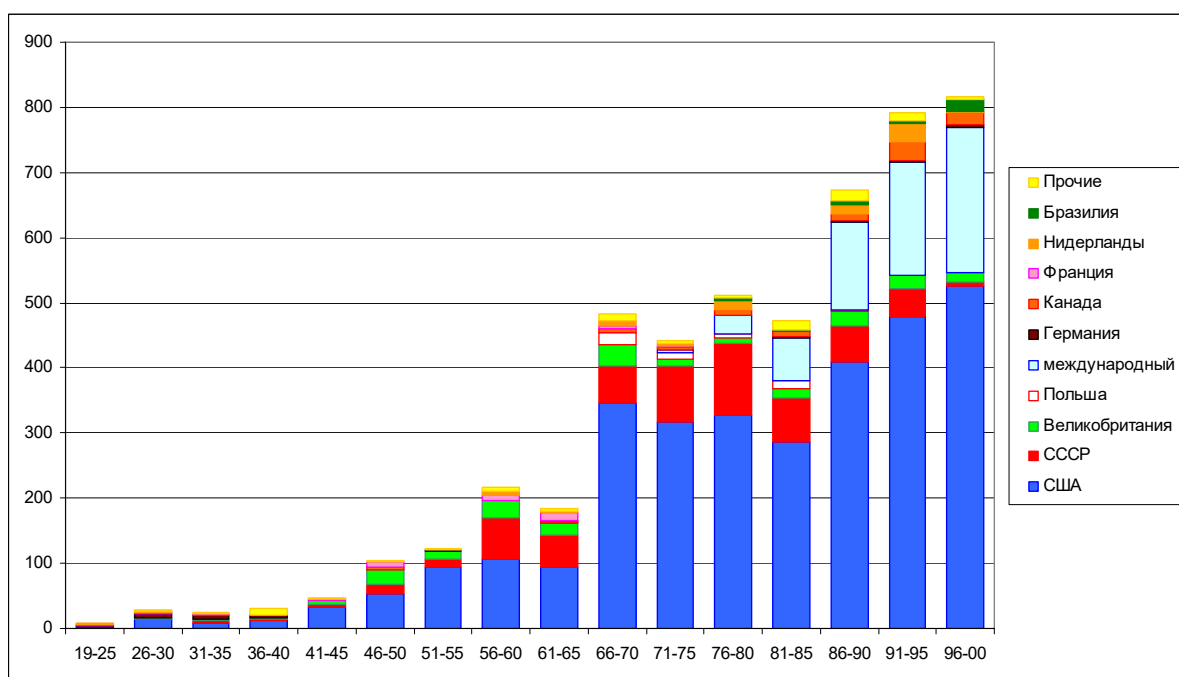


Рис. 8. Производство пассажирских самолетов в XX веке (тысяч пассажиро-мест)
Fig. 8. Production of passenger airplanes in XX century (passenger capacity, thousands)

Таблица 3
Table 3

Производство пассажирских самолетов в ведущих странах в XX веке
(тысяч пассажиро-мест)
Production of passenger airplanes in leading countries in XX century
(passenger capacity, thousands)

Период	USA	RUS	UK	POL	INT	GER	CAN	FRA	NED	BRA	Прочие	Всего
19–25	1	0	2	0	0	2	0	2	1	0	1	9
26–30	15	0	1	0	0	6	0	3	2	0	2	29
31–35	8	4	3	0	0	6	0	2	0	0	2	25
36–40	13	2	2	0	0	2	1	1	0	0	8	30
41–45	33	3	7	0	0	0	0	1	0	0	3	48
46–50	53	14	24	0	0	0	3	8	0	0	2	104
51–55	93	13	13	0	0	2	0	0	0	0	0	122
56–60	106	63	27	0	0	0	0	8	5	0	7	217
61–65	95	48	18	4	0	0	1	12	3	0	3	184
66–70	345	58	33	18	0	0	5	5	7	0	11	483
71–75	317	86	10	11	3	0	3	3	4	1	2	441
76–80	326	111	8	6	29	1	7	1	14	4	4	512
81–85	287	66	14	12	67	2	7	0	0	2	14	472
86–90	410	54	23	2	135	2	12	0	13	7	17	674
91–95	478	44	21	1	173	2	28	0	30	3	14	792
96–00	527	6	13	0	224	4	18	0	3	18	5	817
Итого	3105	573	219	54	631	29	86	47	82	35	98	4958

Таблица 4
Table 4

Изменение средней пассажировместимости пассажирского самолета и средней массы конструкции на одного пассажира по пятилетним периодам для СССР, США и прочих стран
Dynamics of average passenger capacity (left) and average mass (right) of structure per person by five-year periods for the USSR, the USA and other countries

Пассажиров	США	СССР	Остальные	кг/пасс.	США	СССР	Остальные
19–25	7,2	3,9	6,4	19–25	240	315	293
26–30	6,1	4,7	7,0	26–30	254	389	333
31–35	11,5	7,4	9,0	31–35	300	348	244
36–40	16,7	13,0	13,0	36–40	336	340	377
41–45	42	21	29	41–45	269	343	415
46–50	67	22	35	46–50	303	420	395
51–55	83	15	35	51–55	291	372	409
56–60	90	31	57	56–60	344	444	309
61–65	124	58	46	61–65	348	366	312
66–70	156	61	29	66–70	274	328	271
71–75	238	62	24	71–75	288	340	303
76–80	204	106	39	76–80	275	325	299
81–85	166	154	41	81–85	270	320	252
86–90	177	190	72	86–90	274	312	237
91–95	192	183	89	91–95	293	315	251
96–00	187	150	112	96–00	293	308	253

Именно качественная эволюция самолетов в основном позволила нарастить мировой воздушный пассажиропоток с 0,8 млрд пассажиров в 1980 г. до 1,8 млрд пассажиров в 2000 г. – в 2,25 раза⁷. За следующие 16 лет перевозки вновь удвоились, до 3,6 млрд пассажиров в год [11]. Объем же выпуска возрос заметно слабее, в том числе и по количеству пассажиро-мест. Следовательно, происходило не только увеличение вместимости парка, но и рост интенсивности эксплуатации самолетов, связанный с увеличением их надежности, отработкой более эффективных наземных процедур, сокращающих время между рейсами на земле, и увеличением ресурса, а значит, и срока эксплуатации.

⁷ World air passenger traffic evolution, 1980-2020 [Электронный ресурс] // International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/world-air-passenger-traffic-evolution-1980-2020> (дата обращения: 22.11.2022).

Динамика пассажировместимости и весовая отдача

Собранные данные позволили построить динамику изменения средней пассажировместимости самолета и средней массы конструкции на одного пассажира. Результаты приведены в табл. 4 и на рис. 9 и 10.

Монотонный рост вместимости до войны сменился застоем и даже провалом (в СССР). Причину такого синхронного изменения динамики стоило бы изучить подробнее. Но в 1960-е гг. США начали вновь резко увеличивать размерность самолетов.

В Европе, напротив, национальная авиапромышленность Франции и Великобритании, Германии и Нидерландов снижала темы выпуска и все больше ориентировалась на самолеты для региональных линий. Новый подъем связан с новым синтезом – деятельностью многонационального концерна Airbus.



Рис. 9. Изменение средней пассажировместимости пассажирского самолета в XX веке
Fig. 9. Dynamics of average passenger capacity of the passenger airplane in XX century

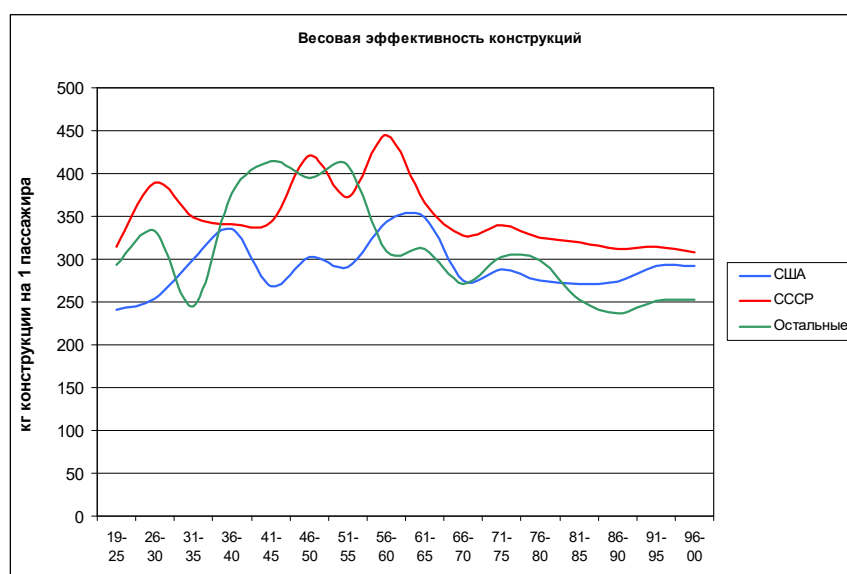


Рис. 10. Изменение массы конструкции пассажирского самолета в расчете на одного пассажира, кг
Fig. 10. Dynamics of the passenger airplane dead weight per passenger, kg

Рост средней пассажировместимости в СССР начался на полтора десятилетия позже, чем в США, но к 1980-м гг. по этому показателю страна догнала лидера. Однако паритет длился недолго. Резкий загиб вниз графика пассажировместимости для России во второй половине 1990-х гг. связан с колоссальным снижением производства и тем достаточно случайным фактом, что из всего 39 пасса-

жирских самолетов, построенных в стране за пятилетку, 7 оказались самолетами местных линий: два Ан-3 и пять Ан-38-100.

Масса на одного пассажира (рис. 10) зависит не только от весового совершенства конструкции, но и от дальности: большая дальность требует больше топлива, что ведет к существенному росту массы. Полные данные по дальности пока не собраны, однако вряд

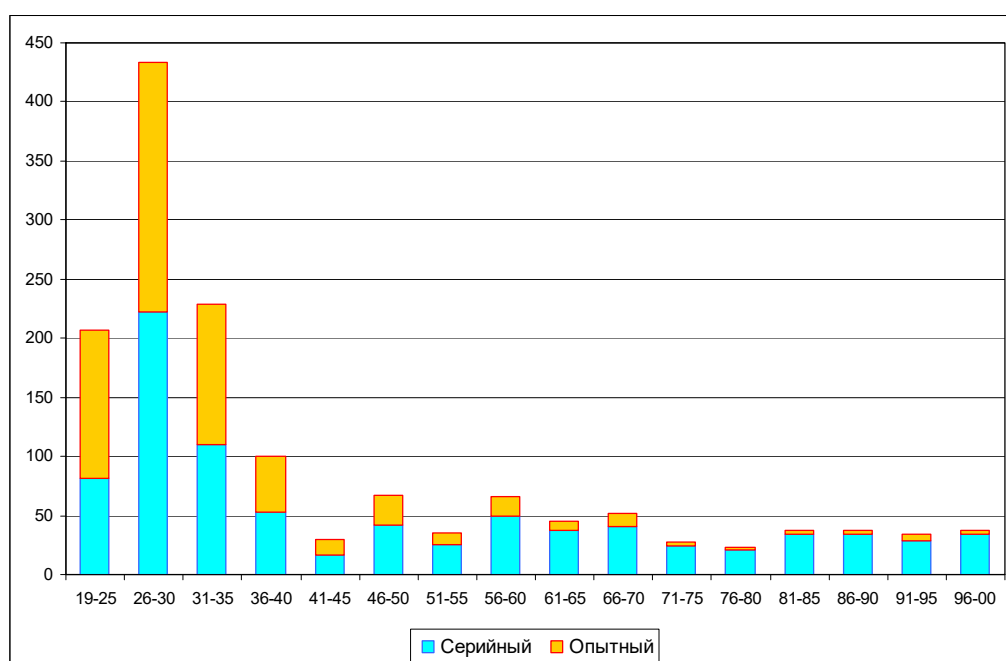


Рис. 11. Число новых моделей пассажирских самолетов по пятилетним периодам
Fig. 11. The number of new passenger airplane models by five-year periods

ли средневзвешенная дальность полета советских самолетов превышала дальность американских.

Видно, что весовая культура послевоенных советских самолетов несколько уступала конкурентам. Впечатляет также очень высокое весовое совершенство самолетов Airbus (кривая «Остальные»).

График на рис. 10 четко делится на три периода: поисковый – первая половина века с весьма существенными колебаниями показателя; эволюционный – 1960-е гг., переход к самолетам большей размерности с меньшей массой в расчете на одного пассажира; стабильный – медленное постепенное совершенствование конструкций без заметных колебаний.

По мнению автора, такие фазы характерны для любой развитой технологии. Подобное поведение удельных параметров наблюдалось и для четырехмоторных самолетов.

Разработка пассажирских самолетов

С 1919 по 2000 год в 30 странах сконструировали 1 460 моделей пассажирских самолетов (учтены только конструкции, доведенные

до стадии испытаний). Почти 60 % из них (854) строились серийно, это выше, чем в целом по индустрии. По данным автора, за тот же период из 17 300 испытанных моделей самолетов всех классов до серийного выпуска дошли 8 800, то есть чуть больше половины. При этом «серией» считается и выпуск из наборов или постройка любителями по распространяемым чертежам.

Частота появления новых моделей была максимальной в годы, предшествующие Великой депрессии, затем монотонно снижалась и стабилизировалась на уровне чуть ниже 40 моделей в год в последнюю четверть века. Но коэффициент успеха – доля серийных самолетов в общем числе разработок – монотонно рос (рис. 11) и к концу века превысил 90 %. Таким образом, разработка пассажирского самолета, не дошедшего до серии, сейчас должна считаться недопустимым провалом.

Если в выпуске самолетов «провальными» оказались 1961–1965 гг., то минимум разработок произошел на десятилетие раньше, он приходится на годы Корейской войны. Связь между этими двумя событиями интересно исследовать подробнее.

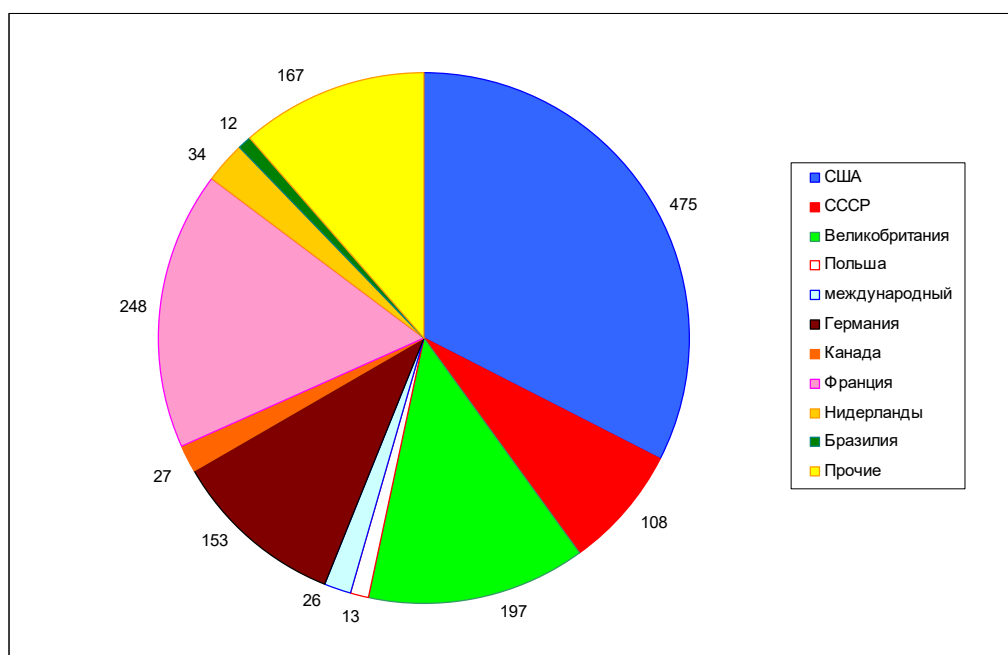


Рис. 12. Число моделей пассажирских самолетов, испытанных в 1919–2000 гг., по странам
Fig. 12. The number of passenger airplane models tested over a period of 1919–2000 by countries

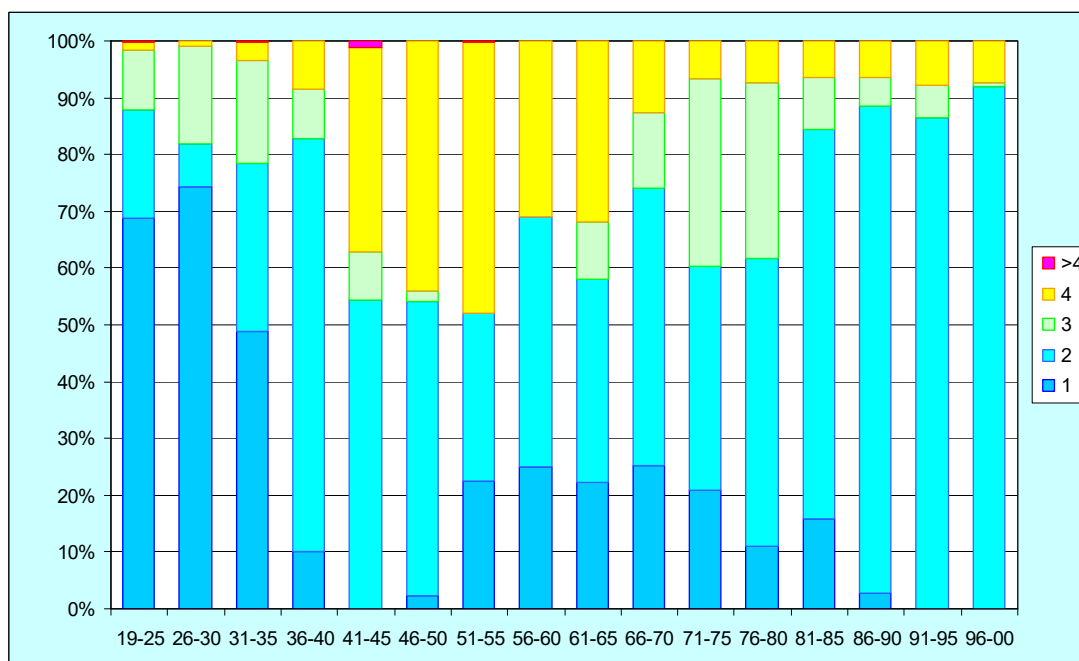


Рис. 13. Распределение пассажирских самолетов мира по числу двигателей
Fig. 13. Distribution of passenger airplanes of the world by number of engines

Видно, что тиражность, а значит, и отдача от разработок, в США и особенно в СССР была заметно выше среднемировой.

Относительная неуспешность британских, немецких и французских разработок (моде-

лей создано много, а общий выпуск невелик) связана с тем, что пик активности по производству пассажирских самолетов в этих странах пришелся на довоенные годы, когда и средние тиражи были гораздо меньше.

Тиражность пассажирских самолетов, то есть отношение общего выпуска к числу моделей, намного ниже, чем в среднем, всего около 40 против примерно 100 для всех самолетов мира. Для сравнения: тиражность более легких четырехмерных самолетов общего назначения – 230. Это объясняется более высокой стоимостью пассажирских машин.

На рис. 12 показано количество моделей пассажирских самолетов за весь век по странам-разработчикам. Если в процессе лицензионного производства в конструкцию вносились существенные изменения, то новая модель приписана к стране-производителю, а не изначальному разработчику типа. Так, Ли-2П считается советским самолетом. Структура базы данных позволяет пересчитать числа исходя из других предположений, например приписав все модели данного типа к разработчику исходной модели. Но в данной статье сделано по-другому.

Объем статьи не позволяет представить более подробный анализ, в том числе по странам и конструкторским школам, хотя данные позволяют его провести. Не помещился и анализ изменения конструкции самолетов, их аэродинамических схем и силовых установок. Поэтому ограничимся только одним рис. 13. На нем представлена доля в мировом выпуске (в штуках) пассажирских самолетов с разным числом двигателей.

Представляет интерес рост числа одномоторных самолетов после Второй мировой войны (среди них подавляющую часть составляют Ан-2) и исчезновение этого подкласса к концу века; второй ренессанс трехмоторных самолетов, от BN-2 Trislander до Ту-154 и Douglas DC-10, причем более масштабный, чем в 1920-30-х гг.; увлечение четырехмоторными самолетами в 1940-60-е гг. и оттеснение этого подкласса в последние 30 лет в устойчивую нишу с долей на рынке объемом менее 10 %.

Выводы

За весь XX век было построено всего 60 000 пассажирских самолетов. Это менее 3 % от общего выпуска самолетов всех клас-

сов. Суммарная вместимость их – менее 5 млн человек, или менее тысячной доли населения Земли к концу прошлого столетия. И эти 60 000 самолетов обеспечили невиданную раньше мобильность населения.

Приведенные выше данные о выпуске с разбивкой по пятилетним периодам и странам, изменению пассажировместимости, удельной массы конструкции и удельной доли самолетов с различным количеством двигателей могут быть полезны при выявлении тенденций развития пассажирского самолетостроения – важнейшей части авиастроительной отрасли.

Автор выражает глубокую благодарность вице-президенту Ассоциации производителей самолетов общего назначения GAMA (General Aircraft Manufacturer Association) Йенсу Хеннигу (Jens C. Hennig), США, предоставившему автору сводные таблицы по выпуску самолетов за 1947–2000 гг., составленные на основе ежегодных отчетов GAMA.

Список литературы

1. **Соболев Д.А.** История развития пассажирских самолетов (1910–1970-е годы). М.: Русские Витязи, 2018. 264 с.
2. **Kuzmin Yu.V.** The contribution of different countries to airplane development and manufacture – How many airplanes were there? [Электронный ресурс] // In: Proceedings 29th ICAS (International Congress for Aeronautical Sciences). 2014. URL: www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2014/data/papers/2014_1036_paper.pdf (дата обращения: 22.11.2022).
3. **Кузьмин Ю.В.** Мировая самолетостроительная промышленность XX века: количественный анализ // Исторический журнал: научные исследования. 2022. № 3. С. 1–20. DOI: 10.7256/2454-0609.2022.3.38375
4. **Кузьмин Ю.В.** Спад производства самолетов в СССР в 1980-х годах: статистический анализ базы данных // Историческая информатика. 2019. № 2. С. 106–146. DOI: 10.7256/2585-7797.2019.2.29402
5. **Кузьмин Ю.В.** Библиографический справочник по самолетам XX века. М.: ИИЕТ РАН, 2021. 559 с.

6. История отечественной авиапромышленности. Серийное самолетостроение, 1910–2010 гг. / Под общ. ред. Д.А. Соболева. М.: Русское авиационное общество, 2011. 432 с.
7. **Luranc Z.** Antonov An-2. Pierwsze 50 lat. Avia-Press, 1997. 48 p.
8. **Якубович Н.В.** Многоцелевой самолет Ан-2 // Авиаколлекция. 2012. № 5. 32 с.
9. **Herris J.** Friedrichshafen aircraft of WWI. Reno: Aeronaut Books, 2016. 312 p.
10. **Neustädt R.** Das große Flugzeug-Typenbuch. Berlin: VEB Verlag, 1982. 607 p.
11. **Champion C.** Aerospace in 2050 [Электронный ресурс] // In: 31th International Congress for Aeronautical Sciences. Belo Horizonte. September 2018. URL: www.icas.org/media/pdf/ICAS_Congress_General_Lectures/2018/ICAS_2018_Champion.pdf (дата обращения: 22.11.2022).

References

1. **Sobolev, D.A.** (2018). History of passenger airplanes development. Moscow: Russkiye Vityazi, 264 p. (in Russian)
2. **Kuzmin, Yu.V.** (2014). The contribution of different countries to airplane development and manufacture – How many airplanes were there? In: *Proceedings 29th ICAS (International Congress for Aeronautical Sciences)*. Available at: www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/

ICAS2014/data/papers/2014_1036_paper.pdf (accessed: 22.11.2022).

3. **Kuzmin, Yu.V.** (2022). The world aircraft industry of the XX century: quantitative analysis. *History Magazine: Researches*, no. 3, pp. 1–20. DOI: 10.7256/2454-0609.2022.3.38375 (in Russian)
4. **Kuzmin, Yu.V.** (2019). USSR aircraft industry decrease in the 1980s: database statistical analysis. *Historical Informatics*, no. 2, pp. 106–146. DOI: 10.7256/2585-7797.2019.2.29402 (in Russian)
5. **Kuzmin, Yu.V.** (2021). Bibliographical guide for XXth century airplanes. Moscow: IET RAN, 559 p. (in Russian)
6. **Sobolev, D.A.** (Ed.). (2011). The history of domestic aircraft industry. Moscow: Russkoye aviatsionnoye obshchestvo, 431 p. (in Russian)
7. **Luranc, Z.** (1997). Antonov An-2. Pierwsze 50 lat. Avia-Press, 48 p. (in Polish)
8. **Jakubovich, N.V.** (2012). Multipurpose An-2 airplane. *Aviakollektsiya*, no. 5, 32 p. (in Russian)
9. **Herris, J.** (2016). Friedrichshafen aircraft of WWI. Reno: Aeronaut Books, 312 p.
10. **Neustädt, R.** (1982). Das große Flugzeug-Typenbuch. Berlin: VEB Verlag, 607 p. (in German)
11. **Champion, C.** (2018). Aerospace in 2050. In: *Proceedings 31th ICAS*. Belo Horizonte, 2018. Available at: www.icas.org/media/pdf/ICAS_Congress_General_Lectures/2018/ICAS_2018_Champion.pdf (accessed: 22.11.2022).

Сведения об авторе

Кузьмин Юрий Викторович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Института истории естествознания и техники им. С.И. Вавилова РАН, ykuzmin@rambler.ru.

Information about the author

Yuri V. Kuzmin, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, S. Vavilov Institute for the History of Science and Technology, RAS, ykuzmin@rambler.ru.

Поступила в редакцию 27.01.2023
Принята в печать 25.05.2023

Received 27.01.2023
Accepted for publication 25.05.2023

ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

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

2.9.4. – Управление процессами перевозок;

2.9.6 – Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники;

2.9.8 – Интеллектуальные транспортные системы

УДК.629.7.067.8

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-25-37

**Возможности и недостатки систем предупреждения выкатывания
воздушного судна за пределы взлетно-посадочной полосы**

С.Ф. Бородин¹, А.И. Волынчук¹, М.А. Киселев¹, Ю.В. Петров¹
*¹Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

Аннотация: В настоящее время все большее внимание авиационной общественности и властей уделяется безопасности полетов на этапе посадки. Это объясняется повышенной частотой инцидентов на финальном этапе полета и значительными угрозами, связанными с последствиями этих событий. Статистика авиационных происшествий показывает, что с 1959 по 2019 год 55 % всех катастроф в мире произошли на этапах посадки и взлета. Указанные катастрофы стали причинами 51 % всех смертельных случаев на борту воздушных судов. В большинстве случаев причины этих авиационных происшествий связаны с каким-либо видом человеческой ошибки. Нерасчетные условия на аэродроме также оказывают значительное негативное влияние на вероятность и тяжесть авиационных происшествий. Растущая интенсивность полетов и загруженность воздушного пространства, жесткие ограничения, налагаемые управлением воздушного движения, необходимость выполнения множества процедур и общее напряжение экипажа в сочетании с динамически изменяющимися внешними условиями способны дезориентировать экипаж и привести к посадке с превышением установленных ограничений. Поиск решения в части предотвращения выкатываний воздушного судна за пределы взлетно-посадочной полосы активно ведется как на уровне авиационных властей, так и на уровнях производителей и эксплуатантов. В рамках данной обзорной статьи проанализированы основные внешние и эксплуатационные факторы, влияющие на динамику и характер пробега воздушного судна по взлетно-посадочной полосе, в том числе на примере нескольких катастроф, произошедших за последние годы. Кроме того, в статье особое внимание уделено рассмотрению методов предотвращения и предупреждения выкатываний воздушного судна на основе принципов активной защиты. В частности, в статье рассмотрены основные аспекты работы бортовых электронных систем, устанавливаемых на воздушных судах производства Boeing и Airbus, выделены возможные направления их совершенствования. Особое внимание уделено влиянию пилота и возможности учета его действий в прогнозировании исхода посадки.

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

Для цитирования: Бородин С.Ф. Возможности и недостатки систем предупреждения выкатывания воздушного судна за пределы взлетно-посадочной полосы / С.Ф. Бородин, А.И. Волынчук, М.А. Киселев, Ю.В. Петров // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 3. С. 25–37. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-25-37

Aircraft overrun warning systems capabilities and disadvantages

S.F. Borodkin¹, A.I. Volynchuk¹, M.A. Kiselev¹, Yu.V. Petrov¹
¹Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract: Currently, attention of the aviation community and authorities is being increasingly focused on flight safety in the landing phase. It is accounted for the increased frequency of incidents in the final phase of flight and significant threats associated

with the consequences of these events. The statistics of aviation accidents reveals that from 1959 to 2019, 55% of aircraft crashes in the world occurred in the phases of landing and takeoff. The given crashes resulted in 51% of all fatalities on board aircraft. In most cases, causes of these aviation accidents are involved with some kind of human error. Off-design conditions at an aerodrome also have a significant adverse effect on the aviation accident potential and severity. The increasing intensity of flights, airspace congestion, strict ATC-imposed restrictions, the necessity to perform a variety of procedures and general flight crew stress in conjunction with dynamically changing external conditions can disorient a flight crew and lead to a landing with a flight envelope overrange. The search for a solution in terms of preventing aircraft overruns is actively being conducted both by aviation authorities and aircraft manufacturers and operators. Within the framework of this review, the major external and operational factors, affecting the dynamics and the nature of the aircraft roll via the runway, are analyzed, including the context of several accidents that have occurred in recent years. In addition, the article emphasizes the methods to prevent and anticipate aircraft overruns based on the principles of active protection. In particular, the article examines the main operation aspects of onboard avionics systems installed on Boeing and Airbus aircraft and highlights the focus areas of their upgrading. Special attention is paid to the influence of the pilot and the possibility of taking his actions into account to predict an outcome of landing.

Key words: landing, runway (RWY), overrun, overshooting, flight safety, avionics, airfield.

For citation: Borodkin, S.F., Volynchuk, A.I., Kiselev, M.A., Petrov, Yu.V. (2023). Aircraft overrun warning systems capabilities and disadvantages. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 3, pp. 25–37. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-25-37

Введение

Обеспечение безопасной посадки остается важной задачей для отрасли из-за высокой интенсивности происшествий на взлетно-посадочной полосе (ВПП), к которым относятся: выкатывание с ВПП; столкновение на ВПП; недолет/перелет ВПП; удары хвостом и случаи жесткой посадки.

Выкатывание с ВПП (рулежной дорожки (РД)) является наиболее частой категорией авиационных происшествий (АП), на долю которых приходится 27 % всех авиационных событий за период с 2010 по 2020 год¹. В среднем по всему миру на гражданские воздушные суда (ВС) приходится не менее 18 происшествий в год, связанных с выкатыванием за пределы ВПП/РД. Выкатывания могут привести к гибели и (или) травмам людей либо на борту ВС, либо на земле. Кроме того, в результате выкатывания на значительной скорости может быть повреждена инфраструктура аэропорта, не считая вероятности полной потери самого ВС [1–3]. В общей сложности за 10 лет было выявлено более 190 АП, связанных с выкаткой ВС за пределы ВПП или РД. Хотя выкатывания с ВПП яв-

ляются наиболее распространенным типом АП, связанный с этим уровень смертности намного ниже, чем в таких категориях, как потеря контроля в полете (LOC-I) или столкновение с землей в управляемом полете (CFIT). Тем не менее с учетом прочих рисков необходимость превентивных мер очевидна².

На первом этапе в качестве мер борьбы с выкатыванием авиакомпания разрабатывали собственные процедуры и стандарты безопасности, включавшие в себя рекомендации по методике пилотирования, критериям стабилизированного захода и процедуры прерванного захода на посадку при условии нестабилизированного захода или наличия иных факторов опасности. Дальнейшее тесное сотрудничество между основными заинтересованными сторонами (эксплуатантами, производителями авиационной техники и органами управления гражданской авиации (ГА)) привело к ряду законодательных и рекомендательных решений, включая инструментарий снижения риска выкатывания с ВПП (RERR Toolkit), который был разработан IATA в сотрудничестве с Фондом безопасности полетов (FSF)³. Второе издание этого инструментария

¹ Flight safety foundation. FSF Alar Tool Kit [Электронный ресурс] // ainonline. 2010. URL: <https://www.ainonline.com/aviation-news/aviation-international-news/2010-08-01/fsf-updates-alar-tool-kit> (дата обращения: 10.06.2022).

² Safety report 2020. 57th ed. // IATA, 2021. 244 p.

³ Global action plan for the prevention of runway excursions (GAPPRE) [Электронный ресурс] // Eurocontrol. Parts 1 and 2, 5 May 2021. URL: <https://www.eurocontrol.int/publication/global-action-plan-prevention-runway-excursions-gappre> (дата обращения: 10.06.2022).

было подготовлено в сотрудничестве между IATA и ICAO (при участии ACI, CANSO, IFATCA, EUROCONTROL, NLR, FSF) и Австралийским бюро транспортной безопасности. Относительно недавно IATA, ICAO, ACI, CANSO, ICCAIA, FSF, IFALPA, IFATCA, IBAC, IAOPA, FAA, EASA и Евроконтролем был разработан комплект обеспечения безопасности на ВПП (Runway Safety i-Kit), включающий в себя следующие процедуры и данные:

- 1) сбор и анализ статистики о безопасности полетов на этапах взлета/посадки;
- 2) готовые учебные модули и типовые планы образовательных программ переподготовки и повышения квалификации летного состава;
- 3) презентации и анимацию для повышения наглядности учебных курсов;
- 4) анализ передового опыта и предоставление площадок для взаимного обсуждения в виде конференций и симпозиумов⁴.

Однако несмотря на значительные усилия в области организационных методов, статистика выкатываний с ВПП за последние годы изменилась незначительно. Поэтому параллельно с организационными методами проводится разработка технических методов, которые можно разделить на наземные и бортовые, то есть реализуемые на борту ВС. Очевидно, что наиболее действенным методом борьбы с выкатыванием является увеличение длины ВПП [4, 5]. Однако указанный подход требует значительных материальных затрат и в силу, например, географических особенностей, не всегда возможен. Поэтому большей перспективой, на наш взгляд, обладают бортовые системы, способные прогнозировать дистанцию пробега ВС и предупреждать экипаж о риске выкатывания, устраняя тем самым угрозу наступления факта выкатывания [6].

Рассмотрим подробнее факторы опасности, обуславливающие риск выкатывания,

и проанализируем возможности и недостатки существующих бортовых систем предотвращения выкатываний ВС за пределы ВПП.

Факторы опасности, обуславливающие риск выкатывания

АП на этапе взлета/посадки нельзя свести к действию какого-то одного фактора. Однако во многом указанные АП обусловлены переходом от монотонного полета, выполняемого, как правило, в автоматическом режиме, к режиму полета, требующему постоянного максимального внимания, использования визуальных ориентиров и предполагающего выполнение множества процедур и действий⁵ [7–9]. Среди наиболее частых ошибок пилота на этапе посадки можно выделить следующие [10]:

- 1) неправильный расчет посадочных характеристик ВС;
- 2) нестабилизированный заход на посадку;
- 3) затягивание или отказ от ухода на второй круг в соответствующих условиях;
- 4) несвоевременный или неправильный выпуск взлетно-посадочной механизации;
- 5) затягивание этапа выдерживания;
- 6) «козление»;
- 7) ошибки в управлении тягой, реверсом, торможением.

Среди факторов, способствующих АП на посадке, выделяют [7, 11]:

- состояние поверхности ВПП, не соответствующее прогнозируемому (вода, лед и т. п.);
- состояние атмосферы, не соответствующее прогнозируемому (ветер, осадки, видимость);
- отказы систем и агрегатов ВС, влияющих на посадочные характеристики ВС;
- уклон ВПП.

При этом исправление допущенных ошибок на посадке ограничено крайне малыми

⁴ Runway safety programme [Электронный ресурс] // ICAO. URL: https://applications.icao.int/tools/rsp_ikit/story_html5.html (дата обращения: 10.06.2022).

⁵ Human-rating requirements and guidelines for space flight systems. NPG: 8705.2 [Электронный ресурс] // NASA, 2003. 40 p. URL: https://klabs.org/DEI/References/design_guidelines/human_rating_n_pg_8705_0002.pdf (дата обращения: 10.06.2022).

резервами времени и пространства, а также меньшей эффективностью аэродинамических рулей ВС в силу малого скоростного напора.

Таким образом, причины выкатывания за пределы ВПП могут быть сведены в следующие группы [10, 12].

1. Человеческий фактор (нестабилизованный заход на посадку, неправильная техника выравнивания, неправильные действия и (или) взаимодействие в экипаже при неблагоприятных метеоусловиях или нештатном техническом состоянии ВС и т. п.).

2. Недостаточное или неверное информирование экипажа (непредвиденные или значительно худшие, чем ожидалось, условия посадки).

3. Техническое состояние ВС (снижение эффективности или отказ устройств гашения подъемной силы или средств торможения, нештатная конфигурация ВС и т. п.).

4. Особенности аэропорта (географическое расположение, ограничивающее направление посадки и зоны маневрирования в районе аэропорта, уклоны ВПП, состояние поверхности ВПП и т. п.) [13, 14].

Человеческий фактор главенствует в причинах АП. Согласно статистике ИКАО в 45 % случаев причиной АП является именно человеческий фактор. Недостаточная подготовка, эмоциональная напряженность, усталость и ряд других факторов способны вызвать значительные отклонения в работе экипажа и, как следствие, нарушить план полета [12, 15].

Эксплуатационными факторами, влияющими на взлетно-посадочные характеристики, являются: посадочный вес, положение механизации крыла, скорость и направление ветра, состояние атмосферы, применение средств торможения, состояние и уклон ВПП⁶.

Обратимся к анализу недавних АП, связанных с выкатыванием ВС за пределы ВПП.

23 октября 2022 года в аэропорту Mactan Cebu International Airport (СЕВ) на посадке после третьей попытки приземлиться выка-

тился Airbus A330-300 авиакомпании Korean Air. Первые две попытки зайти на посадку закончились уходом на второй круг на относительно малых высотах (275 и 150 футов соответственно) фактически над порогом ВПП 22. На третьей попытке пилотом удалось посадить ВС, но темп торможения оказался недостаточным, и на скорости 80 узлов ВС выкатилось за пределы ВПП и остановилось в 360 м от торца полосы. В результате инцидента никто не пострадал. У ВС подломилась носовая стойка шасси и раскололся фюзеляж. В момент посадки рейса KE-631 наблюдалась гроза и ливневые осадки, порывы ветра достигали 10 м/с. На ВПП был слой воды.

7 августа 2020 года в международном аэропорту Каликут (Calicut International Airport (CCJ)) потерпел катастрофу Boeing 737-8HG авиакомпании Air-India Express, выполнявший регулярный рейс IX1344 по маршруту Дубай – Кожикод. Условия посадки были усложнены следующими обстоятельствами: аэродром с трех сторон окружен горами; торцы ВПП значительно возвышаются над рельефом; наклон глиссады при посадке с востока несколько больше стандартного; полоса в зоне приземления имеет положительный уклон. Согласно данным METAR в аэропорту в работе была полоса 28, переданное диспетчером экипажу значение ветра составляло 280 градусов, 5 узлов то есть ветер был строго встречным для этой полосы. Видимость в условиях умеренной грозы с дождем составляла 2000 метров с тенденцией снижения до 1500 метров при допустимом для захода ILS на эту полосу значении 1300. Экипаж выполнил попытку захода на посадку, которая не увенчалась успехом из-за низкой видимости в условиях сильного дождя – пилоты не видели необходимые ориентиры, кроме того, в самый неподходящий момент отказал дворник на лобовом стекле командира⁷. В итоге самолет ушел на круг, ожидая

⁶ Учебное пособие по аэродинамике [Электронный ресурс] // КГБОУ СПО «Комсомольский-на-Амуре авиационно-технический техникум». URL: <https://studfile.net/preview/2989748/page:13/> (дата обращения: 10.06.2022).

⁷ Катастрофа Боинга-737 в Кожикод (Индия) [Электронный ресурс] // Блог Fly safe. Небесные истории. URL: <https://denokan.livejournal.com/230207.html> (дата обращения: 10.06.2022).

разрешения совершить посадку на ВПП 10. После получения разрешения ВС приземлилось на ВПП 10 длиной 2860 м примерно в 1000 м за порогом ВПП, не смогло остановиться и упало в обрыв глубиной 35 м за торцом ВПП. Фюзеляж ВС раскололся на две части, оба пилота и 19 пассажиров погибли. Важно заметить:

- экипаж ни при первой попытке посадки, ни при второй не выполнял расчет потребной для посадки дистанции, что является обязательной процедурой, установив задатчик уровня автоматического торможения в положение «3», то есть задав не самый максимальный из возможных уровней автоматического торможения ВС;
- в момент прохода торца ВПП 10 скорость составляла 176 узлов (326 км/ч) на высоте примерно 450 футов (140 м) над поверхностью ВПП, что является неприемлемым для посадки на короткие ВПП в плохих погодных условиях (в момент посадки попутный ветер составлял около 9 узлов (17 км/ч));
- на борту было достаточно топлива для того, чтобы самолет ушел на запасной аэродром, однако пилоты приняли решение на уход на второй круг слишком поздно (расследование показало, что в момент катастрофы РУД находился в полностью переднем положении (take off go-around)), а спойлеры были убраны).

Методы снижения риска выкатывания за пределы ВПП

Основными методами снижения рисков выкатывания ВС за пределы ВПП являются организационные и технические. Последние в свою очередь разделяют на методы активной и методы пассивной защиты.

Как было отмечено выше, несмотря на активную работу органов управления гражданской авиации, организационные методы не повлияли должным образом на общую статистику происшествий, что наглядно показывает возрастающий тренд частоты выкатываний

за 2015–2020 годы (IATA)⁸. Создание нормативной базы не гарантирует ее безупречного исполнения. Согласно данным циркуляра FAA AC № 91-79А (один из главных современных циркуляров, определяющих пути обеспечения безопасности для пилотов, авиакомпаний, разработчиков самолетов, обучающих организаций в области снижения риска при выкатывании самолетов за пределы ВПП на этапе посадки) ключевым элементом безопасности, влияющим на риск выкатываний за пределы ВПП на посадке, является именно пилот [16].

Поэтому очевидна необходимость применения дополнительных барьеров безопасности. Как показывает практика, даже наиболее перспективные на сегодняшний день пассивные системы безопасности (концевые полосы безопасности EMAS) не обеспечивают достаточного уровня защиты. Так, не на всех ВПП существует возможность установить подобные конструкции (в том же аэропорту Карикур для концевой полосы безопасности физически нет места), а в некоторых случаях она может оказаться бесполезна, как, например, в случае выкатки тяжелого ВС на высокой скорости (как это произошло в Себу с A330 Korean Air). Поэтому еще в 1990-е годы конструкторы начали разработку активных методов борьбы с выкатыванием ВС⁹.

Системы предупреждения опасности выкатывания воздушного судна за пределы ВПП

Бортовые методы снижения риска выкатывания за пределы ВПП основаны на выработке управляющих воздействий на органы управления ВС экипажем на основе рекомендаций бортовых систем или же на выработке

⁸ Safety report 2021. 58th ed. // IATA, 2022. 269 p.

⁹ Runway condition assessment – moving toward an automated environment [Электронный ресурс] // In: Proceedings of Interregional Conference «Airport council international». Tampa, 15–17 September 2019. URL: <https://airportscouncil.org/wp-content/uploads/2019/09/Runway-Condition-Combined-Presentation.pdf> (дата обращения: 10.06.2022).

управляющих воздействий на органы управления автоматической бортовой системой без участия пилота.

Современные системы способны прогнозировать дистанцию посадочного пробега исходя из внешних условий и параметров ВС и в некоторых случаях отслеживать динамику движения по ВПП и выдавать экипажу рекомендации [7].

Первой подобной системой стала система предупреждения о положении ВС относительно ВПП (RAAS), разработанная корпорацией Honeywell в 2004 году. Базовая RAAS предоставляет экипажу информацию о положении ВС относительно ВПП во время движения на земле и функционирует путем подачи звуковых сообщений для подтверждения идентификации ВПП¹⁰. Система также информирует экипаж о попытке взлета с РД вместо назначенной ВПП. При посадке система определяет попытку посадки на заведомо короткую ВПП и ведет отсчет оставшейся длины полосы перед ВС при пробеге. Разработка системы стала возможной благодаря развитию систем предупреждения столкновения ВС с землей (TAWS, EGPWS). Для ее функционирования необходимы следующие исходные данные:

- координаты ВС в пространстве;
- абсолютная скорость ВС (относительно земли);
- курс ВС.

В 2009 году Honeywell расширила возможности RAAS, добавив системы SmartRunway и SmartLanding.

Система SmartRunway («умная ВПП») работает с существующим программным обеспечением (ПО) EGPWS Mark V и использует данные спутниковой навигационной системы (GPS) для выдачи рекомендаций на основе сравнения координат ВС с картой аэропорта, хранящейся в базе данных EGPWS.

Система SmartLanding («умная посадка») разработана для снижения риска несанкционированных выездов на ВПП. Согласно ста-

тистике АП за 2010–2020 года инциденты⁶, связанные с эксплуатацией в зоне аэропорта, и в частности несанкционированные выезды на ВПП, стали наиболее опасными и частыми событиями. Согласно данным NTSB (National Transportation Safety Board – Национальный совет по безопасности на транспорте) в США каждые 10 дней происходит как минимум один инцидент на ВПП. Система SmartLanding генерирует звуковые и текстовые сообщения на плановом навигационном приборе (HSI) при выявлении проблем во время посадки ВС, таких, например, как отклонение по высоте, превышение рекомендуемых пороговых значений скорости, неправильная посадочная конфигурация ВС, неверная настройка высотомера и др. Отметим, что для определения положения механизации и настройки высотомера система использует данные бортового компьютера.

В целом генерация сообщений системами SmartRunway и SmartLanding при появлении проблем на взлете/посадке обеспечивает экипажу возможность более спокойного пилотирования в «нормальном» режиме с перераспределением внимания от контроля приборов к анализу внешней обстановки, и способствует повышению стабильности выполнения всех процедур. В то же время RAAS и ее модификации при своем функционировании не учитывают возможное изменение обстановки в процессе посадки и реальную динамику ВС при движении по ВПП. Так, например, если при заходе на посадку Boeing 777-300ER в аэропорту Сочи (Адлер) на полосу 06/24 длиной 2895 м в условиях отсутствия ветра и дождя (в этих условиях RAAS одобрит посадку, так как длина ВПП соответствует требованиям безопасной посадки) начнется ливень, что уменьшит коэффициент сцепления до 0,5, и поднимется ветер курсом 60 градусов (попутный ветер в хвост) скоростью до 10 узлов (посадка в таких условиях допускается руководством по летной эксплуатации данного ВС (Flight Crew Manual)), то ожидаемая длина пробега увеличится с 1600 м на 130–150 % (рис. 1), что может стать причиной АП, поскольку во время пробега система не выдаст требования об уходе на вто-

¹⁰ Flight crew manual for Boeing 777 [Электронный ресурс] // zlibrary. URL: <https://zlibrary.to/pdfs/boeing-777-flight-manual> (дата обращения: 10.06.2022).

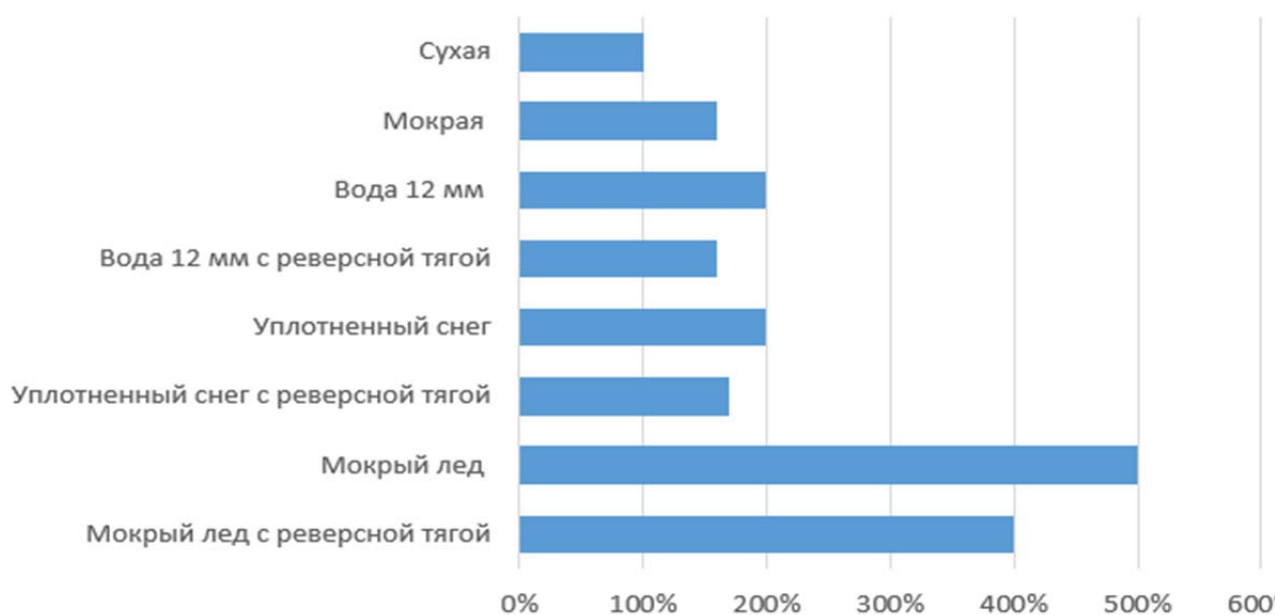


Рис. 1. Усредненные данные ИКАО по влиянию состояния поверхности ВПП на дистанцию посадочного пробега для ВС среднего размера с реверсивными устройствами средней эффективности

Fig. 1. The average ICAO data with reference to the effect of the runway surface condition on the medium-sized aircraft landing roll distance with medium efficiency thrust reversers

рой круг, информируя экипаж только об остаточной длине ВПП и факте достижения конца полосы.

Несколько лет назад на основе системы RAAS корпорацией Boeing было выпущено обновление в виде ПО Runway Situation Awareness Tools (RSAT) [17], в котором дополнительно реализованы следующие функции:

- предварительный расчет посадочной дистанции;
- определение точки ухода на второй круг;
- расчет предельного перелета при приземлении;
- генерация звуковых сообщений на выполнение требуемых процедур.

ПО RSAT может быть установлено на бортовом планшете (Electronic Flight Bag (EFB)) или бортовом компьютере (FMC). Исходными данными для расчета являются:

- вес ВС;
- давление воздуха на высоте аэродрома;
- скорость ветра (встречного или попутного);
- уклон ВПП в процентах;
- температура воздуха;
- расчетная погрешность скорости захода;

- положение закрылков;
- состояние ВПП (сухая/загрязненная);
- выбранный режим торможения (autobrake);
- количество доступных для торможения реверсов;
- режим работы спойлеров (авто или ручной);
- координаты ВС в пространстве;
- абсолютная скорость ВС;
- курс ВС.

Результат расчета выводится на экране планшета в виде двух потребных дистанций (сухая и загрязненная полоса) и подгружается в бортовой компьютер для мониторинга положения ВС и точности захода. В случае не выдерживания точности захода (перелет точки касания) система выдает предупреждение и рекомендует уход на второй круг и попутно сообщает остаток длины ВПП.

Интеграция RSAT в пакет EFB (достаточно дорогая опция) ограничивает его использование авиакомпаниями. Кроме того, система по-прежнему не учитывает динамику движения ВС по ВПП.

Первой системой, непрерывно анализирующей динамику движения ВС по ВПП, стала система Runway Overrun Prevention System (ROPS)¹¹, созданная Airbus в 2010 году для A380 и A350. Функционально ROPS делится на две подсистемы:

1) подсистему предупреждения о выкатывании с ВПП (Runway Overrun Warning (ROW));

2) подсистему защиты от выкатывания с ВПП (Runway overrun Protection (ROP)).

ROW активируется на высоте 500 футов и остается активной до касания ВС ВПП основными опорами шасси. Система рассчитывает посадочную дистанцию для сухой и мокрой ВПП и в случае недостаточной длины ВПП генерирует предупреждающие звуковые и визуальные сообщения. Исходными данными для ROPS являются:

- координаты ВС в пространстве;
- абсолютная скорость ВС;
- истинная скорость ВС;
- курс ВС;
- тип ВС и двигателя;
- вес ВС;
- температура наружного воздуха;
- конфигурация взлетно-посадочной механизации;
- скорость и направление ветра;
- центровка ВС;
- данные о состоянии полосы (сухая или мокрая).

ROP активируется по касанию ВС ВПП и остается активной до достижения скорости руления, прогнозируя по текущему значению ускорения ВС длину его пробега. В случае выхода прогнозируемого значения длины пробега за ограничения (возникновения риска выкатывания ВС за пределы ВПП) ROP генерирует:

1) визуальное предупреждение на PFD «*максимальное торможение, максимальный реверс*» (выводится красными буквами);

2) звуковое сообщение «*тормоз, максимальное торможение, максимальное тор-*

можение» повторяемое до обжатия пилотом педали тормоза;

3) звуковое сообщение «*установить максимальный реверс*» сменяет предыдущее сообщение после обжатия пилотом педали тормоза, если указанный режим не был установлен до этого момента;

4) звуковое сообщение «*держат максимальный реверс*» в случае сохранения риска выкатывания на скорости 70 узлов (рекомендуемой скорости отключения реверса).

Таким образом, ROPS обеспечивает прогноз посадочной дистанции начиная с высоты 500 футов (152 м) для двух состояний ВПП (сухой и мокрой) и контролирует точность рассчитанного прогнозного значения в процессе посадки, уточняя длину пробега исходя из текущего ускорения. Но точность прогноза, очевидно, зависит от точности исходных данных, особенно в части состояния ВПП, атмосферы и собственно ВС, а также от точности выполнения посадочных процедур экипажем, то есть от ключевых факторов, определяющих безопасность полета на посадке. Ниже дана оценка влияния обозначенных погрешностей на посадочную дистанцию:

- больший на 5 узлов попутный ветер, увеличивает посадочную дистанцию на 5 %;
- каждая лишняя секунда на этапе выдерживания увеличивает на 7 % длину посадочной дистанции
- каждая секунда задержки в начале торможения педалями добавляет 7 % к посадочной дистанции;
- задержка в три секунды при выборе максимального реверса на мокрой ВПП увеличивает посадочную дистанцию на 4 %;
- уменьшение коэффициента сцепления от прогнозируемого на 10 % увеличивает посадочную дистанцию на 4 %;
- невыпуск спойлеров может увеличить посадочную дистанцию более чем на 25 %.

Для иллюстрации возможных последствий влияния указанных факторов рассмотрим гипотетическую посадку самолета Airbus A350-900 в аэропорту Сочи (Адлер) на полосу 06/24 длиной 2895 м при допустимой по-

¹¹ Runway overrun prevention system (ROPS) [Электронный ресурс] // skybrary. URL: <https://skybrary.aero/articles/runway-overrun-prevention-system-rops> (дата обращения: 10.06.2022).

садочной массе, попутном ветре в 5 узлов и сухой ВПП. Посадка в таких условиях является безопасной, значит система ROPS не выдаст предупреждающих сообщений. Предположим, однако, что во время выравнивания начался сильный дождь (коэффициент сцепления снизился до 0,5) и ветер усилился до 10 узлов (подобные условия посадки находятся в рамках ограничения Flight crew manual)¹². Исходя из данных рис. 1, длина пробега в этом случае возрастет на 130–150 %, что при средних значениях длины пробега A350-900 в 1500 м⁸ может стать причиной АП. Риск выкатывания будет обнаружен ROPS во время пробега и потребует от экипажа или ухода на второй круг, или выполнения дополнительных действий по торможению ВС. Очевидно, что к подобной ситуации может привести не только резкое изменение погодных условий, но и некорректное определение коэффициента сцепления, а также неправильные (неточные) действия экипажа при управлении ВС. Как уже было отмечено выше, именно человеческий фактор в 45 % случаев является причиной АП. Поэтому перспективным представляется повышение точности систем подобных ROPS за счет:

- 1) учета при расчете прогнозного значения посадочной дистанции человеческого фактора;
- 2) использования реального значения коэффициента сцепления.

Для оценки (повышения) точности передаваемого на борт ВС значения коэффициента сцепления может быть задействована разработанная Airbus и Navblue функция Braking Action Computation Function (BACF) [18], обеспечивающая сбор, выдачу экипажу (диспетчерам УВД) и аккумулирование на специальном сервере данных об эффективности работы систем торможения ВС (спойлеры, реверс, колесные тормоза) на пробеге. Таким образом BACF позволяет авиакомпании и (или) аэропорту накапливать данные по торможению на всех

рейсах всех ВС, оперативно обнаруживая ошибки в определении коэффициента сцепления. Уже сегодня информация из системы BACF в режиме реального времени поступает в RunwaySense – сервис Navblue¹³, формирующий отчеты о состоянии ВПП вплоть до ее отдельных участков.

Очевидно, что оперативное использование данных RunwaySense при работе ROPS будет способствовать снижению риска выкатывания ВС за пределы ВПП. Для учета человеческого фактора при расчете прогнозного значения посадочной дистанции перспективным представляется подход, предложенный в [19]. Подход лежит в русле концепции подготовки персонала на основе анализа фактических данных (ЕВТ) и предполагает построение модели пилота для выявления ошибок пилотирования и прогнозирования возможных рисков в различных ситуациях полета, а также выявления потенциальных областей для улучшения и корректировки профессиональных компетенций пилота. Исходными данными для модели пилота являются данные средств объективного контроля ВС и тренажеров ВС. Очевидно, что развитие указанного подхода в части определения и учета при прогнозировании посадочной дистанции текущего психофизиологического состояния пилота позволит снизить долю человеческого фактора среди причин АП на посадке за счет более точного прогноза таких параметров, определяющих посадочную дистанцию, как время выдерживания ВС, моменты включения реверса и начала торможения, координаты точки касания ВС и др.

Заключение

В настоящее время задача снижения количества авиационных событий, связанных с выкатыванием ВС является по-прежнему актуальной. Действенным способом решения указанной задачи является внедрение на бор-

¹² Aircraft flight crew. Maintenance manual for Airbus A350 [Электронный ресурс] // airbus. URL: <https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/2021-11/Airbus-Commercial-Aircraft-AC-A350-900-1000.pdf> (дата обращения: 10.06.2022).

¹³ Runway overrun prevention system (ROPS+) [Электронный ресурс] // NAVBLUE. URL: <https://www.navblue.aero/products/rops-plus/> (дата обращения: 10.06.2022).

ту ВС систем, обеспечивающих информирование экипажа о нештатных ситуациях во время выполнения взлета/посадки и необходимых для предотвращения АП в этих ситуациях действиях экипажа. Указанные системы постоянно совершенствуются и в настоящее время являются весомым фактором, способствующим обеспечению безопасности полета на взлете/посадке, осуществляя непрерывный расчет прогнозных значений посадочной дистанции ВС во время посадки. Однако до последнего момента данные системы не учитывали в должной мере два важнейших фактора, определяющих риск выкатывания ВС за пределы ВПП: человеческий фактор и коэффициент сцепления. Поэтому перспективным представляется разработка методик, алгоритмов и программного обеспечения, обеспечивающий учет в необходимой степени указанных факторов в работе бортовых систем предотвращения выкатываний ВС за пределы ВПП.

Список литературы

1. **Shao Q.** Fire risk analysis of runway excursion accidents in high-plateau airport / Q. Shao, M. Yang, C. Xu, H. Wang, H. Liu [Электронный ресурс] // IEEE Access. 2020. Vol. 8. Pp. 204400–204416. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3035894 (дата обращения: 10.06.2022).
2. **Ayra E.S., Insua D.R., Cano J.** Bayesian network for managing runway overruns in aviation safety [Электронный ресурс] // Journal of aerospace information systems. 2019. Vol. 16, no. 12. Pp. 546–558. DOI: 10.2514/1. I010726 (дата обращения: 10.06.2022).
3. **Valdes R.M.A.** The development of probabilistic models to estimate accident risk (due to runway overrun and landing undershoot) applicable to the design and construction of runway safety areas / R.M.A. Valdes, F.G. Comendador, L.M. Gordun, F.J.S. Nieto // Safety Science. 2011. Vol. 49, iss. 5. Pp. 633–650. DOI: 10.1016/j.ssci.2010.09.020
4. **Heymsfield E.** Predicting aircraft stopping distances within an EMAS // Journal of Transportation Engineering. 2013. Vol. 139, iss. 12. Pp. 1184–1193. DOI:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000600
5. **Heymsfield E., Hale W.M., Halsey T.L.** Aircraft response in an airfield arrestor system during an overrun // Journal of Transportation Engineering. 2012. Vol. 138, iss. 3. Pp. 284–292. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000331
6. **Gandhewar P., Hemantkumar S.** Runway excursion: A problem // Journal of Mechanical and Civil Engineering. 2014. Vol. 11. Pp. 75–78. DOI: 10.9790/1684-11327578
7. **Белогрудова Д.Ю., Сайфутдинов Р.А.** Автоматизированные системы предупреждения опасности выкатывания воздушных судов за границы взлетно-посадочной полосы // Вестник УлГТУ. 2021. № 2 (94). С. 55–60.
8. **Hindson W.S.** A Pilot rating scale for evaluating failure transients in electronic flight control systems [Электронный ресурс] // In: 17th Atmospheric Flight Mechanics Conference, 20–22 August 1990, Portland, OR, U.S.A. DOI: 10.2514/6.1990-2827 (дата обращения: 10.06.2022).
9. **Gawron V.J.** Human performance, workload, and situational awareness measures handbook. 2nd ed. Florida: CRC Press, 2008. 296 p. DOI: 10.1201/9781420064506
10. **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.
11. **Коваленко Г.В., Жданович А.М.** Методика предотвращения выкатывания тяжелых воздушных судов с ВПП // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2017. № 3 (16). С. 16–32.
12. **Евдокимова Т.А., Бузаева С.В., Шагарова А.А.** Оценка влияния неблагоприятных метеорологических условий на работу диспетчера ОРВД // Символ науки: международный научный журнал. 2022. № 9-1. С. 64–69.
13. **Ong G.P., Fwa T.F.** Wet-pavement hydroplaning risk and skid resistance: Modeling // Journal of Transportation Engineering. 2007.

Vol. 133, iss. 10. Pp. 113–125. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2007)133:10(590)

14. Baby C.K., George B. A capacitive ice layer detection system suitable for autonomous inspection of runways using an ROV // In: 2012 IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments Proceedings. Magdeburg, Germany, 2012. Pp. 127–132. DOI: 10.1109/ROSE.2012.6402627

15. Белогрудова Д.Ю., Сайфутдинов Р.А. Метод прогнозирования авиационных происшествий в системе менеджмента безопасности авиационной деятельности // Вестник УлГТУ. 2021. № 1 (93). С. 49–54.

16. Бородин С.Ф. Современные методы предотвращения выкатываний воздушных судов за пределы взлетно-посадочной полосы / С.Ф. Бородин, 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

17. Goodwill S. Runway situation awareness tools (RSAT) [Электронный ресурс] // Flight Technical and Safety the Boeing Company 2014. URL: [https://www.icao.int/SAM/Documents/2014-UNSTAPPCH/BOEING%20Runway%20situation%20awareness%20tools%20\(RSAT\).pdf](https://www.icao.int/SAM/Documents/2014-UNSTAPPCH/BOEING%20Runway%20situation%20awareness%20tools%20(RSAT).pdf) (дата обращения: 10.06.2022).

18. Tuncal A., Uslu S., Erdal D. A milestone to enhance runway safety: the new global reporting format // Revista de Investigaciones Universidad del Quindío. 2021. Vol. 33. Pp. 168–178. DOI: 10.33975/riuq.vol33n1.551

19. Барабаш А.Д. Методика повышения уровня безопасности полетов на основе модели пилота / А.Д. Барабаш, С.Ф. Бородин, М.А. Киселев, Ю.В. Петров // Научный Вестник МГТУ ГА. 2021. Т. 24, № 3. С. 8–20. DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-3-8-20

References

1. Shao, Q., Yang, M., Xu, C., Wang, H., Liu, H. (2020). Fire risk analysis of runway excursion accidents in high-plateau airport. *IEEE Access*, vol. 8, pp. 204400–204416. DOI:

10.1109/ACCESS.2020.3035894 (accessed: 10.06.2022).

2. Ayra, E.S., Insua, D.R., Cano, J. (2019). Bayesian network for managing runway overruns in aviation safety. *Journal of aerospace information systems*, vol. 16, no. 12, pp. 546–558. DOI: 10.2514/1.1010726 (accessed: 10.06.2022).

3. Valdes, R.M.A., Comendador, F.G., Gordun, L.M., Nieto, F.J.S. (2011). The development of probabilistic models to estimate accident risk (due to runway overrun and landing undershoot) applicable to the design and construction of runway safety areas. *Safety Science*, vol. 49, issue 5, pp. 633–650. DOI: 10.1016/j.ssci.2010.09.020

4. Heymsfield, E. (2013). Predicting aircraft stopping distances within an EMAS. *Journal of Transportation Engineering*, vol. 139, issue 12, pp. 1184–1193. DOI:10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000600

5. Heymsfield, E., Hale, W.M., Halsey, T.L. (2012). Aircraft response in an airfield arrestor system during an overrun. *Journal of Transportation Engineering*, vol. 138, issue 3, pp. 284–292. DOI: 10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000331

6. Gandhewar, P., Hemantkumar, S. (2014). Runway excursion: A problem. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. 11, pp. 75–78. DOI: 10.9790/1684-11327578

7. Belogrudova, D.Y., Saifutdinov, R.A. (2021). Automated systems for preventing the danger of running air-craft over the border of a running. *Bulletin of Ulyanovsk State Technical University*, no. 2 (94), pp. 55–60. (in Russian)

8. Hindson, W.S. (1990). A pilot rating scale for evaluating failure transients in electronic flight control systems. In: *17th Atmospheric Flight Mechanics Conference*, 20–22 August 1990, Portland, OR, U.S.A. DOI: 10.2514/6.1990-2827 (accessed: 10.06.2022).

9. Gawron, V.J. (2008). Human performance, workload, and situational awareness measures handbook. 2nd ed. CRC Press, Florida, 296 p. DOI: 10.1201/9781420064506

10. Mozolyako, A.V., Akimov, A.N., Vorobyev, V.V. (2014). Status and development of runway overrun prevention systems. *Nauchnyy*

Vestnik MGTU GA, no. 204, p. 74–77. (in Russian)

11. Kovalenko, G.V., Zhdanovich, A.M. (2017). The method avoidance runway overrun of heavy transport aeroplane. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoj aviatsii*, no. 3 (16), pp. 16–32. (in Russian)

12. Evdokimova, T.A., Buzaeva, S.V., Shagarova, A.A. (2022). Impact assessment of adverse meteorological conditions on the work of the ATC. *Symbol of Science: International Scientific Journal*, no. 9-1, pp. 64–69. (in Russian)

13. Ong, G.P., Fwa, T.F. (2007). Wet-pavement hydroplaning risk and skid resistance: Modeling. *Journal of Transportation Engineering*, vol. 133, issue 10, pp. 113–125. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2007)133:10(590)

14. Baby, C.K., George, B. (2012). A capacitive ice layer detection system suitable for autonomous inspection of runways using an ROV. In: *2012 IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments Proceedings. Magdeburg, Germany*, pp. 127–132. DOI: 10.1109/ROSE.2012.6402627

15. Sayfutdinov, R.A., Belogradova, D.Y. (2021). Method for forecasting aviation acci-

dents in the system of safety management of aviation activities. *Bulletin of Ulyanovsk State Technical University*, no. 1 (93), pp. 49–54. (in Russian)

16. Borodkin, S.F., Volynchuk, A.I., Ganiev, Sh.F., Kiselev, 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

17. Goodwill, S. (2014). Runway situation awareness tools (RSAT). *Flight Technical and Safety the Boeing Company*. Available at: [https://www.icao.int/SAM/Documents/2014-UNSTAPPCH/BOEING%20Runway%20situation%20awareness%20tools%20\(RSAT\).pdf](https://www.icao.int/SAM/Documents/2014-UNSTAPPCH/BOEING%20Runway%20situation%20awareness%20tools%20(RSAT).pdf) (accessed: 10.06.2022).

18. Tuncal, A., Uslu, S., Erdal, D. (2021). A milestone to enhance runway safety: the new global reporting format. *Revista de Investigaciones Universidad del Quindío*, vol. 33, pp. 168–178. DOI: 10.33975/riuq.vol33n1.551

19. Barabash, A.D., Borodkin, S.F., Kiselev, M.A., Petrov, Yu.V. (2021). Flight safety level improvement methodology based on the pilot model. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 24, no. 3, pp. 8–20. DOI: 10.26467/2079-0619-2021-24-3-8-20

Сведения об авторах

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

Волинчук Алексей Игоревич, аспирант кафедры аэродинамики конструкции и прочности летательных аппаратов МГТУ ГА, aleksej_vol@mail.ru.

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

Петров Юрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической механики и инженерной графики МГТУ ГА, doctor561@rambler.ru.

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.

Alexey I. Volynchuk, Postgraduate Student of the Aerodynamics, Design and Aircraft Strength Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, aleksej_vol@mail.ru.

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.

Yuriy V. Petrov, Doctor of Technical Sciences, Professor, The Head of the Technical Mechanics and Engineering Graphics Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, doctor561@rambler.ru.

Поступила в редакцию 30.12.2022
Принята в печать 25.05.2023

Received 30.12.2022
Accepted for publication 25.05.2023

УДК 621.45.04

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-38-52

Применение методов оценки термоокислительной стабильности реактивных топлив в гражданской авиации

К.И. Грядунов¹, А.А. Браилко¹, К.Э. Балышин¹, С.А. Савушкин¹,
В.К. Харина¹

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

Аннотация: В результате окисления реактивных топлив в них образуются нерастворимые осадки, называемые смолами или высокотемпературными отложениями, существенно снижающие химотологическую надежность агрегатов топливных систем авиационных двигателей: топливорегулирующей аппаратуры, топливно-масляных радиаторов, фильтров тонкой очистки и пр. Основными факторами, интенсифицирующими процессы окисления реактивных топлив, являются качество и кондиционность топлива и его температура. В связи с этим на предприятиях авиатопливообеспечения осуществляется постоянный контроль показателей термической стабильности авиационных топлив. Широко применяемым отечественным методом оценки термоокислительной стабильности авиационных топлив является метод в статических условиях (ТСРТ), зарубежным – динамический метод (JFTOT). Мнения насчет применения того или иного метода для объективной оценки термостабильности авиационных топлив расходятся. В статье рассматриваются основные положения, касающиеся стабильности реактивных топлив, дается обзор методов и показателей, характеризующих термоокислительную стабильность авиационных топлив, приводятся статистические данные многолетнего использования статического (ТСРТ) и динамического (JFTOT) методов оценки качества отечественных марок топлив для дозвуковых ВС ТС-1 и РТ, поступающих на авиапредприятие. Показано, что использование динамического метода (JFTOT) с текущими параметрами работы не является актуальным.

Ключевые слова: авиационные керосины, термоокислительная стабильность топлив, статический метод оценки термоокислительной стабильности, динамический метод оценки термоокислительной стабильности.

Для цитирования: Грядунов К.И. Применение методов оценки термоокислительной стабильности реактивных топлив в гражданской авиации / К.И. Грядунов, А.А. Браилко, К.Э. Балышин, С.А. Савушкин, В.К. Харина // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 3. С. 38–52. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-38-52

The application of methods for assessing the thermal oxidative jet fuel stability in civil aviation

K.I. Gryadunov¹, A.A. Brailko¹, K.E. Balyshin¹, S.A. Savushkin¹,
V.K. Kharina¹

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

Abstract: As a result of jet fuel oxidation, insoluble sediments, called resins or high-temperature deposits, are formed. They significantly reduce the chemotological reliability of aircraft engine fuel system units, i.e., fuel metering equipment, fuel-oil coolers, fine fuel filters, etc. The main factors that intensify the jet fuel oxidation processes are fuel quality and meeting specifications as well as its temperature. In this regard, aviation fuel supply enterprises constantly monitor indicators of the thermal aviation fuel stability. The widely used domestic method for assessing the thermal oxidative aviation fuel stability is the technique under static conditions (Thermal Jet Fuel Stability – TJFS), the foreign one is the dynamic technique (Jet Fuel Thermal Oxidation Test – JFTOT). Opinions concerning the use of a particular method for an objective assessment of the thermal aviation fuel stability are divided. The article considers the main provisions with respect to the jet fuel stability, overviews the methods and indicators, characterizing the thermal oxidative aviation fuel stability, provides statistical data on the long-term use of the static (TJFS) and

dynamic (JFTOT) methods for assessing the quality of domestic TS-1 and RT fuel grades for subsonic aircraft supplied to an airline. It is shown that the use of the dynamic method (JFTOT) with the current operation parameters is not relevant.

Key words: kerosene-based aviation fuels, thermo-oxidative fuel stability, static method for evaluating thermo-oxidative stability, dynamic method for evaluating thermo-oxidative stability.

For citation: Gryadunov, K.I., Brailko, A.A., Balyshin, K.E., Savushkin, S.A., Harina, V.K. (2023). The application of methods for assessing the thermal oxidative jet fuel stability in civil aviation. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 3, pp. 38–52. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-38-52

Введение

Нефтяные топлива являются нестабильными, т. е. способными к изменению своих физико-химических свойств в процессе эксплуатации. В результате сложных процессов окисления, полимеризации и уплотнения углеводородов в авиационном топливе (АТ)

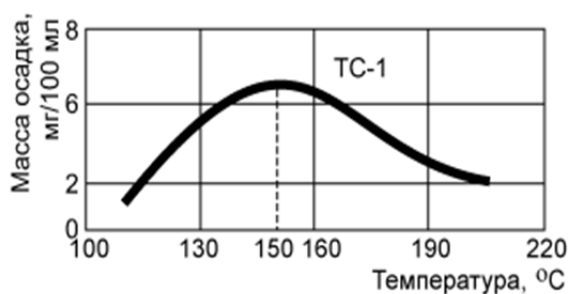


Рис. 1. Влияние температуры на образование ВТО в авиатопливе TC-1

Fig. 1. The temperature effect on the high-temperature deposits formation in TS-1 aviation fuel

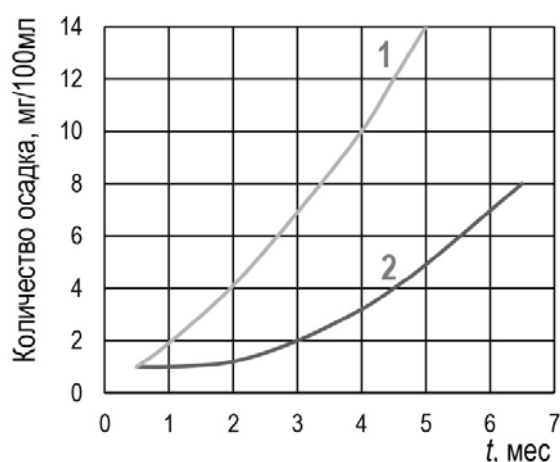


Рис. 2. Влияние концентрации кислорода в газовой фазе прибора ТСРТ на образование осадков

Fig. 2. The influence of oxygen concentration in the gas phase of the TJFS device on sediment formation

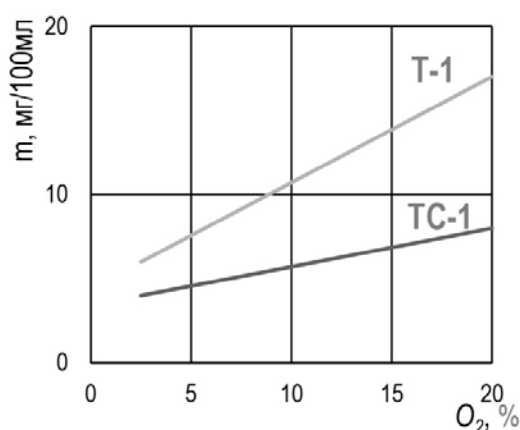


Рис. 3. Зависимость образования ВТО в керосине TC-1 при 150 °C от времени хранения в емкости: 1 – наполовину заполненной; 2 – полностью заполненной

Fig. 3. Dependence of the high-temperature deposits formation in TS-1 kerosene-based aviation fuel at 150°C on the storage time in a half-filled (1) and fully filled (2) container

образуются нерастворимые в его среде отложения (жидкие, смолистые и твердые), в общем случае называемые смолами или высокотемпературными отложениями (ВТО) и существенно ухудшающие свойства товарного продукта вплоть до невозможности его применения по назначению [1–9].

Процессы окисления играют решающую роль в образовании осадков (70–80 %) и приводят к появлению в топливах твердых частиц загрязнений размерами до 150 мкм [5].

На интенсивность образования осадков в АТ влияют многие факторы: химический (особенно наличие гетероатомных и непредельных соединений) и фракционный состав АТ; температура АТ; наличие в надтопливном пространстве и в самом топливе кислорода; наличие катализаторов окисления –

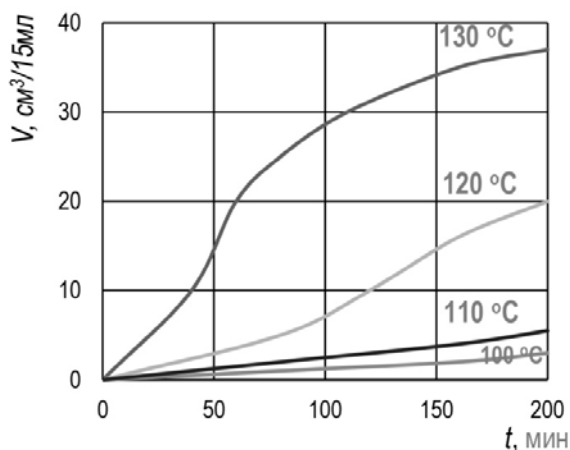


Рис. 4. Объем поглощения кислорода в зависимости от температуры топлива ТС-1
Fig. 4. The volume of oxygen absorption depending on TS-1 aviation fuel temperature

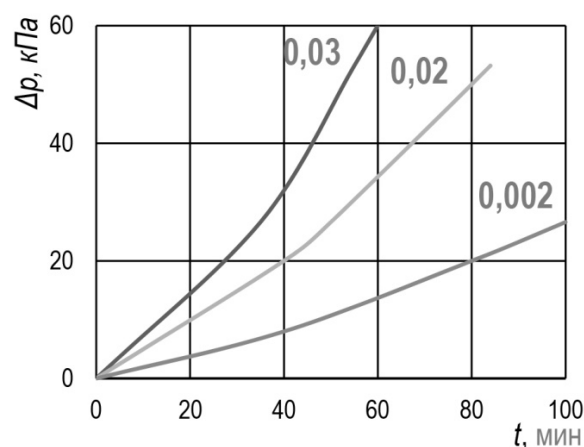


Рис. 6. Зависимость перепада давления на фильтре от содержания в нем меркаптановой серы, % масс.
Fig. 6. Dependence of differential pressure on the filter on the content of mercaptan sulfur, % by mass

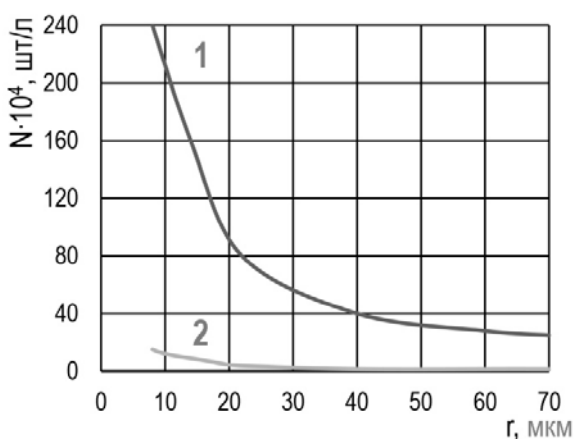


Рис. 5. Влияние чистоты АТ на количество образовавшихся частиц за 4 ч окисления: 1 – загрязненное топливо, 2 – чистое топливо
Fig. 5. Aviation fuel purity influence on the number of particles formed within 4 hours of oxidation, 1 – contaminated fuel, 2 – clean fuel

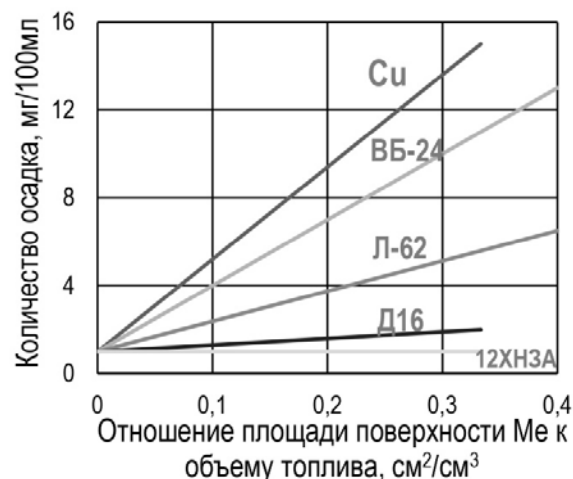


Рис. 7. Влияние отношения поверхности Ме к объему топлива на образование осадков в керосине ТС-1 при 150 °C
Fig. 7. The Me surface ratio effect to the volume of aviation fuel on the sediment formation in TS-1 kerosene-based aviation fuel at 150 °C

металлов, входящих в состав конструкционных материалов элементов топливных систем; чистота АТ, освещенность и пр. (рис. 1–8) [2–5, 7, 10–12], однако преимущественное влияние на осадкообразование оказывает качество товарного АТ [2, 5, 12].

Механизм образования смолистых осадков в АТ при хранении показан на рис. 9 [4, 5].

Механизм окисления реактивных топлив для дозвуковых ВС меняется при достижении температур свыше 110 °C, до этого механизм

един, при повышении температуры топлива изменяется лишь скорость окисления [4, 5], однако и в том, и в другом случае он имеет цепной характер, т. е. когда в результате химической реакции, в которой участвуют активные частицы (атомы, свободные радикалы и пр.) и исходные молекулы, образуются новые активные частицы, реагирующие с исходными молекулами [4, 5, 8, 12]. Увеличение температуры способствует увеличению скорости и глубины окисления топлив. Явле-



Рис. 9. Механизм осадкообразования в АТ при хранении
Fig. 9. The sediment formation mechanism in aviation fuel during storage

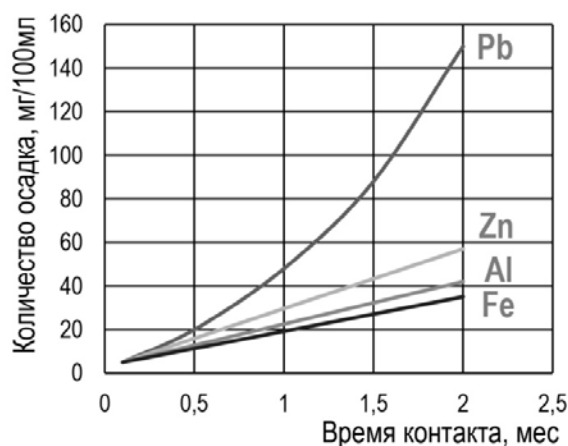


Рис. 8. Влияние времени контакта Me на образование осадков в керосине ТС-1 при 20 °С
Fig. 8. The Me contact time effect on the sediment formation in TS-1 kerosene-based aviation fuel at 20 °С

ние возникновения в АТ нерастворимых осадков при высоких температурах называется термоокислительной стабильностью [5, 7].

Процесс осадкообразования, активное изучение которого было начато, по сути, с переходом на сверхзвуковые скорости полета, т. е. с 50-х гг. XX в., складывается из серии химических, физических и механических явлений, характерных для работы топлива в топливных системах воздушных судов (ВС) и авиационных двигателей (АД) [2, 3, 5, 10].

Из приведенных данных (рис. 1–8) видно, что чем выше температура начала кипения топлива, тем при более высокой температуре образуется максимальное количество осадка

(высокотемпературных отложений) при его окислении. У топлива ТС-1 температура начала кипения составляет ок. 150 °С. Это определяет наличие на кривой величины осадкообразования (рис. 1) максимума и объясняется тем, что после начала кипения топлива происходит интенсивный процесс парообразования, при котором из жидкой фазы интенсивно выделяется и окислитель – кислород, что заметно ослабляет скорость окисления в жидкой фазе и, соответственно, накопление осадка. В топливных системах дозвуковых ВС таких температур не наблюдается, максимальные значения температуры АТ в гидравлических устройствах составляют до 130 °С. До этих значений температур интенсивность образования осадков (смолоотложения) в зависимости от температуры имеет практически линейный характер [7].

Отдельно стоит отметить, что нагревание топлив в двигателях дозвуковых ВС вплоть до температур, примерно равных температурам конца их кипения (для ТС-1 и РТ ок. 250 и 280 °С соответственно), может наблюдаться в локальных зонах камер сгорания после останова двигателей. В результате этого негативного явления топливо фактически образует нагары, закоксовывается. Склонность АТ к образованию таких отложений оценивают в статических условиях по массе фактических смол, образующихся после полного выпаривания 100 мл АТ (рис. 10). Определение проводят по ГОСТ 8489-85 (выпари-



Рис. 10. Методы оценки термоокислительной стабильности реактивных топлив и их показатели

Fig. 10. Assessment methods of thermal oxidative stability of jet fuels and their performance

вание осуществляется под струей нагретого водяного пара), по ГОСТ 1567-97 и ГОСТ 32404-2013 (под струей нагретого воздуха) [7]. Образование осадков в указанных условиях не является предметом обсуждения в настоящей статье, поэтому подробнее останавливаться не актуально.

Также термоокислительная стабильность топлив снижается в присутствии смолистых и сернистых соединений и особенно меркаптанов (рис. 6). При использовании гидроочистки в процессе производства топлив из топливных фракций практически полностью удаляются гетероатомные и непредельные соединения, а меркаптаны полностью. Это позволяет гидроочищенным маркам топлив (РТ; Т-8в; Т-6) успешно противостоять окислению, т. е. делает их более термостабильными вплоть до температур 300–350 °С. Однако удаление некоторых гетероатомных соединений, являющихся естественными антиоксидантами, отрицательно сказывается на стабильности этих марок АТ при длительном хранении, поэтому при производстве в них обязательно добавляют антиокислительные присадки [7].

Таким образом, максимальная температура топлива в подавляющем большинстве агрегатов топливной системы АД дозвуковых ВС составляет порядка 130 °С, при этом температура в баках этих ВС после 4–5 часов

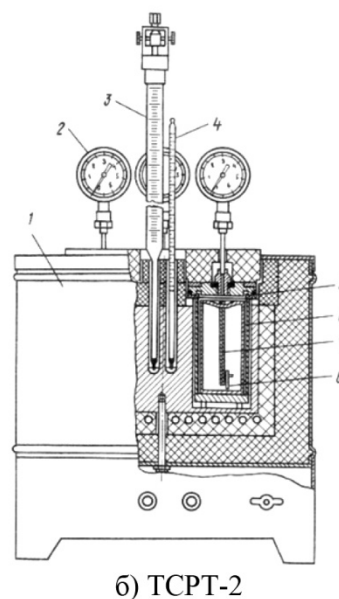
полета устанавливается в пределах от минус 40 до минус 60 °С; температура топлива в баках сверхзвуковых ВС может достигать до плюс 200 °С, а в агрегатах их двигателей и еще больших температур. В связи с этим стабильность АТ принято рассматривать в трех характерных условиях: при длительном хранении, в топливной системе дозвуковых ВС и в топливной системе сверхзвуковых ВС [5, 10, 11].

Соответственно, в топливной системе газотурбинных двигателей (ГТД) наибольшее смолоотложение наблюдается в агрегатах, где топливо нагревается до указанных высоких температур и контактирует с металлами – катализаторами его окисления: в топливно-масляном радиаторе (ТМР) и топливорегулирующей аппаратуре (ТРА). Высокотемпературные отложения обладают высокой адгезионной способностью и малой теплопроводностью. Их образование в топливной системе приводит к снижению эффективности работы ТМР вплоть до его полной забивки; к заклиниванию и зависанию (залипанию) золотников ТРА; к забивке фильтров тонкой очистки (ФТО) АД и топливных форсунок; повышенному нагарообразованию в камерах сгорания и пр. [5, 7–9].

Объективная оценка термоокислительной стабильности АТ является актуальной задачей. На сегодняшний день существуют сле-



а) ТСРТ-2м



б) ТСРТ-2

Рис. 11. Внешний вид (а) и схема (б) прибора типа ТСРТ-2:

1 – корпус (металлический электротермостат); 2 – манометр; 3 – контактный термометр; 4 – термометр; 5 – бомба из нержавеющей стали; 6 – стеклянный стакан; 7 – стеклянная трубка с крышкой; 8 – медная пластинка; 9 – электронный блок управления

Fig. 11. Appearance a) and diagram b) of a TJFS-2 type device:

1 – case (metallic electric incubator), 2 – pressure meter, 3 – contact thermometer, 4 – thermometer, 5 – stainless steel bomb, 6 – glass jar, 7 – glass capped tube, 8 – copper strip, 9 – electronic control unit

дующие прямые и косвенные методы определения термостабильности АТ (рис. 10). Эти показатели характеризуют такое эксплуатационное свойство АТ, как склонность его к образованию отложений (в результате окисления) [5, 7, 13, 14], наиболее распространенными методами являются методы оценки термоокислительной стабильности в статических и динамических (по методу JFTOT) условиях, однако к единому мнению насчет объективности оценки термоокислительной стабильности теми или иными методами специалисты до сих пор не пришли.

Кроме указанных основных показателей, существуют и прочие контролируемые в лабораториях ГСМ авиапредприятий показатели, оказывающие влияние на интенсивность окисления АТ: наличие в АТ водорастворимых кислот и щелочей (и нейтральность), наличие и содержание в АТ серосодержащих компонентов, содержание в АТ мыл нефтяных кислот и другие [7].

Основные положения

Склонность реактивных топлив к образованию отложений в результате окисления в статических условиях оценивают по ГОСТ 11802-88. Данный метод был разработан в нашей стране. Сущность метода заключается в окислении испытуемого топлива в среде воздуха в присутствии катализатора (медной пластинки) в аппарате типа ТСРТ-2¹ (рис. 11) при 150 °С в течение 4 ч с последующей количественной оценкой (весовым методом) образующегося осадка, а также растворимых и нерастворимых смол. Дальнейшим развитием приборов ТСРТ является модификация ТСРТ-10, отличающаяся большей автоматизацией процесса (рис. 12) [6, 7, 11].

Считается, что наиболее достоверную оценку различных показателей качества возможно получать на установках, максимально

¹ ТСРТ – термическая стабильность реактивных топлив.



Рис. 12. Внешний вид аппарата TCPT-10
Fig. 12. Appearance of TSRT-10 device



Fig. 13. Внешний вид установки
JFTOT MARK IV

Fig. 13. Appearance of JFTOT MARK IV installation

полно моделирующих реально происходящие процессы в реальных системах. Для оценки термоокислительной стабильности АТ были созданы маломасштабные установки, моделирующие работу топливной системы АД

в динамических условиях. Они позволяют оценить интенсивность смолоотложения АТ на нагретых металлических поверхностях и после контакта с ними [6].

Первые подобные установки появились в 1954–1955 гг. В США это была установка Fuel Koker, в СССР – ДТС-1. Развитием американского метода стало создание фирмой Alcor в 1974 г. метода JFTOT (Jet Fuel Thermal Oxidation Test – определение термоокислительной стабильности реактивного топлива) с соответствующей одноименной установкой² [2, 6].

На данный момент этот метод (с усовершенствованиями, полностью автоматизированный) широко распространен по миру для оценки качества марок реактивных топлив для дозвуковых ВС, соответствующие установки (рис. 13^{3,4}) изготавливает единственный производитель.

Стоит отметить, что статический метод в США никогда не использовался, в то же время в отечественной практике использование динамического метода (ДТС) распространялось только на квалификационные методы испытаний АТ⁵ [6, 13].

² JFTOT IV jet fuel thermal oxidation tester [Электронный ресурс] // youtube. 2022. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=7tz5L-1DBDA> (дата обращения: 07.06.2022).

³ ООО «Неолаб» – оборудование для вашей лаборатории [Электронный ресурс] // neolabllc. URL: <https://www.neolabllc.ru/> (дата обращения: 07.06.2022).

⁴ Revolutionary advancement in jet fuel thermal oxidation testing [Электронный ресурс] // petro-online.com. 22 августа 2011. URL: <https://www.petro-online.com/news/analytical-instrumentation/11/pac-lp/revolutionary-advancement-in-jet-fuel-thermal-oxidation-testing/16508> (дата обращения: 07.06.2022).

⁵ Комплексы квалификационных испытаний являются неотъемлемой частью испытаний вновь разработанных авиаГСМ, а также испытаний известных сортов и марок авиаГСМ, полученных из нового сырья по измененным технологиям, содержащим новые компоненты и пр. Показатели, входящие в перечень квалификационных методов испытаний топлив, существенно шире тех показателей, которые отражены в соответствующих нормативных документах на продукт [7, 13, 15].

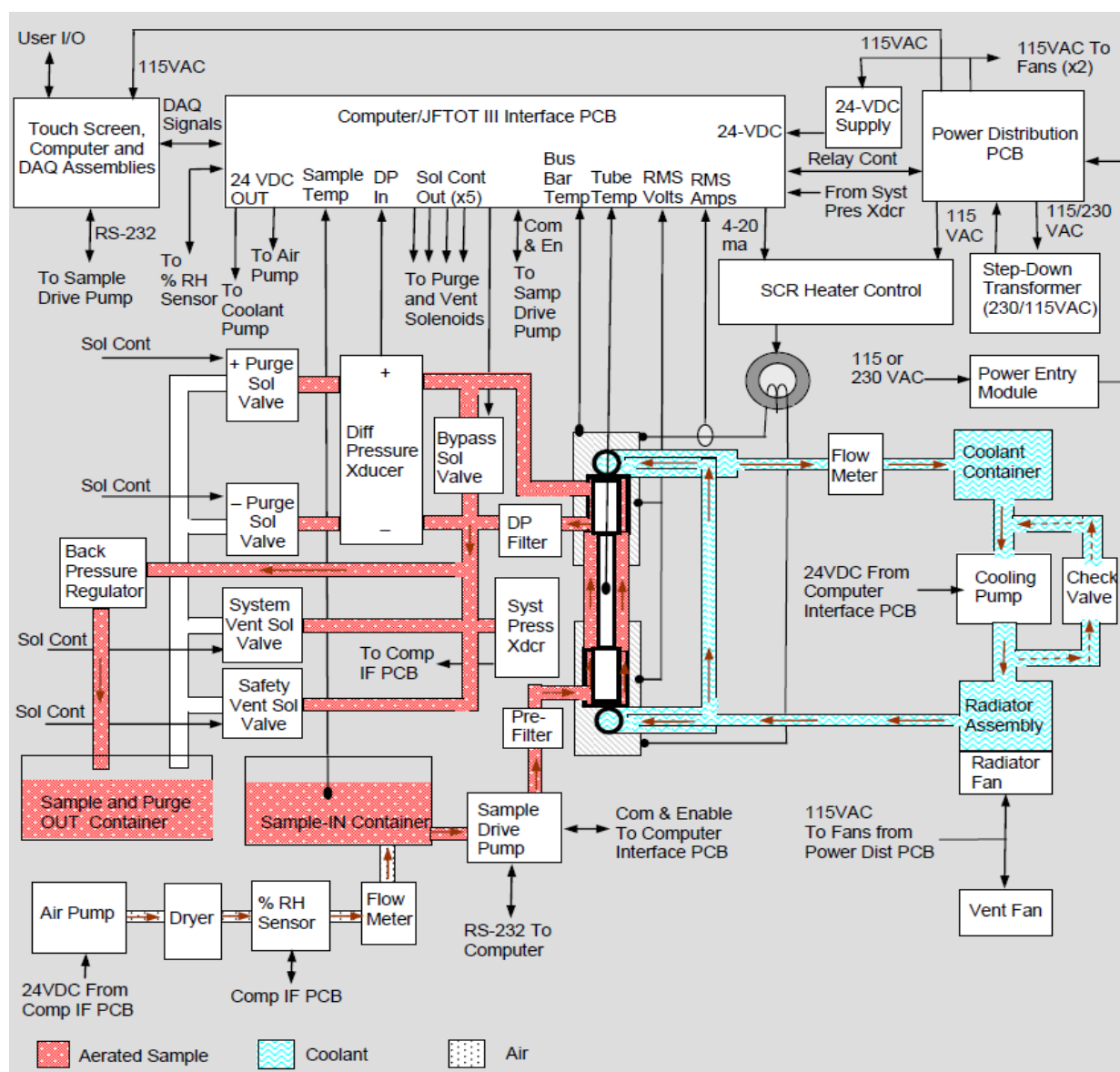


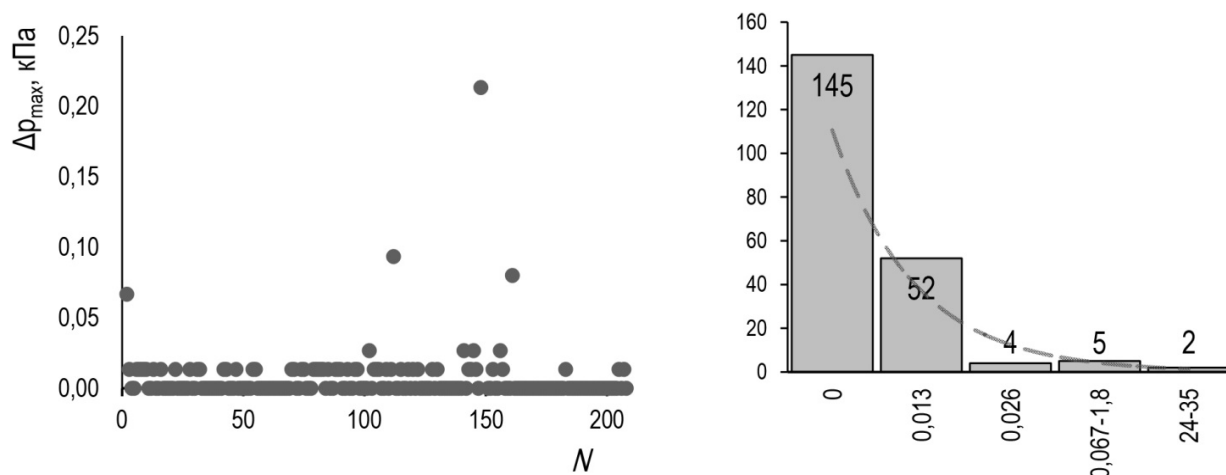
Рис. 14. Принципиальная схема работы установки JFTOT
Fig. 14. Schematic diagram of the JFTOT installation operation

На сегодняшний день в регламенте Таможенного союза⁶ показатели по динамическо-

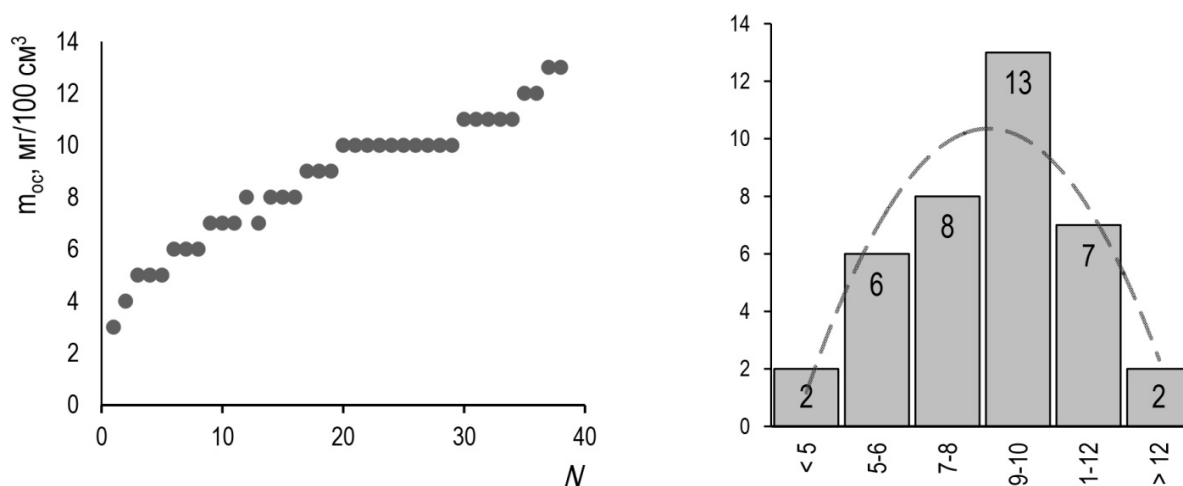
⁶ Решение Комиссии Таможенного союза от 18.10.2011 № 826 (ред. от 19.12.2019) «О принятии технического регламента Таможенного союза "О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту" (вместе с "ТР ТС 013/2011. Технический регламент Таможенного союза. О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту")» [Электронный ресурс] // consultant.ru. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_12

му методу (JFTOT) нормируют для отечественных марок топлив для ГА ТС-1 и РТ. Научно обоснованная причина введения этого показателя отсутствует⁷, однако из-за этого производители (поставщики) АТ, а также

0933/ (дата обращения: 07.06.2022). На сегодняшний день является единственным юридическим документом, по которому оценивают качество АТ. ГОСТ Р 52954-2008 "Нефтепродукты. Определение термоокислительной стабильности топлив для газовых турбин. Метод JFTOT" [Электронный ресурс] // Гарант. URL: <https://base.garant.ru/5923030/#friends> (дата обращения: 07.06.2022).



Опыт применения динамического метода (JFTOT) лабораторией ГСМ с 2014 по 2021 г. Контрольный перепад давления 25 кПа. Из 208 проб 201 фактически показала отсутствие перепада давления на контрольном фильтре; все пробы находятся в допустимых пределах. Не зафиксировано ни одного случая образования отложений на контрольной трубке. Гистограмма распределения не характеризует объективного состояния термостабильности товарного продукта



Опыт применения статического метода для керосина ТС-1 лабораторией ГСМ за 2020 г. Очевидно нормальное распределение результатов экспериментов – объективная характеристика термостабильности товарного продукта

Рис. 15. Сравнительные данные по опыту эксплуатации динамического (JFTOT) и статического (TCPT) методов оценки термостабильности АТ

Fig. 15. Comparative data on the operational experience of the dynamic (JFTOT) and static (TJFS) methods for assessing the thermal aviation fuel stability

некоторые эксплуатирующие предприятия были вынуждены приобрести и используют соответствующие приборы в лабораториях горюче-смазочных материалов (ГСМ), что, несомненно, выгодно производителю соответствующих установок.

Сущность метода JFTOT заключается в прокачке в течение 2,5 ч с определенной

скоростью и при определенном давлении разогретого до высоких температур (260 °С) топлива и оценке его термоокислительной стабильности по количеству (цвету и толщине) отложений, образующихся на одноразовой алюминиевой нагревательной трубке *Tube Temp*, и времени забивки контрольного фильтра с номинальной пористостью 17 мкм

DP Filter, расположенного по потоку топлива за нагревательной трубкой (рис. 14)⁸.

Проведение испытания осуществляют в соответствии с ГОСТ Р 52954-2013 и ГОСТ 33848-2016. Стандарты идентичны ASTM D 3241-13 и ASTM D3241-14b соответственно.

Проведем анализ актуальности применения метода JFTOT для оценки термоокислительной стабильности отечественных марок реактивных топлив.

На рис. 15 показаны сравнительные данные по анализам авиационных топлив статическим (ТСРТ) и динамическим (JFTOT) методами за 7 лет и 1 год соответственно. Данные идентичны с другими использующими эти методы организациями авиатопливообеспечения.

За весь период эксплуатации установок JFTOT (с конца 2000-х гг.) отечественными лабораториями ГСМ авиапредприятий не было отбраковано ни одного образца свежего АТ по показателям данного метода⁹, притом что по показателям статического метода такие обстоятельства крайне редко, но случались (рис. 15).

На рис. 16 показана чувствительность статического и динамического (JFTOT) методов к изменению термодинамической стабильности после смешения марок топлив ТС-1 и РТ. Видно, что динамический метод JFTOT не реагирует на эти изменения в отличие от статического метода [7].

Поэтому применение динамического метода JFTOT для указанных целей для отечественных марок топлив для дозвуковых ВС является неактуальным [7].

Более того, из приведенных эмпирических данных (рис. 15, 16) видно, что использования статического метода оценки термоокислительной стабильности для проверки качества товарного продукта организациями

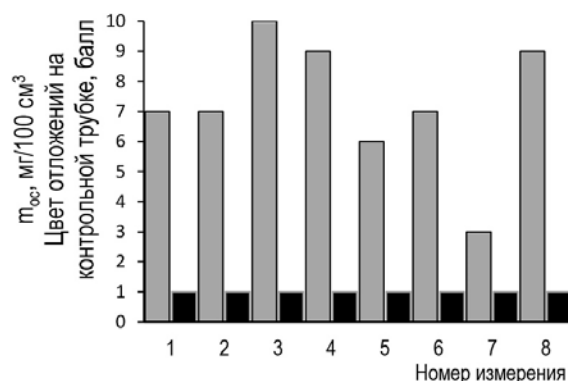


Рис. 16. Чувствительность статического (ТСРТ, серый) и динамического (JFTOT, черный) методов к изменению термостабильности АТ ТС-1 и РТ после их смешения

Fig. 16. Sensitivity of the static (TJFS, gray) and dynamic (JFTOT, black) methods to changes in the thermal TS-1 and RT aviation fuel stability after their mixing



Рис. 17. Внешний вид установки ДТС-4
Fig. 17. Appearance of DTS-4 installation

авиатопливообеспечения вполне достаточно. Показатели динамического метода могут быть использованы для расширенной характеристики продукта, поэтому использование этого метода при квалификационных испытаниях, как и было определено в отечественной практике, вполне обосновано.

Таким образом, преимуществами статических методов оценки качества товарного продукта перед динамическими являются простота и дешевизна оборудования и прове-

⁸ JFTOT 230 MARK III. Jet fuel thermal oxidation tester. User's manual. Alcor, 2015 265 p.

⁹ Случаи забивки фильтра установки JFTOT, как правило, наблюдаются на отработанном керосине (керосине, отобранном из баков ВС) [16], к контролю качества товарного продукта это не имеет отношения.

дения эксперимента¹⁰, а также бóльшая объективность результатов испытаний, в том числе и применительно к топливным системам АД, если принять во внимание, что наибольшее смолоотложение в них будет наблюдаться непосредственно после останова двигателя, т. е. когда топливо, нагретое до высоких температур, перестает циркулировать по топливной системе, а также при температурах, примерно равных температурам начала кипения АТ (для ТС-1 и РТ $\approx 150^\circ\text{C}$) [6, 7].

Температурами начала отложений являются $80\text{--}105$ и $135\text{--}180^\circ\text{C}$ для топлив ТС-1 и РТ соответственно [6, 7, 13]. Из рис. 1 видно, что проводить оценку термостабильности данных марок АТ при температуре испытания на JFTOT (260°C) не имеет практического смысла.

Также нельзя не отметить, что в текущей геополитической обстановке приобретение и нормальная эксплуатация американского прибора затруднительны, например, поставка фирмой-производителем одноразовых контрольных трубок в нашу страну была прекращена.

Современной отечественной установкой испытания термостабильности АТ в динамических условиях является установка ДТС-4 (рис. 17). Также используют и установку ДТС-2. Определение показателей термостабильности (температура начала образования отложений, индекс термостабильности (количество отложений), изменение скорости перепада давления на фильтре) осуществляют по ГОСТ 17751–79 и СТО 08151164–0305–2019 [7, 17].

При этом и конструкция установок, и параметры их работы отличны от метода

JFTOT. Так, температура АТ по методу ДТС-4 после нагревателя составляет 150°C , а в камере контрольного фильтра – 180°C , время проведения испытания – 2 ч. Установки ДТС адаптированы для отечественных марок АТ, в том числе для дозвуковых ВС, они изготовлены в единичных экземплярах и используются при квалификационных испытаниях АТ [7]. Расширение практики применения данных установок взамен JFTOT организациями авиатопливообеспечения в целом возможно, однако, как уже отмечалось, это не имеет практической необходимости.

Заключение

На основании указанного возможно выделить основные преимущества и недостатки статического и динамических методов оценки термоокислительной стабильности (рис. 18).

Показана непригодность применения метода JFTOT с текущими параметрами работы для оценки термоокислительной стабильности отечественных товарных марок топлив для дозвуковых ВС. Для обеспечения объективности оценки для каждого сорта (а в некоторых случаях и марки) топлив требуются свои условия испытания. В целом доработка прибора в этом отношении не вызывает большой сложности, однако действий в этом направлении со стороны производителя пока не предпринималось.

Отмечено, что для сравнительной оценки показателей термоокислительной стабильности, а также с целью контроля качества товарного продукта достаточно использования статического метода ТСРТ. Динамический метод ДТС актуально использовать при квалификационных испытаниях АТ, а также в тех случаях, когда требуется определение марки топлива: по показателю «температура начала образования отложений» марку РТ можно оперативно отличить от марки ТС-1. Так как подобная задача ставится весьма редко, наличие данной установки в ряде лабораторий ГСМ не требуется.

¹⁰ По состоянию на 2021 г. стоимость только расходных материалов на проведение одного испытания по методу JFTOT составляет около 6 000 руб., стоимость самого прибора составляет порядка 14 млн руб. Для снятия показателей с контрольной трубки также возможно приобретение отдельной установки (PAC OptiReader) стоимостью порядка 5 млн руб., стоимость прибора ТСРТ-10 на сегодняшний день составляет порядка 800 тыс. руб. (ценой на расходные материалы можно пренебречь).



Рис. 18. Преимущества и недостатки методов оценки термоокислительной стабильности реактивных топлив для дозвуковых ВС ГА

Fig. 18. Advantages and disadvantages of the methods for assessing the thermal oxidation stability of jet fuels for civil aviation subsonic aircraft

Высокой практической необходимости по внедрению метода ДТС вместо JFTOT нет, поскольку в целом нет необходимости контроля термоокислительной стабильности в динамических условиях в организациях авиатопливообеспечения ГА.

На сегодняшний день в мире распространяется практика использования на ВС синтетических и биологических топлив, как в чистом виде, так и в виде смесей с нефтяным реактивным топливом^{11,12,13,14,15}. Указанные

альтернативные топлива обладают низкой стабильностью (в том числе термоокислительной) [18], однако применимость классических методов к оценке их стабильности пока не определена. В России производства марок биологических и синтетических топлив, допущенных к применению на ВС, нет, поэтому в данной статье исследование возможности использования статических, динамических и других методов для оценки термоокислительной стабильности указанных топлив и их смесей с нефтяным реактивным топливом не проводилось.

Список литературы

1. Аксенов А.Ф. Авиационные топлива, смазочные материалы и специальные жидкости. М.: Транспорт, 1970. 256 с.

¹⁴ Французы выполнили первый полет узкофюзеляжного самолета на 100%-ном биотопливе // АВИАИНФОРМ. 2021. № 11 (212). С. 69–70.

¹⁵ Вертолет Airbus совершил первый полет на 100 % экологическом топливе // АВИАИНФОРМ. 2021. № 11 (212). С. 72–73.

¹¹ This A319neo is the latest to test 100% SAF [Электронный ресурс] // airbus.com. 30 октября 2021. URL: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2021-10-this-a319neo-is-the-latest-to-test-100-saf> (дата обращения: 07.06.2022).

¹² First Airbus helicopter flight with 100% sustainable aviation fuel [Электронный ресурс] // airbus.com. 9 ноября 2021. URL: <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2021-11-first-airbus-helicopter-flight-with-100-sustainable-aviation-fuel> (дата обращения: 07.06.2022).

¹³ An A350 fuelled by 100% SAF just took off [Электронный ресурс] // airbus.com. 18 марта 2021. URL: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2021-03-an-a350-fuelled-by-100-saf-just-took-off> (дата обращения: 07.06.2022).

2. **Пискунов В.А., Зрелов В.Н.** Влияние топлив на надежность реактивных двигателей самолетов: химмотологическая надежность. М.: Машиностроение, 1978. 270 с.

3. **Пискунов В.А., Зрелов В.Н., Василенко В.Т. и др.** Химмотология в гражданской авиации: справочник. М.: Транспорт, 1983. 248 с.

4. **Братков А.А., Серегин Е.П., Горенков А.Ф. и др.** Химмотология ракетных и реактивных топлив. М.: Химия, 1987. 304 с.

5. **Грядунев К.И.** Химмотология авиационных горюче-смазочных материалов: учеб. пособие. М.: ИД Академии Жуковского, 2021. 184 с.

6. **Грядунев К.И.** Эксплуатационные свойства авиационных горюче-смазочных материалов: учеб. пособие. М.: ИД Академии Жуковского, 2022. 168 с.

7. **Грядунев К.И., Марчук Н.В.** Эксплуатационные свойства авиационных ГСМ: учебно-метод. пособие по выполнению лабораторных работ. Воронеж: МИР, 2022. 80 с.

8. **Фукс И.Г., Спиркин В.Г., Шабалина Т.Н.** Основы химмотологии. Химмотология в нефтегазовом деле: учеб. пособие. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004. 280 с.

9. **Урявин С.П., Коняев Е.А.** Высокотемпературные отложения (ВТО) реактивных топлив: негативность, влияющие факторы, способы борьбы // Научный Вестник МГТУ ГА. 2010. № 162. С. 81–84.

10. **Литвинов А.А.** Основы применения горюче-смазочных материалов в гражданской авиации: учебник для вузов. М.: Транспорт, 1987. 308 с.

11. **Углов Б.А.** Эксплуатационные свойства реактивных топлив и надежность авиационных силовых установок: учеб. пособие. Куйбышев: КуАИ, 1986. 68 с.

12. Теоретические основы химмотологии / Под. ред. А.А. Браткова. М.: Химия, 1985. 320 с.

13. **Гуреев А.А., Серегин Е.П., Азев В.С.** Квалификационные методы испытаний нефтяных топлив. М.: Химия, 1984. 200 с.

14. **Орешенков А.В., Гришин Н.Н., Степанова С.Е.** Современные методы оценки

термоокислительной стабильности нефтепродуктов // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. 2017. № 7. С. 25–35.

15. **Чудиновских А.Л., Тонконогов Б.П., Лахши В.Л.** Моторное масло как важный объект химмотологии. М.: Недра, 2014. 223 с.

16. **Попов Ю.В.** Оценка методик анализа качества авиационного топлива при расследовании авиационных происшествий с воздушными судами гражданской авиации / Ю.В. Попов, Л.В. Ковба, О.Б. Азжеурова, Н.В. Морозова, Н.П. Кондукова // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2020. № 32. С. 76–86.

17. **Астафьев В.А.** Сравнительный анализ результатов оценки термоокислительной стабильности топлив для реактивных двигателей в динамических условиях методами ДТС-4 и ДТС-2 // 55 лет химмотологии – основные итоги и направления развития: тезисы докладов Межведомственной научно-технической конференции. Москва, 27 ноября 2019 г. М.: 25 ГОСНИИ химмотологии МО РФ, 2019. С. 87–89.

18. **Романцова С.В., Рязанцева И.А., Малахов К.С.** Стабильность биодизельных топлив при хранении // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2009. Т. 14, № 1. С. 63–66.

References

1. **Aksenov, A.F.** (1970). Aviation fuels, lubricants and special liquids. Moscow: Transport, 256 p. (in Russian)

2. **Piskunov, V.A., Zrelov, V.N.** (1978). The influence of fuels on the aircraft jet engine's reliability: chemmotological reliability. Moscow: Mashinostroyeniye, 270 p. (in Russian)

3. **Piskunov, V.A., Zrelov, V.N., Vasilenko, V.T. et al.** (1983). Chemmotology in civil aviation: handbook. Moscow: Transport, 248 p. (in Russian)

4. **Bratkov, A.A., Seregin, E.P., Gorenkov, A.F. et al.** (1978). Chemmotology of rocket and jet fuels. Moscow: Khimiya, 304 p. (in Russian)

5. **Gryadunov, K.I.** (2021). Aviation fuels and lubricants chemmotology: Tutorial. Mos-

cow: Izdatelskiy Dom Akademii Zhukovskogo, 184 p. (in Russian)

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

7. **Gryadunov, K.I., Marchuk, N.V.** (2022). Aviation fuels and lubricants operational properties: educational and methodical manual for the implementation of laboratory work. Voronezh: MIR, 80 p. (in Russian)

8. **Fuks, I.G., Spirkin, V.G., Shabalina, T.N.** (2004). Fundamentals of chemmotology. Chemmotology in oil and gas business: Tutorial. Moscow: RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina, 280 p. (in Russian)

9. **Uryavin, S.P., Konyaev, E.A.** (2010). Fuel high temperature measures: negativeness, factors, means of struggle. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 162, pp. 81–84. (in Russian)

10. **Litvinov, A.A.** (1987). Fuels and lubricants application basics in civil aviation: Textbook for Universities. Moscow: Transport, 308 p. (in Russian)

11. **Uglov, B.A.** (1986). Jet fuels operational properties and aviation powerplants reliability: Tutorial. Kuybyshev: KuAI, 68 p. (in Russian)

12. **Bratkov, A.A.** (Ed). (1985). Theoretical foundations of chemmotology. Moscow: Khimiya, 320 p. (in Russian)

13. **Gureev, A.A., Seregin, E.P., Azev, V.S.** (1984). Qualification testing methods for petroleum fuels. Moscow: Khimiya, 200 p. (in Russian)

14. **Oreshenkov, A.V., Grishin, N.N., Stepanova, S.E.** (2017). Modern methods of evaluation of thermal oxidative stability of petroleum products. *World of Petroleum Products Scientific and Technical Journal*, no. 7, pp. 25–35. (in Russian)

15. **Chudinovskikh, A.L., Tonkonogov, B.P., Lashkhi, V.L.** (2014). Motor oil as an important object of chemmotology. Moscow: Izdatelstvo Nedra, 223 p. (in Russian)

16. **Popov, Yu.V., Kovba, L.V., Azzheurova, O.B., Morozova, N.V., Kondukova, N.P.** (2020). Evaluation of methods of aircraft fuel quality analysis during investigation of aircraft accidents of civil aviation. *Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA)*, no. 32, pp. 76–86. (in Russian)

17. **Astafev, V.A.** (2019). Jet engine fuels thermal-oxidative stability measured under dynamic conditions by DTS-4 and DTS-2 methods, comparative analysis of the results. *55 let khimmotologii-osnovnyye itogi i napravleniya razvitiya: tezisy dokladov Mezhdedomstvennoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Moscow: 25 GOSNII khimmotologii MO RF, pp. 87–89. (in Russian)

18. **Romantsova, S.V., Ryazanceva, I.A., Malahov, K.S.** (2009). Stability of biodiesel fuels during the storage. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye i tekhnicheskkiye nauki*, vol. 14, no. 1, pp. 63–66. (in Russian)

Сведения об авторах

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

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

Балышин Кирилл Эдуардович, преподаватель кафедры авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, k.balyshin@mstuca.aero.

Савушкин Сергей Александрович, ассистент преподавателя кафедры авиатопливообеспечения и ремонта летательных аппаратов МГТУ ГА, s.savuschkin@mstuca.aero.

Харина Вера Константиновна, кандидат технических наук, доцент кафедры технической механики и инженерной графики МГТУ ГА, h.vera@bk.ru.

Information about the authors

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

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

Kirill E. Balyshin, Lecturer of Aircraft Fuel Supply and Repair Department Moscow State Technical University of Civil Aviation, k.balyshin@mstuca.aero.

Sergey A. Savushkin, Lecturer Assistant of Aircraft Fuel Supply and Repair Department Moscow State Technical University of Civil Aviation, s.savushkin@mstuca.aero.

Vera K. Harina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Technical Mechanics and Engineering Graphics Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, h.vera@bk.ru.

Поступила в редакцию 26.11.2022
Принята в печать 25.05.2023

Received 26.11.2022
Accepted for publication 25.05.2023

УДК.629.7.067.8

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-53-65

Analysis of the existing approaches to in-flight aircraft rerouting

M.A. Kiselev¹, Yu.S. Kalyuzhny², A.V. Karpov², Yu.V. Petrov¹

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

²*Federal Autonomous Organization "State Scientific Research Institute of Aviation Systems", Moscow, Russia*

Abstract: Currently, the large number of aircraft accidents is associated with the loss of control in flight and a controlled flight into terrain. It frequently occurs due to a change of flight conditions, relatively which a preparation for departure was carried out, and involves the necessity to reroute efficiently in the conditions of increased psychophysiological load and time constraint for decision-making. Generated thunderstorm cells on route, artificial or natural obstacles, not considered while planning a route, can result in amending a flight plan, which was earlier accepted and implemented in the automatic, flight director or manual modes of control. The lack of comprehensive situational awareness is fairly a frequent cause of aviation accidents for general aviation aircraft. Aviation accidents of transport category aircraft are typically associated with incorrect crew actions when dangerous flight zones are detected along the route. The article represents an overview and analyzes modern onboard facilities to detect obstacles, as well as required pilot actions to reroute a flight for in-flight detected obstacle avoidance. The current level of avionics development provides situational awareness necessary for obstacles avoidance but requires timely, correct and sometimes non-obvious flight crew rerouting decisions. The algorithms used with robotic packages of various applications in related fields ensure the automatic rerouting for obstacle avoidance. They cannot be directly used or adapted for the implementation on board an aircraft due to the lack of consideration for aircraft specific features when obstacle avoidance routing, i.e., restrictions of control parameters (an angle of attack, overload, roll angle), capabilities of a control system (available rate of overload, available and maximally allowable angular rolling velocity, etc.). Therefore, the issue to develop a system to support pilot decisions for obstacle avoidance is relevant. It encompasses the synthesis of safe alternatives for obstacle avoidance which are optimal by a pilot-assigned criterion (minimum loss of time, minimum additional fuel consumption, etc.).

Key words: flight on route, obstacle avoidance, algorithms of obstacle avoidance, construction of motion trajectories, flight automation.

For citation: Kiselev, M.A., Kalyuzhny, Yu.S., Karpov, A.V. (2023). Analysis of the existing approaches to in-flight aircraft rerouting. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 3, pp. 53–65. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-53-65

Анализ существующих подходов к перестроению маршрута полета воздушного судна в процессе его выполнения

М.А. Киселев¹, Ю.С. Калюжный², А.В. Карпов², Ю.В. Петров¹

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

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

Аннотация: В настоящее время большое количество авиационных происшествий связано с потерей управления в полете и столкновением с землей в управляемом полете. Зачастую это происходит вследствие изменения условий полета, относительно которых происходила подготовка к вылету, и связано с необходимостью оперативного перестроения маршрута полета в условиях повышенной психофизиологической нагрузки и дефицита времени на принятие решения. Причинами перестроения ранее принятого и реализуемого в автоматическом, директорном или ручном режимах управления плана полета может стать, например, возникновение на пути следования грозových очагов или появление не учтенных при планировании искусственных или естественных препятствий. Отсутствие полной ситуационной осведомленности является достаточно частой причиной авиационных происшествий для воздушных судов малой

авиации. Авиационные происшествия самолетов транспортной категории, как правило, связаны с неправильными действиями экипажа при обнаружении на пути следования опасных зон полета. В статье, носящей обзорный характер, анализируются современные бортовые средства обнаружения препятствий, а также необходимые действия пилота, связанные с изменением маршрута полета с целью облета препятствий, обнаруженных в ходе полета. Показано, что современный уровень развития авионики обеспечивает необходимую для облета препятствий ситуационную осведомленность, но требует принятия своевременных, правильных и зачастую неочевидных решений экипажем по перестроению маршрута полета. Используемые же в смежных областях робототехническими комплексами различного назначения алгоритмы, обеспечивающие автоматическое перестроение маршрута движения с целью обхода препятствий, не могут быть напрямую использованы или адаптированы для реализации на борту воздушного судна в силу отсутствия учета при построении маршрутов обхода препятствий специфических особенностей воздушных судов – ограничений на управляющие параметры (угол атаки, перегрузка, угол крена); возможности системы управления (располагаемые темп создания перегрузки, располагаемая и максимально допустимая угловая скорость крена и др.). Следовательно, актуальной представляется задача разработки системы поддержки принятия решения пилота по облету препятствий, обеспечивающей синтез альтернативных безопасных маршрутов облета препятствий, оптимальных по заданному пилотом критерию (минимальные потери времени, минимальные дополнительные затраты топлива и т. п.).

Ключевые слова: полет по маршруту, облет препятствий, алгоритмы облета препятствий, построение траекторий движения, автоматизация полета.

Для цитирования: Киселев М.А. Анализ существующих подходов к перестроению маршрута полета воздушного судна в процессе его выполнения / М.А. Киселев, Ю.С. Калужный, А.В. Карпов, Ю.В. Петров // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 3. С. 53–65. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-53-65

Introduction

The analysis of aviation accidents (AA) statistics, which occurred over a span of 2011–2020s¹ in the Russian Federation, shows that a significant part of AA as during commercial operations as while conducting general aviation flights (GAF) is associated with the following groups of events (fig. 1–4):

- collision with obstacles during the low-level operation (LALT);
- loss of control in flight (LOC-1);
- controlled flight into terrain (CFIT);
- encountering instrument meteorological conditions for which a flight crew is not permitted to operate (UIMC);
- encountering severe thunderstorm activity (WSTRW).

The results of investigations of the given AA revealed that the significant part of AA is caused by the lack of comprehensive situational awareness and wrong actions of a flight crew in the

environment of increased psychophysiological load and time constraint for decision-making.

A Mi-8 helicopter crashed on April 28th, 2002, which caused 8 fatalities including a Governor of Krasnoyarsk Region Alexander Lebed. The helicopter performed a flight in the mountainous area at the altitude lower than safe, and in the conditions of reduced visibility at an altitude of 35 m. it collided with thunderstorm protection wires of power lines, lost controllability and collided with the snowy ground surface sustaining substantial types of damage. It is obvious that available information about the relative position of the manned helicopter and power lines could have averted that crash.

Furthermore, crew notification about an obstacle on a flight route is not adequate to avert AA, e.g., Tu-154M aircraft of “Pulkovo” Airline crashed in the vicinity of Donetsk on August 22^d, 2006. During the flight close to the ceiling, the crew assessed improperly meteorological conditions, took an afterthought decision for leftward weather deviation climbing to the altitude of thunderstorm cells and after entering a band of hazardous phenomena exceeded the stalling angle of attack which resulted in stall configuring for a mode of flat-attitude spin. Eventually, the aircraft collided with terrain at a high vertical speed. One can claim that the timely providing one or several safe alternatives with the crew to continue a flight could have prevented the accident.

¹ The analysis of the RF civil aviation flight safety in 2020. Federal Air Transport Agency, Flight Safety Inspection Directorate, 2021, 97 p. Available at: https://aviaforum.ams3.cdn.digitaloceanspaces.com/data/attachment-files/2021/04/1598384_a3450354b90aa72fe5588472bb4eedfc.pdf (accessed: 08.10.2022).

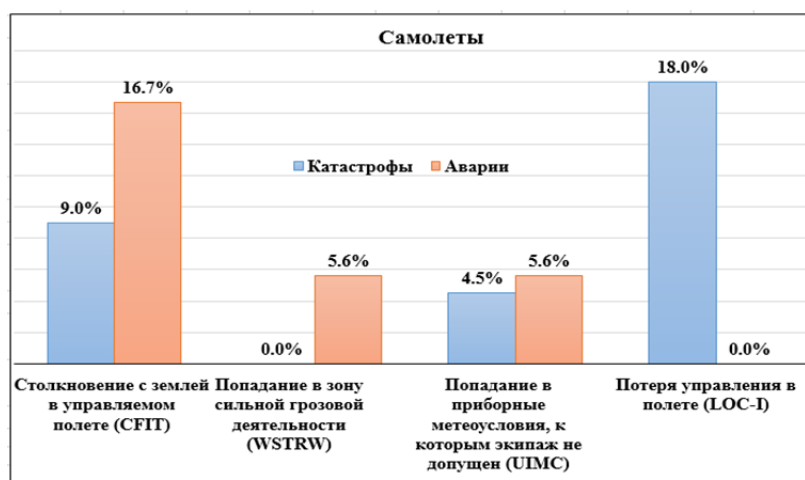


Fig. 1. Types of events that caused aviation accidents with commercial aircraft in 2011–2020s

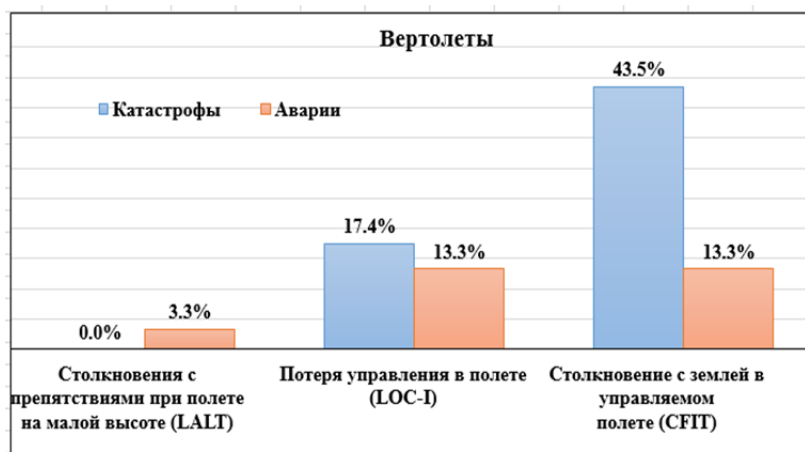


Fig. 2. Types of events that caused aviation accidents with commercial helicopters in 2011–2020s

Thus, an issue to identify potentially hazardous scenarios of flight and to form safe alternatives of its continuation is relevant in the broad sense. A task of operational, reconfiguration of a flight planned route in terms of the occurrence of obstacle threatening a flight safety, e.g., a terrestrial natural or artificial object, hazardous space area, etc., is particularly unequivocally of practical interest.

Analysis of the existing approaches to avoid obstacles

Modern aircraft can make a flight in the automatic or flight director mode in compliance with the onboard computer-assigned flight route.

The assignment method and the content of a flight plan depend on the aircraft type. At this rate, a long-haul aircraft flight plan comprises not only a flight via airways but also Standard Instrument Departure Routes (SID), Standard Arrival Route (STAR) and APPROACH procedures developed for each airport. However, with reference to a flight route, there are no critical differences between aircraft, as a rule, and a route is assigned by means of waypoints in airspace containing the original, turning, and terminal significant points of route. A flight route can be developed and input into the onboard computer by a pilot himself or computed in ground computers using special software and then downloaded onboard. Figure 5, as an example,

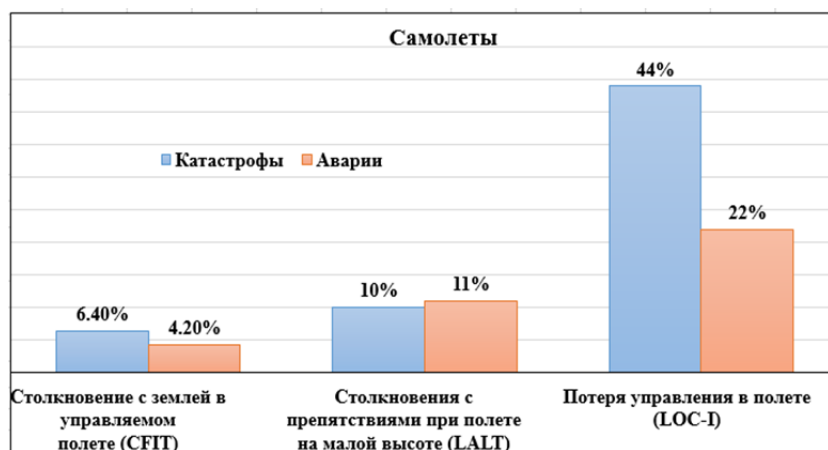


Fig. 3. Types of events that caused aviation accidents with general aviation aircraft in 2011–2020s

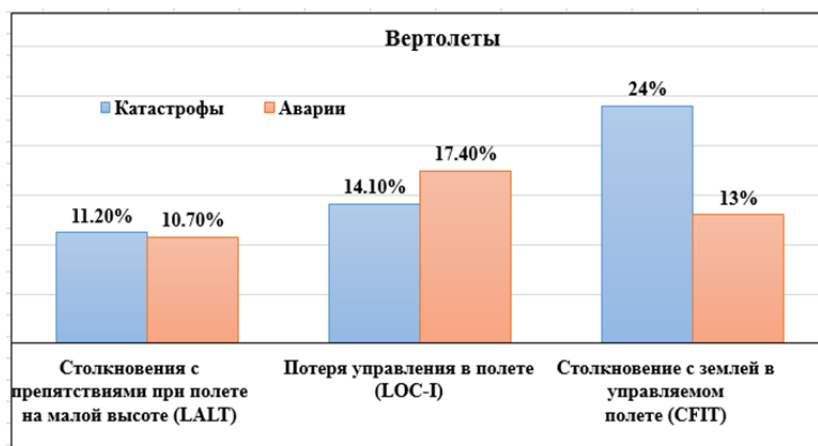


Fig. 4. Types of events that caused aviation accidents with general aviation helicopters in 2011–2020s

represents the screen of G3000 Garmin system developed for light aircraft with gas turbine engines, a user-assigned flight route in the form of a curve, connecting standard or user-assigned points of the route selected from the database. However, after takeoff rerouting, diversion can be carried out only by a pilot in the automatic (e.g., by adding new waypoints or assigning a new course of flight) or manual mode.

It should be noted that crews of modern aircraft possess sufficient situational awareness for a flight safety.

For example, information about marginal weather conditions can be obtained by a pilot from onboard meteorological radars or storm scopes as well as via broadcast channels of

communication. Figure 6 illustrates an example of a line squall in two scales on a multi-purpose indicator of the Airbus-type aircraft. Figure 7 illustrates the weather map obtained via a satellite communication channel of G1000 Garmin suite². To be based on the figures, a pilot can identify a type of a meteorological phenomenon (by color), a hazard degree of a meteorological phenomenon (by color intensity) and explore in detail the sizes and outlines of an area, changing the image scale as well [1].

² Pilot's Guide G1000 integrated flight deck Cessna citation mustang. Garmin.com, 2007, 508 p. Available at: https://static.garmin.com/pumac/G1000:CessnaMustang_PilotsGuide.pdf (accessed: 08.10.2022).

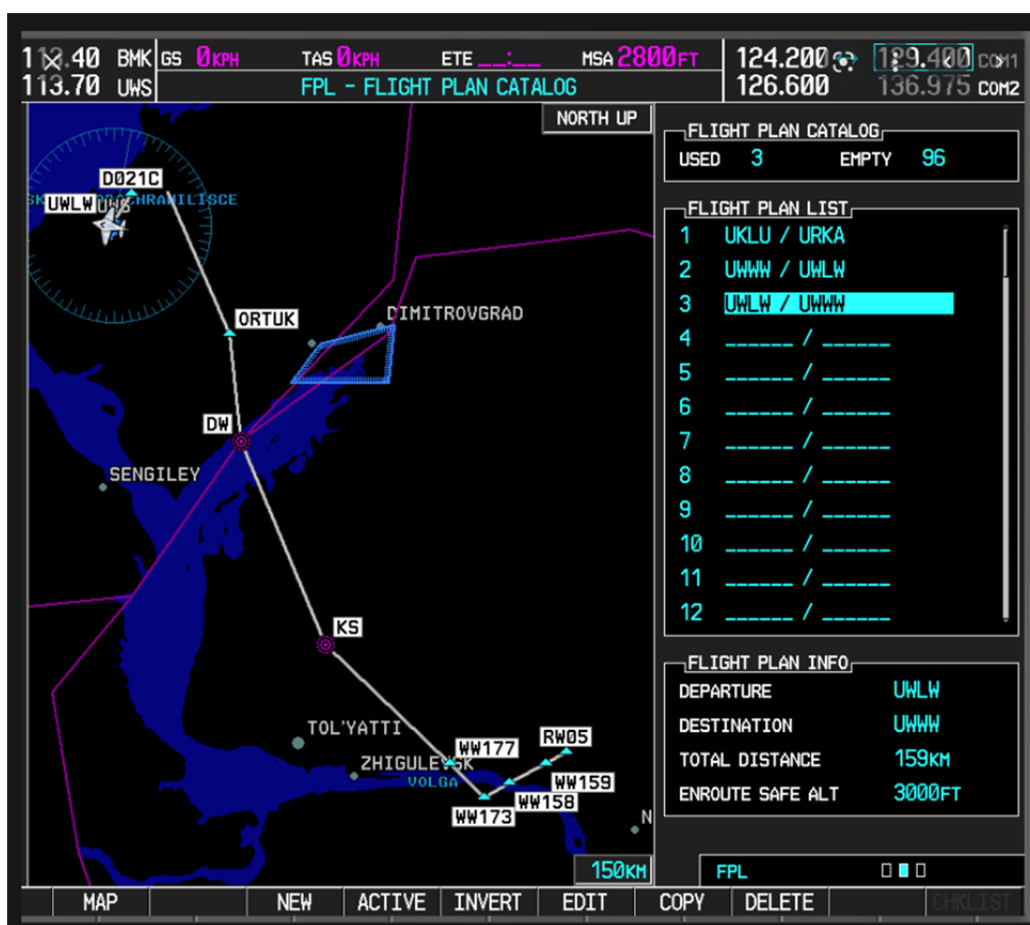


Fig. 5. Example of a flight route displayed on the G3000 Garmin screen

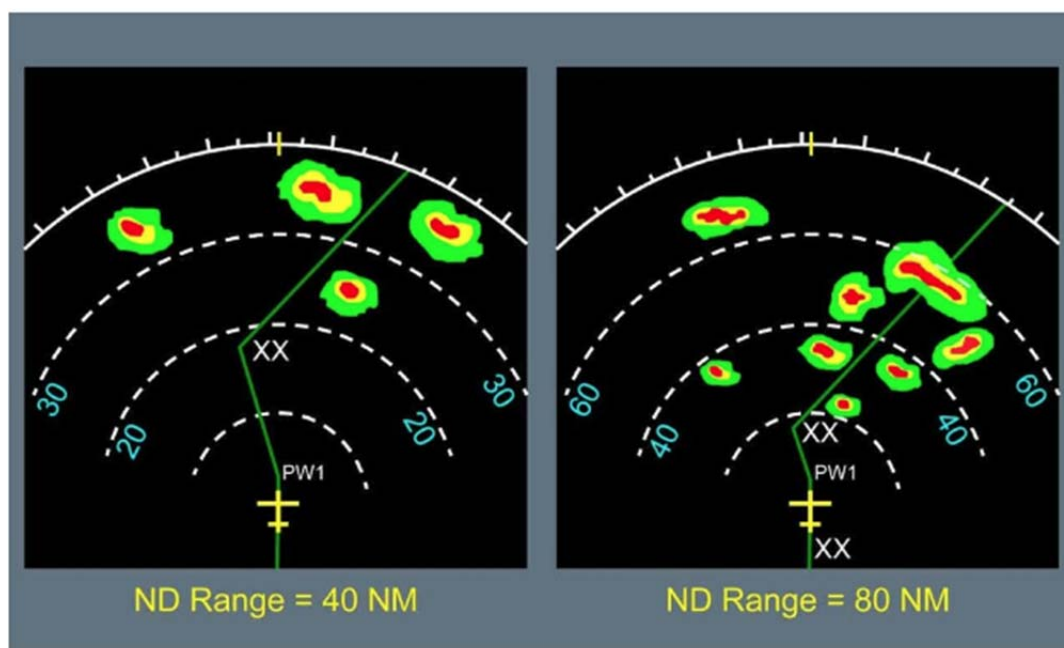


Fig. 6. Example of a line squall on a scale of 40 and 80 nautical miles

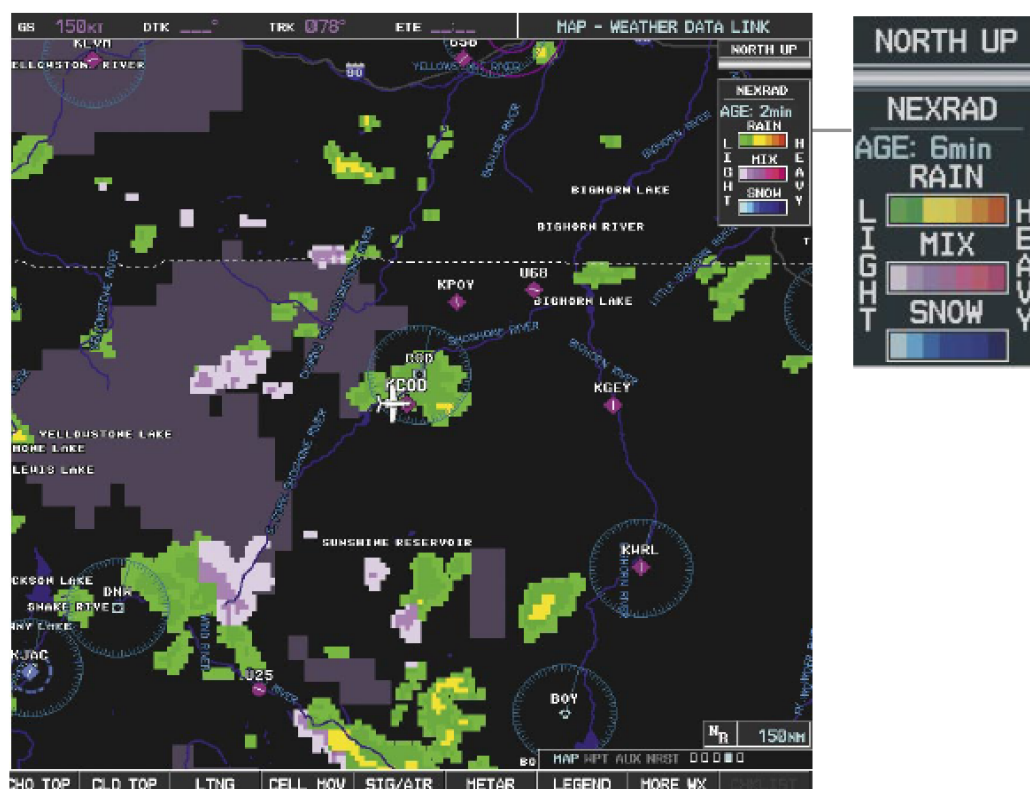


Fig. 7. Example of a weather map display in the Garmin suite



Fig. 8. Example a synthetic vision system display in the Garmin suite

During flights at low altitudes, information about artificial obstacles and terrain profile is critical. The information is stored on board aircraft in the form of digital terrain maps. As a rule, they are updated once a week or two weeks. Notably, digital maps use the systems of Syn-

thetic Vision (CV) and the Terrain Awareness and Warning Systems (TAWS) [2]. Figure 9 illustrates the display of the background synthesized on the Garmin suite screen. It is apparent that the synthetic image is distinguished with realism and provides a flight crew with required

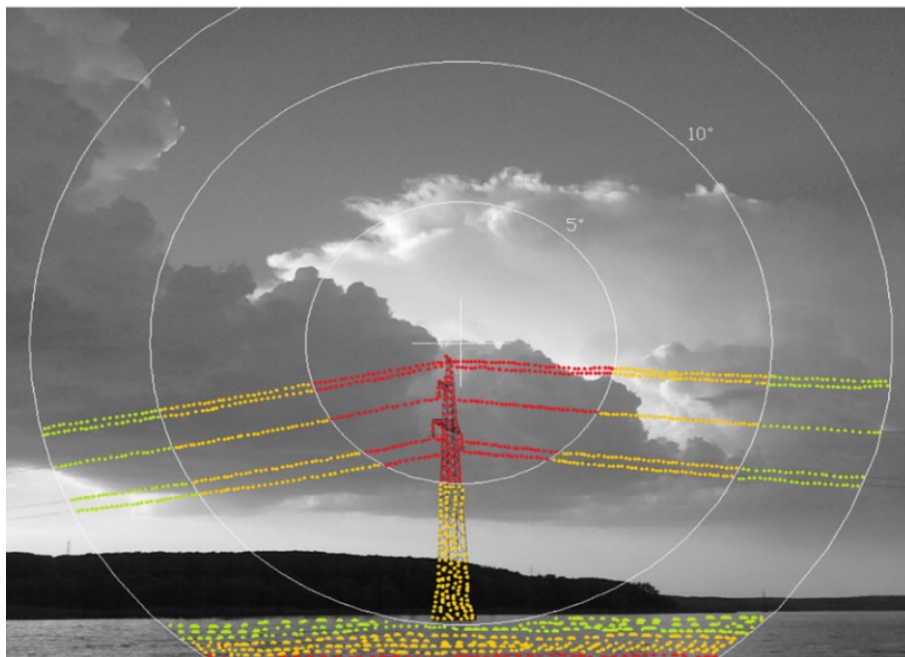


Fig. 9. Example of an obstacle detection display

information about the configuration of the terrain profile along the flight route in any conditions.

Moreover, aircraft can be fitted with cameras of different bands (visible and infrared), georadars and DME to detect obstacles on route. Lidars [3] have become widespread lately. An example of a complex image, obtained from cameras of visible and infrared bands combined with lidar data, is illustrated in Figure 9. It is apparent that the given image allows for an artificial obstacle on route of flight to be detected and identified.

General for all the stated above technical facilities is that all of them are informational. In essence, they only visualize information about an approaching obstacle, allowing a pilot to deal with all the arsenal of actions to avoid obstacles safely:

- obstacle detection on the screen;
- obstacle identification;
- assessment of its hazard degree;
- decision-making how to avoid an obstacle;
- implementing a decision.

Let us know that depending on a flight mode and a range of obstacle detection, the time available for a pilot to initiate the stated above actions can significantly differ. But, mostly common,

these actions are accomplished by a pilot within a short span of time in the circumstances of increased psycho-emotional tension, which, as the represented above AA analysis as well as the research results [4], can lead to errors even in sufficiently simple situations. Subsequently, a tool which, within a short span of time, can calculate and propose a pilot one or several safe and aircraft-implemented alternatives of the flight continuation to fly round an obstacle, is prioritized.

For efficient flight rerouting, there is a whole set of time-tested algorithms to avoid obstacles [5], used by various robotic packages such as unmanned utility tug and trailers, automobiles, robotic vacuum cleaners, etc. Let us consider some of the algorithms:

- Voronoi diagram;
- visibility graph;
- method of Rapidly Exploring Random Trees, RRT;
- Bug-algorithm.

The algorithm, based on Voronoi diagram [3], represents the architecture of alternatives consisting of segments the points of which are equally spaced from the points comprising the geometry of obstacle avoidance. Figure 10

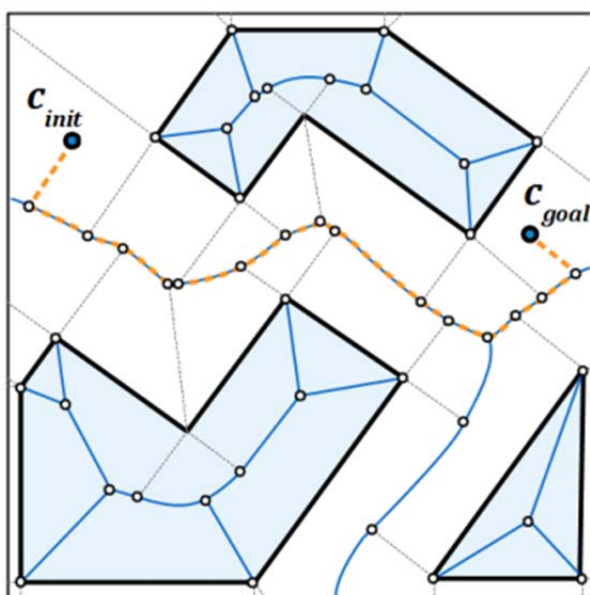


Fig. 10. Voronoi Diagram example

illustrates the example of such a route. The algorithm can build several alternatives simultaneously to avoid obstacles from which the shortest route can be defined using, for example, Dijkstra's algorithm [6, 7]. The disadvantage of the algorithm, based on Voronoi diagram, represents a substantial deceleration of computations as the number of obstacles increases.

The visibility graph-based method [8] handles defining transitional pairs of points between the original and terminal points of the flown-around route which can be connected with a straight line without crossing assigned obstacles. The disadvantage of the method is restrictions in the form of requirements for the obstacle shape - the algorithm operates merely with obstacles of a polyhedron or polygon shape. An example of routing by means of the visibility diagram is given in Figure 11.

The RRT method [9] is attributed to the techniques of random sampling. The method deals with building up a tree of double points from random positions located as closer as possible to the required terminal aircraft position with the subsequent erasing of two possible positions which when connected cross forbidden regions. An example of building a search tree by means of the RRT algorithm is illustrated in Figure 12. The figure shows two solutions with the

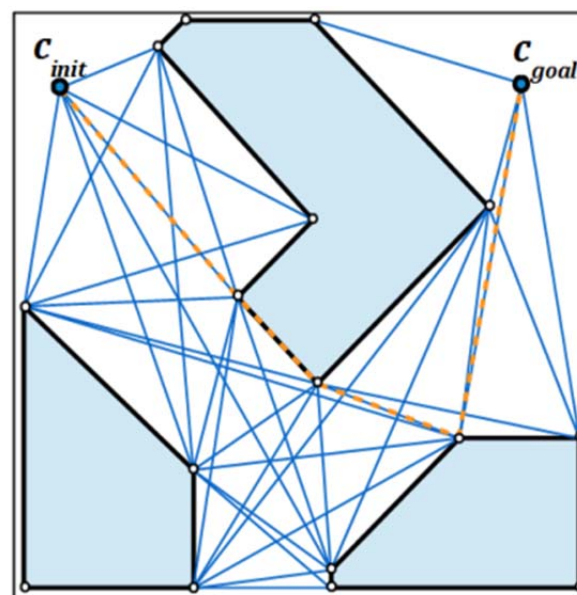


Fig. 11. Visibility Diagram example

different number of iterations: a – 1000 iterations, b – 2000 iterations. The advantage of the given method is relatively slight time increase required for the computation with the increase in the obstacle number. The drawback of the given method is that the algorithm issues merely a single alternative to avoid an obstacle which can be not optimal in terms of a route length.

A bug-algorithm [10] is used in self-contained and self-propelled robots. As input data, the algorithm takes advantage of obtained information about obstacles and the target of motion during the robot operation. The key point of the algorithm is that a robot moves to the target, and encountering an obstacle in front, it commences to move it around until rejoining an original route. The algorithm has several varieties. In this respect, obstacle avoidance can continue until a robot joins a point which is the closest to the target (fig. 13). In another algorithm version, while moving a robot tends to fly heading towards the target and complete obstacle avoidance when the present heading equals the original one (fig. 14). The disadvantage of the algorithm is that merely a single route of obstacle avoidance is built which can be not the shortest.

The general drawback of the considered algorithms is that all of them cannot be directly

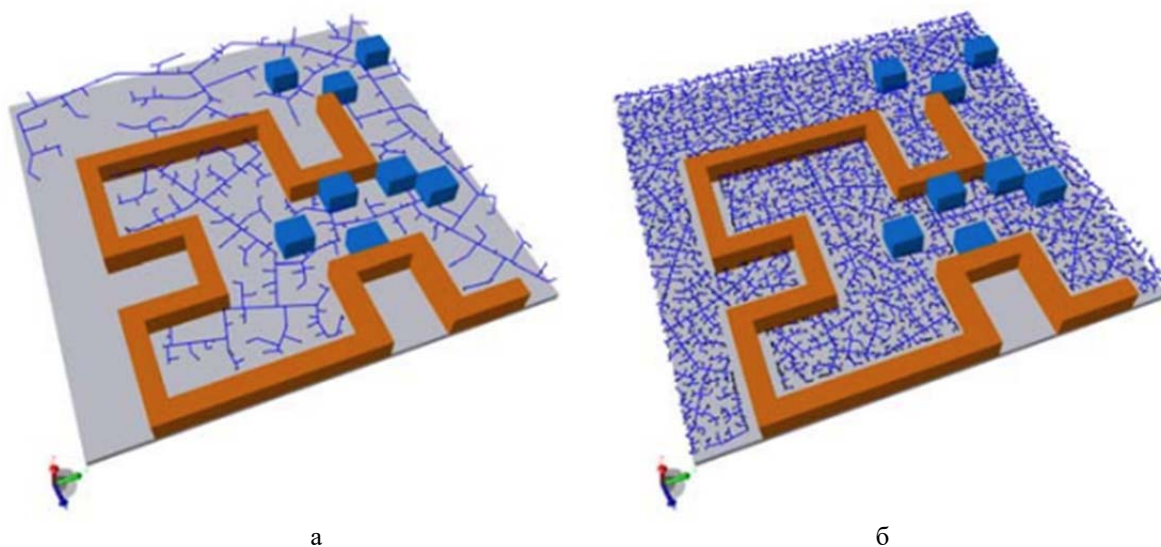


Fig. 12. Example of building a search tree using the RRT algorithm
a-1000 iterations, b-2000 iterations

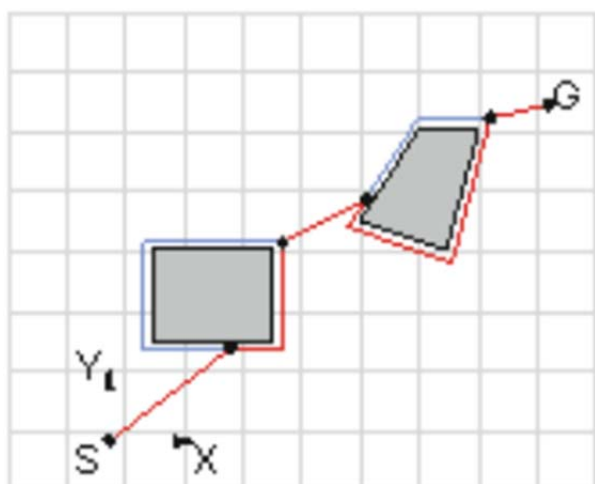


Fig. 13. Example of a Bug-variant algorithm
with entering the nearest point to the target

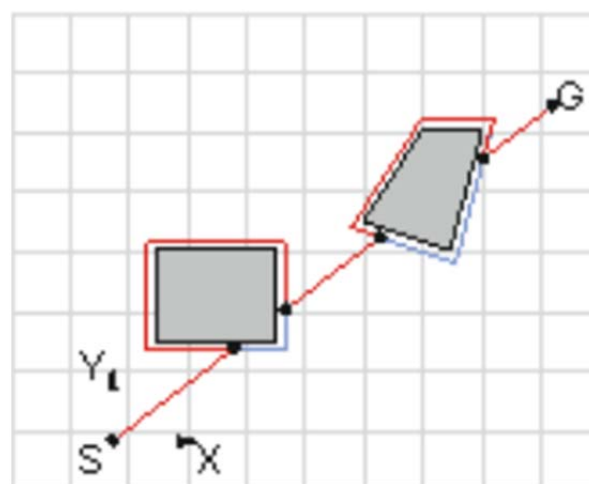


Fig. 14. Example of a Bug-variant algorithm
with maintaining the inclination of a straight line
to the target

used on board aircraft to build obstacle avoidance routes as the identified route represents a trajectory synthesized without taking into consideration the current limitations on control parameters of the aircraft such as lift-to-weight ratio, an angle of attack, etc. [11].

The current approaches to develop trajectories, implemented on board aircraft, can be classified into two groups on a provisional basis.

The first-group research [12] involves the probability-based approach and addresses prob-

lem solutions to overcome a defense system. This approach supposes the capability to penetrate a defense system zone, therefore, cannot be directly used to solve the stated above problems for obstacle avoidance.

The second-group research [13–17] focuses on the solution of a local problem to take the aircraft from the collision with an obstacle and does not suppose a further continuation of an original route of flight.

Conclusion

The represented above analysis of AA emphasizes the relevancy to generate algorithms providing an efficient review of a flight plan (route) during the process of its completion. We can assert that similar algorithms on board aircraft would contribute to preventing a series of different-type AA.

The cutting-edge airborne hardware ensures sufficient situational awareness of the pilot to identify obstacles and determine the extent of their hazard. At the same time, increased psychophysiological load and time constraint to take a decision makes it difficult to search an own right decision to avoid obstacles.

The algorithms used to avoid obstacles in the related fields cannot be used on board aircraft because of significant aircraft features as an object of control.

Thus, the current relevant objective is the development of problem-oriented onboard algorithms ensuring flight rerouting. The key requirements for the alike algorithms are as follows:

1. Determination of an array of alternatives ensuring obstacle avoidance maintaining a safe distance in an automatic or flight director modes of aircraft control with due regard for the aircraft capabilities and performance.

2. Automatic arrangement of an array of alternatives by assigned criteria (minimization of additional time expenditure required to avoid obstacles, minimization of additional fuel consumption to avoid obstacles, minimum lateral diversion from the original route of flight, minimum diversion from the original route by the flight altitude, etc.) with identifying optimal routes based on each of the assigned criteria.

REFERENCES

1. Dudnik, P.I., Kondratenkov, G.S., Tatarsky, B.G., Ilchuk, A.R., Gerasimov, A.A. (2006). Aviation radar complexes and systems. Moscow: VVIA im. Prof. N.Ye. Zhukovskogo, 1112 p. (in Russian)
2. Stevenson, G., Verdun, H.R., Stern, P.H., Koechner W. (1995). Testing the

helicopter obstacle avoidance system. In: *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, pp. 93–103. DOI: 10.1117/12.212025

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

4. Yakimenko, O.A. (1996). The content of “cockpit digitalization” through the pilot’s eyes. *Tekhnika vozdushnogo flota*, vol. 70, no. 3-4, pp. 11–16. (in Russian)

5. Kazakov, K.A., Semenov, V.A. (2016). An overview of modern methods for motion planning. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*, vol. 28, no. 4, pp. 241–293. DOI: 10.15514/ISPRAS-2016-28(4)-14 (in Russian)

6. Alshammrei, S., Boubaker, S., Kolsi, L. (2022). Improved Dijkstra algorithm for mobile robot path planning and obstacle avoidance. *Computers, Materials & Continua*, vol. 72, no. 3, pp. 5939–54. DOI: 10.32604/cmc.2022.028165

7. Makarenko, S.I. (2018). Stability method of telecommunication network with using topological redundancy. *Systems of Control, Communication and Security*, no. 3, pp. 14–30. DOI: 10.24411/2410-9916-2018-10302 (in Russian)

8. Berg, M., Cheong, O., Kreveld, M., Overmars, M. (2008). Computational geometry: Algorithms and applications. 3rd ed. Springer Berlin, Heidelberg, 386 p. DOI: 10.1007/978-3-540-77974-2

9. Cao, L., Wang, L., Liu, Y., Yan, S. (2022). 3D trajectory planning based on the rapidly-exploring random Tree-Connect and artificial potential fields method for unmanned aerial vehicles. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 19, issue 5, 17 p. DOI: 10.1177/17298806221118867 (accessed: 08.10.2022).

10. Mohsen, A.M., Sharkas, M.A., Zaghlol, M.S. (2019). New real time (M-Bug) algorithm for path planning and obstacle avoid-

ance in 2D unknown environment. In: *29th International Conference on Computer Theory and Applications, ICCTA 2019*. Alexandria, Egypt, pp. 25–31. DOI: 10.1109/ICCTA48790.2019.9478801

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

12. Arapov, O.L., Zuev, Yu.S. (2015). Reference trajectory design for overcoming dangerous zone. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, no. 3 (102), pp. 14–22. (in Russian)

13. Beliatskaia, A.P., Vorobev, V.V., Eliseev, B.P. (2021). Research of the methods of collision avoidance of aircraft with the ground in controlled flight during landing. In: *18th Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky, TSCZh 2021*. Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, pp. 1–6. DOI: 10.1109/TSCZh53346.2021.9628239

14. Akimov, A.N., Vorob'ev, V.V. (2001). A method and algorithms for veering a flying apparatus from the spatial constraint surface. *Automation and Remote Control*, vol. 62, no. 7, pp. 1042–1048.

15. Akimov, A.N., Vorobyov, V.V., Zatuchny, D.A. (2022). Aircraft drift away from limiting surfaces along programmed trajectories. In: *Limiting modes of aircraft flight*. Springer Aerospace Technology. Springer, Singapore, pp. 75–91. DOI: 10.1007/978-981-19-6329-2_5

16. Akimov, A.N., Vorobyov, V.V., Zatuchny, D.A. (2022). Onboard restraint systems. State of the issue. Formulation of the problem. In: *Limiting modes of aircraft flight*. Springer Aerospace Technology. Springer, Singapore, pp. 1–17. DOI: 10.1007/978-981-19-6329-2_1

17. Akimov, A.N., Vorob'yev, V.V., Demchenko, O.F., Dolzhenkov, N.N., Matveev, A.I., Podobedov, V.A. (2005). Design features of lightweight combat and training aircraft: a monograph. Moscow: Mashinostroyeniye, p. 368. (in Russian)

Список литературы

1. Дудник П.И. Авиационные радиолокационные комплексы и системы: учебник для вузов / П.И. Дудник, Г.С. Кондратенков, Б.Г. Татарский, А.Р. Ильчук, А.А. Герасимов. М.: ВВИА им. Н.Е. Жуковского, 2006. 1112 с.

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

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

4. Якименко О.А. Содержание «интеллектуализации борта» глазами летчика // *Техника воздушного флота*. 1996. Т. 70, № 3–4. С. 11–16.

5. Казаков К.А., Семенов В.А. Обзор современных методов планирования движения // *Труды Института системного программирования РАН*. 2016. Т. 28, № 4. С. 241–293. DOI: 10.15514/ISPRAS-2016-28(4)-14

6. Alshammrei S., Boubaker S., Kolsi L. Improved dijkstra algorithm for mobile robot path planning and obstacle avoidance // *Computers, Materials & Continua*. 2022. Vol. 72, no. 3. Pp. 5939–54. DOI: 10.32604/cmc.2022.028165

7. Макаренко С.И. Метод обеспечения устойчивости телекоммуникационной сети за счет использования ее топологической избыточности // *Системы управления, связи и безопасности*. 2018. № 3. С. 14–30. DOI: 10.24411/2410-9916-2018-10302

8. Berg M. Computational geometry: Algorithms and applications / M. Berg, O. Cheong, M. Kreveld, M. Overmars. 3rd ed. Springer Berlin, Heidelberg, 2008. 386 p. DOI: 10.1007/978-3-540-77974-2

9. Cao L. 3D trajectory planning based on the rapidly-exploring random Tree-Connect and artificial potential fields method for unmanned

aerial vehicles / L. Cao, L. Wang, Y. Liu, S. Yan [Электронный ресурс] // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2022. Vol. 19, iss. 5. 17 p. DOI: 10.1177/17298806221118867 (дата обращения: 08.10.2022).

10. Mohsen A.M., Sharkas M.A., Zaghlool M.S. New real time (M-Bug) algorithm for path planning and obstacle avoidance in 2D unknown environment // In: 29th International Conference on Computer Theory and Applications, ICCTA 2019. Alexandria, Egypt, 2019. Pp. 25–31. DOI: 10.1109/ICCTA48790.2019.9478801

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

12. Арапов О.Л., Зуев Ю.С. Формирование опорной траектории, обеспечивающей преодоление опасной зоны // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2015. № 3 (102). С. 14–22.

13. Beliatskaia A.P., Vorobev V.V., Eliseev V.P. Research of the methods of collision avoidance of aircraft with the ground in controlled flight during landing // In: 18th Technical Scientific Conference on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky, TSCZh 2021.

Moscow, 29–30 May 2021. Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2021. Pp. 1–6. DOI: 10.1109/TSCZh53346.2021.9628239

14. Акимов А.Н., Воробьев В.В. Методика и алгоритмы увода летательного аппарата от пространственной поверхности ограничения // Автоматика и телемеханика. 2001. № 7. С. 18–25.

15. Akimov A.N., Vorobyov V.V., Zatchny D.A. Aircraft drift away from limiting surfaces along programmed trajectories. In: Limiting modes of aircraft flight. Springer Aerospace Technology. Singapore: Springer, 2022. Pp. 75–91. DOI: 10.1007/978-981-19-6329-2_5

16. Akimov A.N., Vorobyov V.V., Zatchny D.A. Onboard restraint systems. State of the issue. Formulation of the problem. In: Limiting modes of aircraft flight. Springer Aerospace Technology. Singapore: Springer, 2022. Pp. 1–17. DOI: 10.1007/978-981-19-6329-2_1

17. Акимов А.Н. Особенности проектирования легких боевых и учебно-тренировочных самолетов: монография / А.Н. Акимов, В.В. Воробьев, О.Ф. Демченко, Н.Н. Долженков, А.И. Матвеев, В.А. Подобедов. М.: Машиностроение, 2005. 368 с.

Сведения об авторах

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

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

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

Петров Юрий Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической механики и инженерной графики МГТУ ГА, doctor561@rambler.ru.

Information about the authors

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

Yury S. Kalyuzhny, Lead Engineer, FAO “State Scientific Research Institute of Aviation Systems”, yury.kalyuzhny@gmail.com.

Andrey V. Karpov, Lead Engineer, FAO “State Scientific Research Institute of Aviation Systems”, ya.karanvik@gmail.com.

Yuriy V. Petrov, Doctor of Technical Sciences, Professor, The Head of the Technical Mechanics and Engineering Graphics Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, doctor561@rambler.ru.

Поступила в редакцию 26.12.2022
Принята в печать 25.05.2023

Received 26.12.2022
Accepted for publication 25.05.2023

УДК 656.022

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-66-77

Особенности организации туристических маршрутов как одного из методов повышения эффективности использования подвижного состава

Н.А. Коваленко¹, Л.С. Шорохова¹

¹ *Российский университет транспорта, РУТ (МИИТ), г. Москва, Россия*

Аннотация: В статье рассмотрены основные преимущества железнодорожного транспорта в сфере туристических перевозок и возможности эффективного использования подвижного состава для организации качественного сервиса транспортных услуг и привлечения новых клиентов. В настоящее время внимание большого количества ученых транспортной отрасли сосредоточено на пассажирских перевозках. Формируются основы взаимодействия железнодорожного транспорта и сферы туризма. Нельзя не отметить важность сектора железнодорожного туризма в экономической, социальной и экологической сферах общества. Имеются преимущества железнодорожного транспорта по сравнению с другими видами транспорта: самая большая по протяженности сеть железных дорог в Европе, возможность перевозки большого количества пассажиров, использование вагонов в качестве отеля на колесах, высокая степень надежности и безопасности, отсутствие зависимости от погодных условий, высокий уровень комфорта и сервиса в пути, предоставление выбора условий проезда в зависимости от типов вагонов и категории поездов, регулярность. Развитие маршрутной сети способствует увеличению конкурентоспособности региональных туристических направлений. При этом ключевыми факторами при выборе способа организации туристического маршрута являются: объем спроса со стороны пассажиров на заданный маршрут, размер расходов, длительность тура и другие. Сфера туристических перевозок не ограничивается использованием только железнодорожного транспорта. Его коллаборация с другими видами перевозок обеспечивает достижение максимального эффекта от туристического обслуживания при сохранении высокого уровня сервиса. Это взаимодействие является одной из составляющих туристического продукта, направленного на формирование и проработку всех ключевых моментов и этапов организации тура.

Ключевые слова: пассажиропоток, маршрут следования, туристический маршрут, железнодорожный туризм, туристический продукт, график движения поездов, нитки пассажирских поездов.

Для цитирования: Коваленко Н.А., Шорохова Л.С. Особенности организации туристических маршрутов как одного из методов повышения эффективности использования подвижного состава // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 3. С. 66–77. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-66-77

The features of organizing tourist routes as one of the methods to increase the efficiency of rolling stock usage

N.A. Kovalenko¹, L.S. Shorokhova¹

¹ *Russian University of Transport, RUT (MIIT), Moscow, Russia*

Abstract: The article deals with the main advantages of railway transport in the field of tourist transportation and the capabilities of effective rolling stock use for organizing high-quality transport service and attracting new customers. Currently, the attention of a great number of transport industry scientists is focused on passenger transportation. The foundations of interaction between railway transport and the tourism industry are being formed. The importance of the railway tourism sector cannot be underestimated in terms of economic, social and environmental aspects of the society. There are advantages of railway transport compared with other modes of transport: the longest railway network in Europe, ability to transport a large number of passengers, use of railway cars as a hotel on wheels, high degree of reliability and safety, lack of dependence on weather conditions, high level of comfort and amenities on board, providing a choice of travel conditions depending on the carriage types and train categories, regularity. The development of the route network contributes to the increase in the competitive abilities of regional tourist destinations. At the same time, the key factors in choosing the method of organizing a tourist route are as follows: the volume of passenger demand for an

assigned route, size of expenses, tour duration, etc. The field of tourist transportation is not limited to the use of rail transport only. Its collaboration with other types of transportation allows for maximum effect from tourist service while maintaining a high level of service. This interaction is one of the components of the tourism product aimed at addressing all the key aspects and stages of tour organization.

Key words: passenger traffic, route of travel, tourist route, railway tourism, tourist product, train schedule, passenger train lines.

For citation: Kovalenko, N.A., Shorokhova, L.S. (2023). The features of organizing tourist routes as one of the methods to increase the efficiency of rolling stock usage. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 3, pp. 66–77. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-66-77

Введение

Развитие туристического сектора в части железнодорожных перевозок обусловлено долгосрочной стратегией развития транспортной отрасли, направленной на повышение мобильности населения и развитие внутреннего туризма. Основным способом регулирования данного процесса выступают государство и сами туристические операторы, которые предоставляют различные виды туристического продукта.

Туристическая самобытность Российской Федерации связана с географическим положением. Не все населенные пункты имеют развитую железнодорожную инфраструктуру, но освоение данных территорий в части туризма будет иметь не только социально-культурную направленность, но и поможет транспортному развитию данных регионов.

Одним из наиболее перспективных направлений в туризме, позволяющих путешествовать по России на большие расстояния, является развитие железнодорожного туризма [1, 2].

Железнодорожный тур представляет собой путешествие организованной группы пассажиров по заданному маршруту на железнодорожном транспорте или в составе мультимодального маршрута [3], объединяющего различные виды транспорта (например, железнодорожный и автомобильный, железнодорожный и водный) продолжительностью от одного дня и с предоставлением различных вариантов туристического продукта (только транспортная составляющая перевозки, транспортная составляющая с возможностью покупки экскурсионного обслуживания в пути следования, полный тур)

и с обязательным страхованием пассажиров. Железнодорожный тур является элементом туристического продукта, который в свою очередь содержит увязку железнодорожного вида транспорта с другими для достижения максимального эффекта от организации туристического и экскурсионного обслуживания населения. Преимущества железнодорожного транспорта в сфере туристических перевозок приведены на рис. 1.

В настоящее время происходит становление сферы железнодорожного туризма: появляются новые варианты туров (гастрономический тур, туры выходного дня и однодневные, туристический поезд, железнодорожный круиз), увеличивается ассортимент предоставляемых услуг, формируются новые маршруты с различной протяженностью, обновляется подвижной состав, расширяется маршрутная сеть пассажирских поездов и т. д. Однако, несмотря на все эти достижения, в развитии данной сферы существует ряд проблем, которые требуют решения в целях повышения качества сервиса и увеличения мобильности населения: развитие инфраструктуры [4, 5], снижение уровня цен, что будет способствовать расширению доступности туров для различных групп пассажиров, и др. [6–8].

Основными крупнейшими операторами по предоставлению туристических продуктов с использованием железнодорожного транспорта являются ООО «РЖД Тур», дочернее предприятие АО «Федеральная пассажирская компания», и АО «ТК "Гранд Сервис Экспресс"». В 2021 году количество туристических маршрутов составило более 20, а в 2022 году – более 60 при длительности тура от одного дня.



Рис. 1. Преимущества железнодорожного транспорта в сфере туристических перевозок

Fig. 1. Advantages of railway transport in the field of tourist transportation

Работа в условиях ограничений, вызванных пандемией коронавируса [9, 10], показала способность операторских компаний оперативно перестраивать бизнес-процессы с учетом динамичных изменений рынка для осуществления бесперебойности перевозочного процесса [11–13].

Актуальность поставленной задачи в формате рассматриваемого объекта исследования основывается на развитии туристической сферы и железнодорожных перевозок в области организации туристических железнодорожных маршрутов. Это будет способствовать не только повышению эффективности использования подвижного состава АО «ФПК», но и позволит увеличить доходы компании путем увеличения спроса на перевозки со стороны населения.

Методология исследования

Парк пассажирских вагонов АО «ФПК» постоянно обновляется, хотя в 2021 году темпы снизились: в 2021 году было приобретено 293 вагона, в 2020 – 648, в 2019 – 572, в 2018 – 724, в 2017 – 425, в 2016 – 296 (рис. 2).

При покупке 293 вагонов в 2021 году было 1054. Средний возраст: купе – 18,4 года (износ – 60,5 %), плацкарта – 15,3 года

(45,5 %), СВ – 14,8 года (48,4 %). Наибольший износ у вагонов-ресторанов – 27 лет (72,1 %).

Организация туристических перевозок, направленных на повышение привлекательности железнодорожного транспорта в области перевозочного процесса, будет способствовать увеличению производительности и эффективности использования подвижного состава и росту мобильности населения, что позволит минимизировать вероятность возникновения неудовлетворенности спроса населения в области регулярных железнодорожных перевозок.

Важными критериями выбора подвижного состава для организации туристического поезда являются: [14–16].

- объем пассажиропотока по направлениям;
- дальность маршрута следования;
- величина спроса на категорию мест и класс обслуживания;
- величина потребного рабочего парка пассажирских вагонов разных типов.

Все туры условно можно разделить на однодневные (перевозка в течение 1 суток), двухдневные (или туры выходного дня) и многодневные.

Специфика однодневных туров основывается на следовании туриста по маршруту в течение дня без сна. Наиболее предпочти-

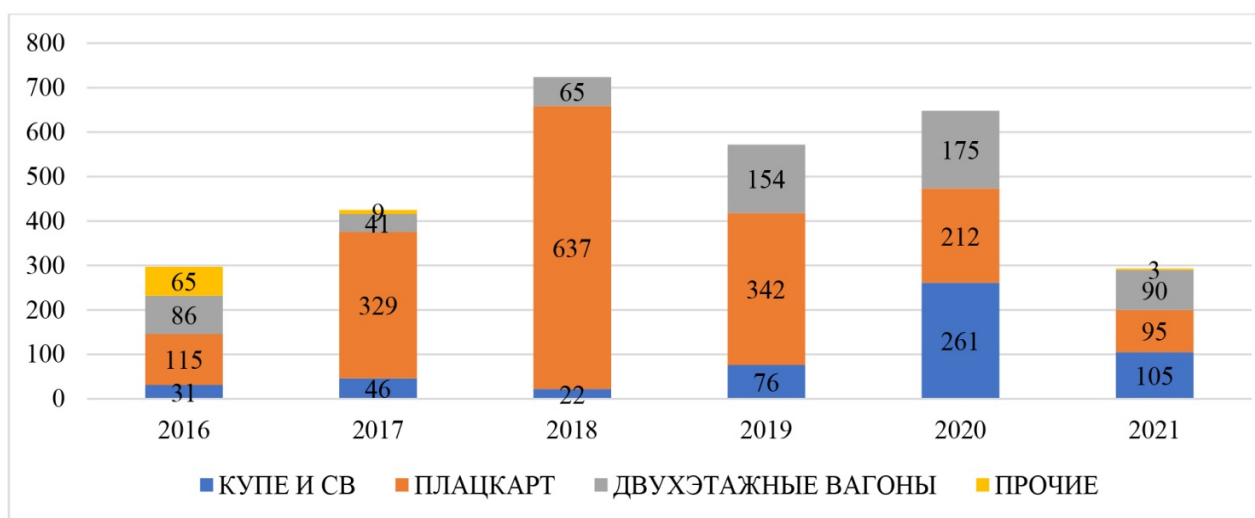


Рис. 2. Динамика обновления вагонного парка АО «ФПК» с 2016 по 2021 год
Fig. 2. Dynamics of AO "FPC" rolling stock renovation from 2016 to 2021

тельный подвижной состав для данных перевозок – это «Ласточка», «Стриж», «Сочи» и др. При этом дополнительный уровень комфорта в виде питания и спальных мест, как правило, не предусмотрен.

Отличительной особенностью двухдневных туров (или туров выходного дня) является то, что поездка осуществляется в ночное время. Поезд выступает в роли отеля на колесах, в котором ночуют пассажиры, перемещаясь между населенными пунктами, включенными в туристический маршрут. Туристы посещают экскурсии в дневное время суток. Поезда для путешествий указанной продолжительности обладают большим набором предоставляемых сервисных услуг для соблюдения требуемого уровня комфорта.

Многодневные туры также ориентированы на посещение городов, включенных в экскурсионное обслуживание в дневное время, а следование между населенными пунктами – в ночное [17]. Поезда формируются из вагонов более высокого уровня сервиса с дополнительными услугами, повышающими комфортность: стилизованные вагоны, мягкие сиденья. Формирование происходит из двухэтажных вагонов с добавлением вагонов-залов, багажных вагонов, вагонов-душевых, вагонов-SPA и других.

Расширенный парк пассажирских вагонов позволяет организовывать маршруты на разных направлениях и формировать различные комбинации следования данных вагонов в составе туристических пассажирских поездов.

Результаты исследования

Варианты организации перевозки пассажиров-туристов по заданному маршруту различны с учетом ограничений и особенностей (рис. 3).

При этом требования к выбору того или иного способа организации туристического маршрута определяются следующими основными факторами:

- объем спроса со стороны пассажиров на заданный маршрут;
- размер эксплуатационных расходов;
- длительность тура;
- пропускная способность и техническая оснащенность железнодорожных линий по маршруту следования туристических формирований [18];
- дальность пунктов экипировки и смены локомотивов и локомотивных бригад.

Составление бизнес-плана туристического маршрута туристического оператора

ВАРИАНТЫ СЛЕДОВАНИЯ ПАССАЖИРСКИХ ТУРИСТИЧЕСКИХ ВАГОНОВ С ПАС- САЖИРАМИ		
В составе прицепной группы к пассажирскому поезду регулярного обращения (действующего)	В составе туристического поезда	В составе туристического поезда, но с прицепной пассажирской группой другого назначения
Необходимо предусмотреть станции, на которых будет производиться отцепка/прицепка группы вагонов туристического поезда	Варианты прокладки: • По специально разработанной «нитке» и расписанию. • По «нитке» поезда регулярного обращения, но отменного. • По «нитке» поезда другой категории.	К туристическому поезду прицепляются пассажирские вагоны для отцепки на других станциях и включения их в составы пассажирских поездов регулярного обращения (использование факультативных вагонов)

Рис. 3. Варианты следования вагонов туристического поезда
Fig. 3. Options for carriage operation of a tourist train

(ООО «РЖД Тур», АО ТК «Гранд Сервис Экспресс») учитывает затраты, которые состоят из:

- эксплуатационной составляющей, связанной с организацией следования туристического пассажирского поезда при задержке грузовых поездов, тяговым обслуживанием, работой вагонного и локомотивных парков и т. д.;
- арендной составляющей за использование вагонов различных категорий компании АО «ФПК».

Особенность расходов в том, что схемы формирования составов выбираются с учетом удовлетворения спроса, но для достижения наибольшей рентабельности перевозки туристов на заданном маршруте.

Композиция состава туристического поезда влияет на уровень предоставляемых сервисных услуг и комфортабельность поездки, а также на вместимость и величину состава поезда, а следовательно, определяет расходы, связанные с обращением туристического поезда, и доходы, которые могут быть получены от реализации туристического продукта [19, 20];

- расходной составляющей за пользование инфраструктурой, которая учитывает зависимость только от числа и назначений туристических поездов. Данный расчет производится с ОАО «РЖД»;

- собственных расходов, связанных с организацией самого туристического продукта: экскурсионное обслуживание на маршруте следования (в поезде, во время стоянок), питание, проживание, расчет с другими перевозчиками за предоставленные услуги, страхование пассажиров и другие [21, 22].

На примере туристического поезда Москва Казанская – Севастополь – Москва Казанская (рис. 4) в статье рассматривается следование вагонов с организованной группой пассажиров [23]. Данный туристический маршрут выбран не случайно, так как в настоящее время на этом направлении курсируют только пассажирские поезда. Формирование маршрута туристического поезда на рассматриваемом участке позволит привлечь пассажиров, что будет способствовать увеличению прибыли для ООО «РЖД Тур» и АО «ФПК» и повышению уровня привлекательности со стороны населения. Организация туристического поезда на направлении позволит не снижать пропускную способность участка, так как в дни отсутствия пассажирского поезда по его нитке сможет курсировать туристический поезд и для его движения можно использовать имеющиеся мощности тягового обслуживания.

Привлекательность Крыма как части Российской Федерации обусловлена для туристов мягким климатом полуострова, богатой историей с огромным количеством памятни-

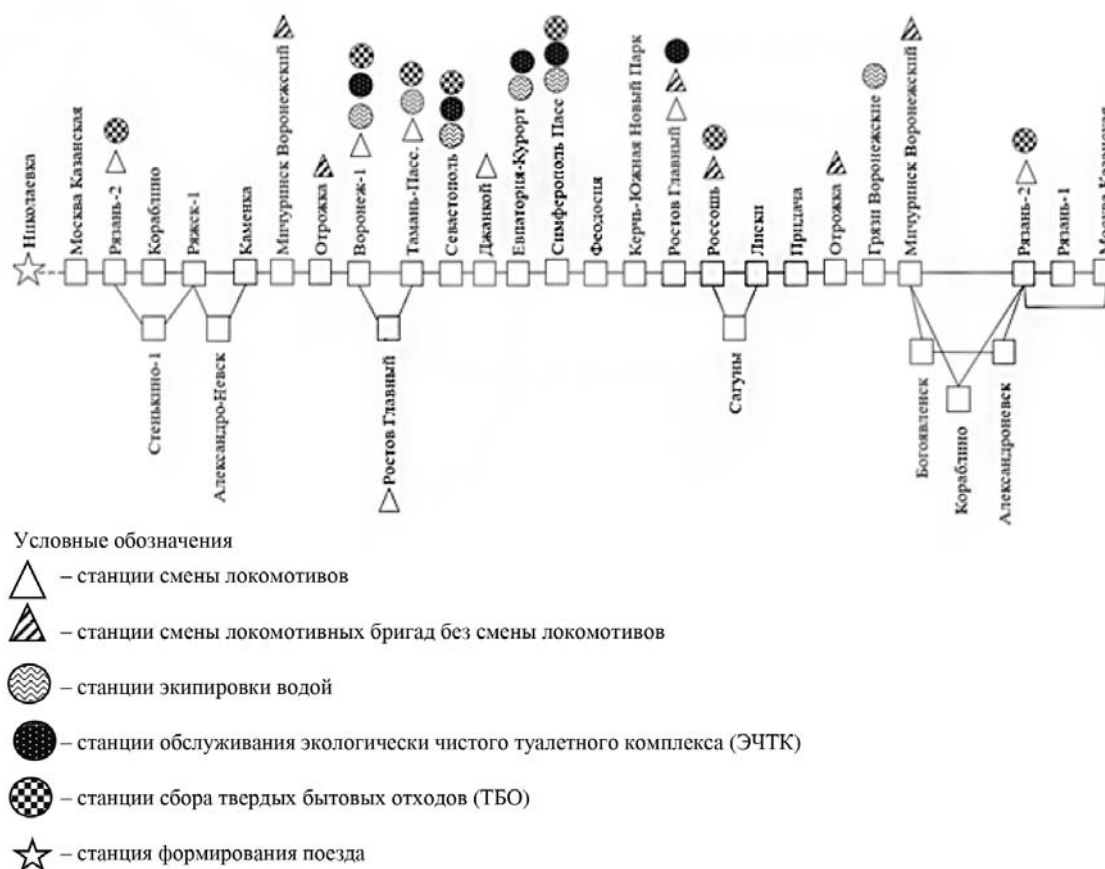


Рис. 4. Основной маршрут туристического поезда Москва Казанская – Севастополь – Москва Казанская
Fig. 4. Main route of the tourist train Moscow Kazanskaya – Sevastopol – Moscow Kazanskaya

ков культурного наследия и достопримечательностей. Также в последнее время постепенно происходит рост туристического пассажиропотока, восстанавливается инфраструктура туристической отрасли, которая была создана в советское время.

Схема формирования состава на направлении Москва Казанская – Севастополь – Москва Казанская представлена в виде восьми двухэтажных вагонов различных категорий (семь для пассажиров и один – вагон-ресторан). Общая продолжительность тура составляет 6,5 дня. Туристический поезд делает остановки с проведением экскурсионного обслуживания в таких городах, как Воронеж, Тамань, Севастополь, Евпатория, Симферополь, Феодосия, Керчь, Ростов-на-Дону.

В пути следования поезда предусмотрены остановки для выполнения следующих видов работ: смена локомотивов и (или) локомотивных бригад; экипировка водой; обслужи-

вание экологически чистого туалетного комплекса (ЭЧТК); сбор твердых бытовых отходов (ТБО).

Поезд на всем маршруте следует по различным вариантам прокладки нитки данного поезда в графике движения поездов на участках:

- Москва – Кораблино и Москва – Стенькино-1 предусматривается движение по свободной нитке поезда Москва – Ташкент/Юищек/Андижан;
- Воронеж – Тамань, Воронеж – Ростов Главный, Керчь – Зверево – возможно следование расписанием поезда Москва – Феодосия;
- Зверево – Грязи – расписанием поезда Ейск – Москва;
- Рязань-1 – Москва, Рязань-2 – Москва, Зверево – Рязань-2 – расписанием поезда Дмитровград – Москва;

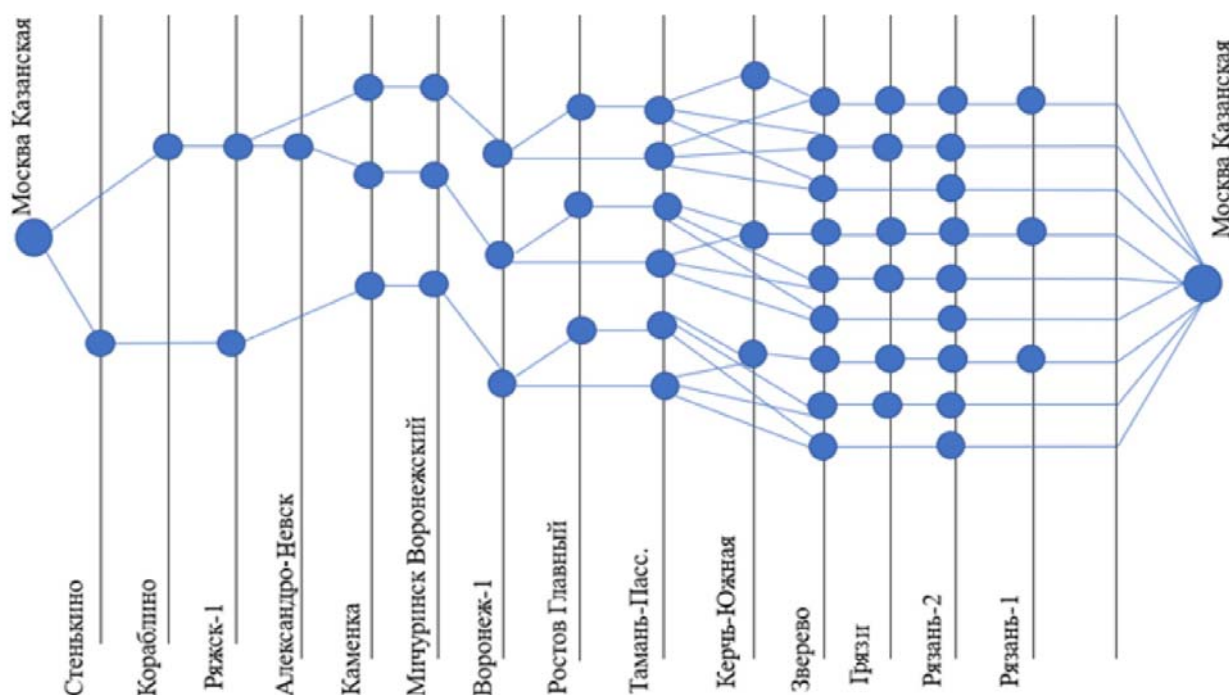


Рис. 5. Варианты формирования назначений туристического поезда Москва Казанская – Севастополь – Москва Казанская

Fig. 5. Options for the formation of the tourist train destinations Moscow Kazanskaya – Sevastopol – Moscow Kazanskaya

- Кораблино – Мичуринск Воронежский, Кораблино – Александров-Невск – Мичуринск Воронежский, Каменка – Мичуринск Воронежский – расписанием поезда Москва – Анапа;
- Мичуринск Воронежский – Воронеж, Стенькино-1 – Каменка, Ростов Главный – Тамань, Тамань – Керчь, Грязи – Рязань-1, Тамань – Зверево, Грязи – Рязань-2, Рязань-2 – Москва – разработанным расписанием.

При составлении маршрута следования туристического поезда может изменяться расписание следования других поездов. При наличии одного направления следования туристического поезда Москва Казанская – Севастополь – Москва Казанская количество поездных назначений варьируется в размере 18 (рис. 5).

В рассматриваемом исследовании точка безубыточности при фиксированном уровне стоимости экскурсионного обслуживания находится из следующих данных:

100 % туристов из Москвы (цена билета с экскурсионным обслуживанием 49 345 руб.) – 50 билетов;

100 % туристов из Воронежа (цена билета с экскурсионным обслуживанием 43 561 руб.) – 61 билет;

100 % туристов из Ростова-на-Дону (цена билета с экскурсионным обслуживанием 36 326 руб.) – 83 билета;

70 % туристов из Москвы, 20 % туристов из Воронежа, 10 % туристов из Ростова-на-Дону – 54 билета.

Прокладка нитки туристического поезда в график движения поездов [24] также зависит от уровня расходной составляющей и возможной прибыли, при этом рассматриваются следующие варианты:

- снижение пассажиропотока на заданном участке направления следования предусматривает возможность включения вагонов пассажирского поезда регулярного обращения в состав туристического поезда, а по освобожденной нитке допускается проследование туристического поезда;

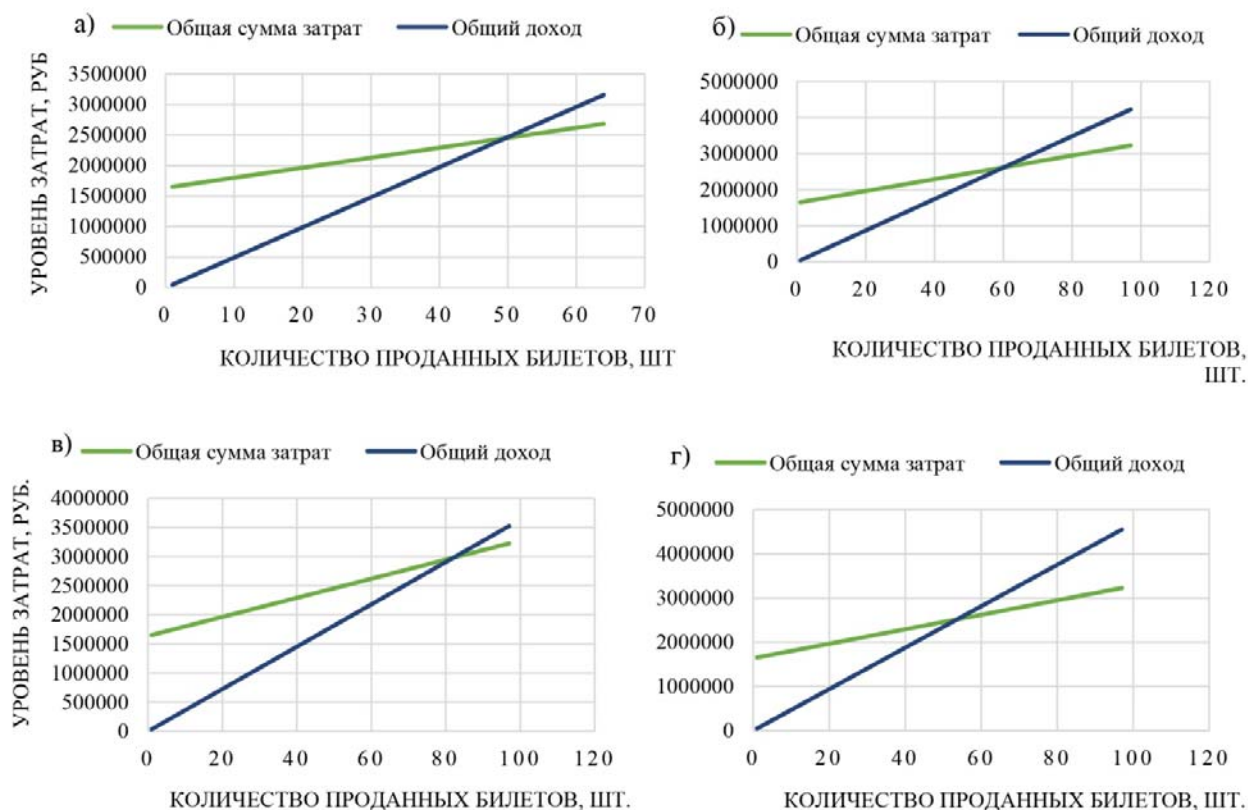


Рис. 6. Графическое отображение величины точки безубыточности при следовании туристического поезда по маршруту Москва – Севастополь – Москва:

а – 100 % туристов из Москвы, *б* – 100 % туристов из Воронежа, *в* – 100 % туристов из Ростова-на-Дону, *г* – 70 % туристов из Москвы, 20 % туристов из Воронежа, 10 % туристов из Ростова-на-Дону

Fig. 6. Graphical display of the break-even point value when operating a tourist train on the Moscow – Sevastopol – Moscow route:

a – 100% of tourists from Moscow; *b* – 100% of tourists from Voronezh; *c* – 100% of tourists from Rostov-on-Don; *d* – 70% of tourists from Moscow, 20% of tourists from Voronezh, 10% of tourists from Rostov-on-Don

- пассажиропоток для заданного туристического направления не достаточен для формирования полного состава, тогда данные туристические вагоны включаются в составы регулярных поездов;
- к уже сформированным туристическим поездам прицепляются факультативные вагоны для возможности регулирования вместимости поезда в связи с изменчивостью спроса населения на перевозки. Далее эти пассажирские вагоны будут использоваться для передачи на другие назначения при уменьшении пассажиропотока рассматриваемого направления.

Закключение

Изменение стратегии развития железнодорожного транспорта, перераспределение пассажиропотока с внешнего на внутренний туризм, формирование туристско-рекреационных зон на территории России привели к появлению новых возможностей использования железнодорожного пассажирского подвижного состава.

Однако в последние годы наблюдается тенденция сокращения парка пассажирских вагонов. Это может привести к повышению неудовлетворенности населения регулярных перевозок железнодорожным транспортом

и снижению уровня мобильности населения. Один из выходов для минимизации возможности возникновения данной ситуации (появления неудовлетворенности перевозками) является организация и развитие туристических железнодорожных маршрутов, которые будут способствовать освоению спроса на перевозки и росту привлекательности железнодорожного транспорта.

Туристические железнодорожные туры представляют собой один из быстроразвивающихся доходных сегментов. В рамках исследования рассмотрено следование туристического поезда на направлении Москва – Севастополь – Москва. При уровне транспортной составляющей для туристов из Москвы 27 745 руб., Воронежа – 21 961 руб., Ростова-Дону – 14 726 руб. стоимость экскурсионного обслуживания составляет 21 600 руб., что эквивалентно 77, 98, 146 %. В исследовании также приведена модель безубыточности рассматриваемого туристического железнодорожного маршрута.

Для привлечения пассажиропотоков на железнодорожный транспорт применяются различные маркетинговые инструменты, происходит совершенствование подвижного состава, увеличение уровня комфорта и доступности для клиентов. Для обеспечения качественного уровня сервиса при организации железнодорожных туров необходимо развивать инфраструктуру железнодорожной отрасли, улучшать условия транспортировки туристов, предоставлять комфортабельные вагоны, современные технические средства информационной связи и безопасности пассажиров.

Список литературы

1. Коваленко Н.А., Шорохова Л.С. Перспективные направления развития железнодорожного туризма // Наука и технологии железных дорог. 2022. Т. 6, № 3 (23). С. 61–68.
2. Peira G., Lo Giudice A., Miraglia S. Railway and tourism: A systematic literature review // Tourism and Hospitality. 2022. Vol. 3, iss. 1. Pp. 69–79. DOI: 10.3390/tourhosp3010005
3. Коваленко А.Н. Мультимодальные пассажирские перевозки в мегаполисе // Мир транспорта. 2013. Т. 11, № 3 (47). С. 140–144.
4. Коваленко Н.И., Коваленко Н.А. Соблюдение технологии работ для повышения уровня технического состояния железнодорожной инфраструктуры // Наука и технологии железных дорог. 2022. Т. 6, № 2 (22). С. 58–63.
5. Hoekstra M.S. Iconic architecture and middle-class politics of memory in a deindustrialized city // Sociology. 2020. Vol. 54, iss. 4. Pp. 693–710. DOI: 10.1177/0038038520906772
6. Gross S., Klemmer L. Rail in introduction to tourism transport. UK: CABI, Wallingford, 2014. 235 p.
7. Zeng Y., Liu L., Xu R. The effects of a virtual reality tourism experience on tourist's cultural dissemination behavior // Tourism and Hospitality. 2022. Vol. 3, iss. 1. Pp. 314–329. DOI: 10.3390/tourhosp3010021
8. Boluk K., Cavaliere C., Higgins-Desbiolles F. A critical framework for interrogating the United Nations sustainable development goals 2030 agenda in tourism // Journal of Sustainable Tourism. 2019. Vol. 27, iss. 7. Pp. 847–864. DOI: 10.1080/09669582.2019.1619748
9. Пазойский Ю.О., Савельев М.Ю., Середов Е.А. Закономерность распределения пассажиропотока в пассажирских поездах дальнего следования // Экономика железных дорог. 2022. № 7. С. 29–39.
10. Tang M., Xu H. Cultural integration and rural tourism development: A scoping literature review // Tourism and Hospitality. 2023. Vol. 4, iss. 1. Pp. 75–90. DOI: 10.3390/tourhosp4010006
11. Шаров В.А., Тимакова А.Ю. РУТ (МИИТ) должен «шагать в ногу» с развитием ОАО «РЖД» // Тенденции развития железнодорожного транспорта и управления перевозочным процессом: сборник материалов международной юбилейной научно-технической конференции, посвященной 95-летию кафедр «Железнодорожные станции и транспортные узлы», «Управление эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте». Москва, 20–21 ноября 2019 года. М.:

Российский университет транспорта, 2020. С. 48–54.

12. Тимкова А.Ю. Методы анализа процессов взаимодействия подвижного состава и пути при наличии дефектов колесных пар // Академик Владимир Николаевич Образцов – основоположник транспортной науки: сборник трудов международной научно-практической конференции, посвященной 125-летию университета. Москва, 22 октября 2021 года. М.: Российский университет транспорта, 2021. С. 432–439. DOI: 10.47581/2022/Obrazcov.57

13. Зябиров Х.Ш., Шапкин И.Н. Современные технологии в управлении перевозочным процессом на железнодорожном транспорте: монография. М.: Финансы и статистика; Транспорт, 2021. 480 с.

14. Lee C.-F., Chen K.-Y. Exploring factors determining the attractiveness of railway tourism // *Journal of Travel & Tourism Marketing*. 2017. Vol. 34, iss. 4. Pp. 461–474. DOI: 10.1080/10548408.2016.1182460

15. Taylor P., Frost W., Laing J. Path creation and the role of entrepreneurial actors: The case of the Otago Central Rail Trail // *Annals of Tourism Research*. 2019. Vol. 77 (C). Pp. 79–91. DOI: 10.1016/j.annals.2019.06.001

16. Rheeders T., Meyer D.F. The development of a regional tourism destination competitiveness measurement instrument // *Tourism and Hospitality*. 2023. Vol. 4, iss. 1. Pp. 1–20. DOI: 10.3390/tourhosp4010001

17. Вакуленко С.П. Расписание движения поездов с учетом удобства пересадки для пассажиров / С.П. Вакуленко, Л.Р. Айсина, В.Н. Шмаль, А.М. Насыбуллин // *Экономика железных дорог*. 2022. № 4. С. 67–74.

18. Бородин А.Ф. Повышение и использование перевозочной мощности полигонов сети: эффективные стратегия и тактика / А.Ф. Бородин, В.В. Панин, Е.А. Лаханкин, А.Ю. Соколов, Е.О. Дмитриев, А.А. Кравченко // *Железнодорожный транспорт*. 2022. № 7. С. 8–16.

19. Rajani F., Boluk K.A. A critical commentary on the SDGs and the role of tourism // *Tourism and Hospitality*. 2022. Vol. 3, iss. 4. Pp. 855–860. DOI: 10.3390/tourhosp3040053

20. Fei L., Jigang M., Xianghui L. Residents' perceived and expected value of linear cultural heritage: The example of the Yun-nan-Vietnam railway // *Tropical Geography*. 2021. Vol. 41, iss. 1. Pp. 93–103. DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003310

21. Pahlevan-Sharif S., Mura P., Wijesinghe S.N. A systematic review of systematic reviews in tourism // *Journal of Hospitality and Tourism Management*. 2019. Vol. 39. Pp. 158–165. DOI: 10.1016/J.JHTM.2019.04.001

22. Carnicelli S. Drummond S., Anderson H. Making the connection using action research: Serious leisure and the Caledonian railway // *Journal of Heritage Tourism*. 2020. Vol. 16, iss. 6. Pp. 615–631. DOI: 10.1080/1743873X.2020.1820015

23. Hoekstra M.S. Iconic architecture and middle-class politics of memory in a deindustrialized city // *Sociology*. 2020. Vol. 54, iss. 4. Pp. 693–710. DOI: 10.1177/003803852090677

24. Роменский Д.Ю. Пригородно-городские железнодорожные пассажирские перевозки на диаметральных маршрутах крупных транспортных узлов (на примере Московского транспортного узла): дисс. ... канд. тех. наук. М., 2021. 240 с.

References

1. Kovalenko, N.A., Shorokhova, L.S. (2022). Promising areas of railway tourism development. *Nauka i tekhnologii zheleznikh dorog*, vol. 6, no. 3 (23), pp. 61–68. (in Russian)

2. Peira, G., Lo Giudice, A., Miraglia, S. (2022). Railway and tourism: A systematic literature review. *Tourism and Hospitality*, vol. 3, issue 1, pp. 69–79. DOI: 10.3390/tourhosp3010005

3. Kovalenko, A.N. (2013). Multimode passenger traffic in megalopolis. *Mir transporta*, vol. 11, no. 3 (47), pp. 140–144. (in Russian)

4. Kovalenko, N.I., Kovalenko, N.A. (2022). Compliance with the technology of works to increase the level of technical condition of the railway infrastructure. *Nauka i tekhnologii zheleznikh dorog*, vol. 6, no. 2 (22), pp. 58–63. (in Russian)

5. **Hoekstra, M.S.** (2020). Iconic architecture and middle-class politics of memory in a deindustrialized city. *Sociology*, vol. 54, issue 4, pp. 693–710. DOI: 10.1177/0038038520906772
6. **Gross, S., Klemmer, L.** (2014). Rail in introduction to tourism transport. UK, CABI, Wallingford, 235 p.
7. **Zeng, Y., Liu, L., Xu, R.** (2022). The effects of a virtual reality tourism experience on tourist's cultural dissemination behavior. *Tourism and Hospitality*, vol. 3, issue 1, pp. 314–329. DOI: 10.3390/tourhosp3010021
8. **Boluk, K., Cavaliere, C., Higgins-Desbiolles, F.** (2019). A critical framework for interrogating the United Nations sustainable development goals 2030 agenda in tourism. *Journal of Sustainable Tourism*, vol. 27, issue 7, pp. 847–864. DOI: 10.1080/09669582.2019.1619748
9. **Pazoysky, Yu.O., Saveliev, M.Yu., Seredov, E.A.** (2022). The regularity of the distribution of passenger traffic in long-distance passenger trains. *Ekonomika zheleznykh dorog*, no. 7, pp. 29–39. (in Russian)
10. **Tang, M., Xu, H.** (2023). Cultural integration and rural tourism development: A scoping literature review. *Tourism and Hospitality*, vol. 4, issue 1, pp. 75–90. DOI: 10.3390/tourhosp4010006
11. **Sharov, V.A., Timakova, A.Yu.** (2020). RUT (MIIT) must “keep pace” with the development of Russian Railways. *Tendentsii razvitiya zheleznodorozhnogo transporta i upravleniya perevozochnym protsessom: sbornik materialov mezhdunarodnoy yubileyroy nauchno-tehnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 95-letiyu kafedr “Zheleznodorozhnyye stantsii i transportnyye uzly”, “Upravleniye ekspluatatsionnoy rabotoy i bezopasnost'yu na transporte”*. Moscow: Rossiyskiy universitet transporta, pp. 48–54. (in Russian)
12. **Timkova, A.Yu.** (2021). Methods for analyzing the processes of interaction between rolling stock and the track in the presence of wheel pair defects. *Akademik Vladimir Nikolayevich Obraztsov – osnovopolozhnik transportnoy nauki: sbornik trudov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy 125-letiyu universiteta*. Moscow: Rossiyskiy universitet transporta, pp. 432–439. DOI: 10.47581/2022/Obrazcov.57 (in Russian)
13. **Zyabirov, Kh.Sh., Shapkin, I.N.** (2021). Modern technologies in the management of the transportation process in railway transport: Monograph. Moscow: Finansy i statistika, Transport, 480 p. (in Russian)
14. **Lee, C.-F., Chen, K.-Y.** (2017). Exploring factors determining the attractiveness of railway tourism. *Journal of Travel & Tourism Marketing*, vol. 34, issue 4, pp. 461–474. DOI: 10.1080/10548408.2016.1182460
15. **Taylor, P., Frost, W., Laing, J.** (2019). Path creation and the role of entrepreneurial actors: The case of the Otago Central Rail Trail. *Annals of Tourism Research*, vol. 77 (C), pp. 79–91. DOI: 10.1016/j.annals.2019.06.001
16. **Rheeders, T., Meyer, D.F.** (2023). The development of a regional tourism destination competitiveness measurement instrument. *Tourism and Hospitality*, vol. 4, issue 1, pp. 1–20. DOI: 10.3390/tourhosp4010001
17. **Vakulenko, S.P., Aisina, L.R., Shmal, V.N., Nasybullin, A.M.** (2022). Train timetable taking into account the convenience of transfer for passengers. *Ekonomika zheleznykh dorog*, no. 4, pp. 67–74. (in Russian)
18. **Borodin, A.F., Panin, V.V., Lakhankin, E.A., Sokolov, A.Yu., Dmitriev, E.O., Kravchenko, A.A.** (2022). Increasing and using the transportation capacity of the network polygons: an effective strategy and tactics. *Zheleznodorozhnyy transport*, no. 7, pp. 8–16. (in Russian)
19. **Rajani, F., Boluk, K.A.** (2022). A critical commentary on the SDGs and the role of tourism. *Tourism and Hospitality*, vol. 3, issue 4, pp. 855–860. DOI: 10.3390/tourhosp3040053
20. **Fei, L., Jigang, M., Xianghui, L.** (2021). Residents' perceived and expected value of linear cultural heritage: The example of the Yun-nan-Vietnam railway. *Tropical Geography*, vol. 41, issue 1, pp. 93–103. DOI: 10.13284/j.cnki.rddl.003310
21. **Pahlevan-Sharif, S., Mura, P., Wijesinghe, S.N.** (2019). A systematic review of systematic reviews in tourism. *Journal of Hospitality and Tourism Management*, vol. 39, pp. 158–165. DOI: 10.1016/J.JHTM.2019.04.001

22. Carnicelli, S. Drummond, S., Anderson, H. (2020). Making the connection using action research: Serious leisure and the Caledonian railway. *Journal of Heritage Tourism*, vol. 16, issue 6, pp. 615–631. DOI: 10.1080/1743873X.2020.1820015

23. Hoekstra, M.S. (2020). Iconic architecture and middle-class politics of memory in a

deindustrialized city. *Sociology*, vol. 54, issue 4, pp. 693–710. DOI: 10.1177/003803852090677

24. Romenskiy, D.Yu. (2021). Suburban and urban railway passenger transportation on diametrical routes of large transport hubs (on the example of the Moscow transport hub): dis. ... kand. tekhn. nauk. Moscow, 240 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Коваленко Нина Александровна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)), nina-alex-kov@mail.ru.

Шорохова Любовь Сергеевна, аспирант, ассистент кафедры управления эксплуатационной работой и безопасностью на транспорте Российского университета транспорта (РУТ (МИИТ)), lyubov.shorokhova@list.ru.

Information about the authors

Nina A. Kovalenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Management of Operational Activity and Transport Safety Chair, Russian University of Transport (RUT (MIIT)), nina-alex-kov@mail.ru.

Lubov S. Shorokhova, Postgraduate Student, Assistant of the Management of Operational Activity and Transport Safety Chair, Russian University of Transport (RUT (MIIT)), lyubov.shorokhova@list.ru.

Поступила в редакцию 18.01.2023
Принята в печать 25.05.2023

Received 18.01.2023
Accepted for publication 25.05.2023

УДК 629.7.064.5

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-78-93

Методика определения реактивных параметров авиационных потребителей электрической энергии на основе данных о напряжении и токе в переходных процессах

В.И. Павлова¹, И.Е. Старостин¹

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

Аннотация: Современные тенденции развития авиационной техники связаны со значительным увеличением уровня ее электрификации. Появление новых видов потребителей электроэнергии влечет за собой увеличение мощности и количества потребителей в системе электроснабжения воздушных судов. На данном этапе эксплуатации прямой контроль внутренних параметров (в частности, параметров реактивных элементов) потребителей электроэнергии в системе электроснабжения воздушных судов не проводится. Система контроля авиационной техники строится с учетом встроенной системы мониторинга технического состояния объекта. Однако для большей эффективности встроенный контроль может быть дополнен возможностями управления с помощью цифровых интеллектуальных систем распределения энергии (локального центра управления нагрузками). В процессе эксплуатации авиационного электрооборудования значения его параметров изменяются относительно номинальных значений. Отклонения параметров оборудования от номинальных не должны превышать заданные значения, которые определяются эксплуатационной технической документацией. Входные импедансы вторичных источников электропитания могут быть исследованы в режиме, характеризующемся переходными процессами в исследуемом компоненте авиационного оборудования. Предлагается на основе экспериментальных данных напряжения и входного тока на стадии переходных процессов в схемах замещения вторичных источников электропитания определять значения параметров реактивных элементов. Изменение значений реактивных элементов дает информацию о техническом состоянии входных каскадов приемников электрической энергии. Это дает возможность отслеживать процесс деградации их свойств или диагностировать отказ в случае скачкообразного изменения реактивных параметров. Этот метод предлагается применять для диагностирования электрооборудования в процессе его функционирования на борту летательного аппарата. Настоящая работа посвящена разработке методов определения параметров вторичных источников питания авиационного электрооборудования, характеризующих его реактивные свойства.

Ключевые слова: диагностика авиационного оборудования, интеллектуальные системы распределения электроэнергии, переходные процессы.

Для цитирования: Павлова В.И., Старостин И.Е. Методика определения реактивных параметров авиационных потребителей электрической энергии на основе данных о напряжении и токе в переходных процессах // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 3. С. 78–93. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-78-93

Methodology for determining the reactive parameters of aviation electrical energy consumers based on voltage and current data in transients

V.I. Pavlova¹, I.E. Starostin¹

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

Abstract: Modern trends in the aircraft development are associated with a significant increase in the level of its electrification. The emergence of new types of electricity consumers entails an increase in the power and number of consumers in the aircraft power supply system. At this stage of operation, direct control of the internal parameters (in particular, the parameters of reactive elements) of electricity consumers in the aircraft power supply system is not carried out. The aviation equipment control system is

built taking into account the built-in system for monitoring the technical condition of the object. However, for greater efficiency, the built-in control can be supplemented with control capabilities through digital intelligent power distribution systems (local load control center). During the operation of aviation electrical equipment, the values of its parameters change relative to the nominal values. Deviations of equipment parameters from the nominal values should not exceed the specified values, which are determined by the operational technical documentation. Input impedances of secondary power supply sources can be investigated in a mode characterized by transient processes in the investigated component of aircraft equipment. Based on the experimental data of voltage and input current at the stage of transients in equivalent circuits of secondary power supplies, it is proposed to determine the values of the parameters of reactive elements. Changing the values of reactive elements gives information about the technical condition of the input stages of electrical energy receivers. This makes it possible to monitor the process of degradation of their properties or to diagnose a failure in the event of an abrupt change in reactive parameters. This method is proposed to be used for diagnosing electrical equipment during its operation on board the aircraft. This work is devoted to the development of methods for determining the parameters of secondary power sources of aircraft electrical equipment, characterizing its reactive properties.

Key words: diagnostics of aviation equipment; intelligent power distribution systems; transient processes.

For citation: Pavlova, V.I., Starostin, I.E. (2023). Methodology for determining the reactive parameters of aviation electrical energy consumers based on voltage and current data in transients. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 3, pp. 78–93. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-78-93

Введение

Анализ построения систем электроснабжения показывает необходимость разработки новых типов силовой коммутационной аппаратуры, обеспечивающей возможности управления электроэнергетическим комплексом в рамках концепции интегральной модульной авионики [1, 2].

Эта аппаратура, помимо коммутационных функций, должна поддерживать функции контроля токов и напряжений, оценку состояния оборудования и полностью сопрягаться с цифровой шиной управления [3].

Современные воздушные суда гражданской авиации РФ, в том числе и беспилотные летательные аппараты, характеризуются значительным совершенствованием бортового оборудования, прямой контроль внутренних параметров (например, параметров реактивных элементов) которого достаточно затруднен [4]. Это влечет за собой увеличение вероятности отказа электрического оборудования в полете, что может привести к увеличению вероятности выхода из строя важных потребителей электроэнергии [5]. Системная проблема эксплуатации современных ВС состоит в недостаточном подходе к диагностике и контролю предотказного состояния [6] в распределительных системах электроснабжения и, как следствие, в снижении эксплуатационной надежности общесамолетного оборудования и ряда других систем.

Современные интеллектуальные системы электроснабжения дают возможность реализации дополнительных функций, например оценки технического состояния по результатам измерения электрических параметров контролируемого оборудования в режиме реального времени [8]. Целесообразно такого рода диагностику проводить в системе распределения электроэнергии, управляющей большинством устройств электрооборудования ВС [9].

Система распределения электроэнергии воздушных судов имеет в своем составе встроенные источники вторичного электропитания (ВИП). ВИП предназначены для получения напряжения, необходимого для непосредственного питания электрической энергией электронных и других устройств. Техническое состояние вторичного источника электропитания характеризуется состоянием его параметров. Причины изменений значений параметров могут быть различные, такие как старение, износ элементов или короткое замыкание в цепи электрического тока. Постоянный контроль параметров и оценка технического состояния вторичного источника питания требует разработки специальных методов диагностики технического состояния [10]. В состав вторичных источников питания входят реактивные элементы. По изменению параметров реактивных элементов можно делать выводы о состоянии ВИП [11].

Система распределения электрической энергии электрически связана с входными каскадами ВИП, поэтому существует возможность измерения токов и напряжений для определения входных параметров ВИП. По изменению параметров реактивных элементов можно выявить предаварийные состояния контролируемого оборудования [12].

Постановка задачи

Воздушные суда комплектуются большим количеством приемников электрической энергии разнообразных по назначению, принципам действия и характеристикам, что в целом затрудняет их анализ как объектов контроля и диагностики. В силу большого разнообразия приемников каждый из них должен иметь встроенную систему контроля [13, 14].

Бортовое радиоэлектронное оборудование (БРЭО) перспективных воздушных судов (МС-21; SSJ-New; Ил-114-300 и т. д.) имеет встроенные источники вторичного электропитания, в которых цепи питания недоступны для систем встроенного контроля этих блоков. Однако оценка состояния цепей питания ВИП приемника электроэнергии может быть осуществлена с использованием аппаратных возможностей электронного центра управления нагрузками [15].

Важно уменьшить вероятность выхода из строя потребителей электроэнергии в полете за счет применения усовершенствованного подхода к диагностированию электрооборудования в процессе его эксплуатации [16].

Необходимо провести анализ переходных процессов при ступенчатом изменении напряжения с целью получения методики определения параметров реактивных элементов, входящих в состав вторичных источников электропитания, по данным напряжения и тока в переходных процессах. Предлагаемый способ использует существующее оборудование и не требует использования стимулирующих сигналов, поэтому относится к классу пассивных методов, не снижающих надежность системы. У системы распределения, помимо функций управления и защиты,

использующих измерение значений напряжения и тока потребления в реальном времени, появятся дополнительные возможности оценки состояния потребителей электроэнергии только путем модификации программной части системы распределения электрической энергии.

В качестве примера рассмотрим две схемы замещения вторичного источника электропитания (рис. 1, *а* и 1, *б*) [17].

По данным напряжения и тока в переходных процессах, определив параметры реактивных элементов, можно диагностировать техническое состояние реального вторичного источника электропитания.

Методология исследования

Для схем, указанных на рис. 1, *а*, *б*, можно рассмотреть два способа определения значений реактивных параметров – при синусоидальном входном напряжении и при постоянном напряжении [18]. В первом варианте экспериментальное исследование реактивных элементов осуществляется путем подачи входного напряжения сигналов переменной частоты. В данной статье рассматривается второй вариант, при котором на исследуемый приемник подается постоянное входное напряжение бортовой сети, которое может меняться в зависимости от режимов работы системы электроснабжения. Для определения параметров схем замещения, показанных на рис. 1, *а*, *б*, необходимо иметь динамику входных напряжения и тока в переходных процессах после подачи питания, получаемую с использованием схемы замещения, показанной на рис. 2, и динамику входного напряжения после отключения питания, получаемую с использованием схемы замещения, показанной на рис. 3, *а*, *б*.

Для нахождения тока и напряжения в исследуемой цепи воспользуемся первым и вторым правилами Кирхгофа [19].

Для схемы, показанной на рис. 1, *а*, для режима включения, используя схему замещения, показанную на рис. 2, *а*, в соответствии с первым правилом Кирхгофа имеем

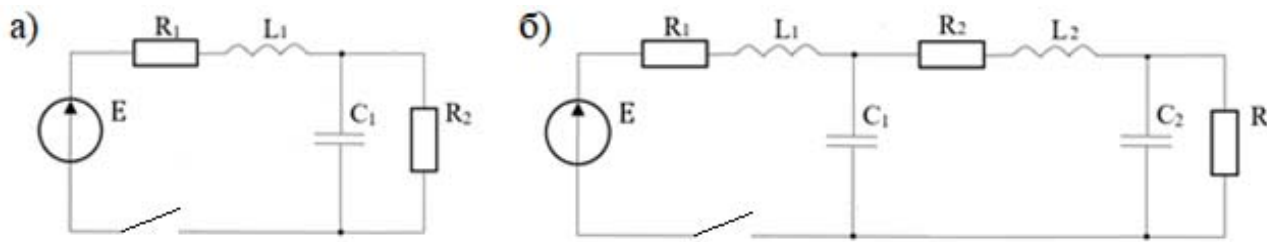


Рис. 1. Электрическая схема замещения входных цепей вторичного источника питания:

a – с одним каскадом RLC; *б* – с двумя каскадами RLC

Fig. 1. Electrical equivalent circuit of the secondary power supply circuits:

a – with one RLC stage; *b* – with two RLC stages

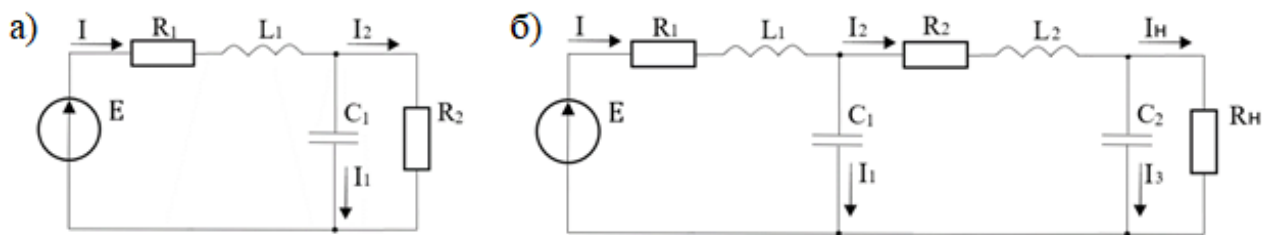


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема замещения входных цепей питания при подключении его

к источнику: *a* – однокаскадная; *б* – двухкаскадная

Fig. 2. Equivalent electric circuit of substitution of input power circuits when connected to a source:

a – with one RLC stage; *b* – with two RLC stages

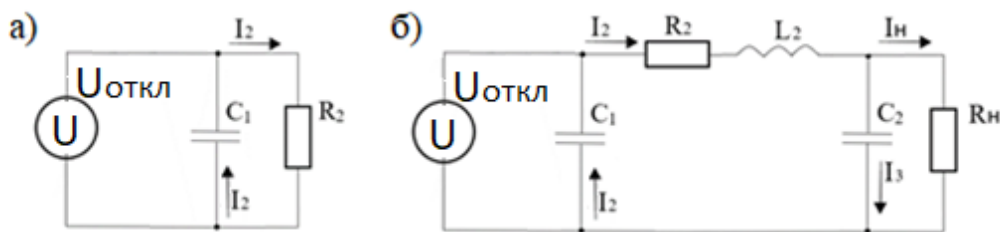


Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема замещения входных цепей питания после отключения от сети:

a – однокаскадная; *б* – двухкаскадная

Fig. 3. Equivalent electric circuit of substitution of input power circuits after disconnection from the network:

a – with one RLC stage; *b* – with two RLC stages

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t); \quad (1)$$

по второму правилу Кирхгофа, а также в силу связи заряда на конденсаторе с током через конденсатор имеем

$$E(t) = R_1 i(t) + L_1 \frac{di(t)}{dt} + R_2 i_2(t), R_2 i_2(t) = \frac{q(t)}{C_1}, i_1(t) = \frac{dq(t)}{dt}. \quad (2)$$

Согласно соотношениям (1), (2) получаем

$$(R_1 + R_2) i(t) + (C_1 R_1 R_2 + L_1) \frac{di(t)}{dt} + C_1 L_1 R_2 \frac{d^2 i(t)}{dt^2} = E(t) + C_1 R_2 \frac{dE(t)}{dt}. \quad (3)$$

Учитывая, что значения параметров схемы замещения и напряжения питания не изменяются при переключении, система дифференциальных уравнений, описывающих переходный процесс, представляет собой линейное неоднородное дифференциальное уравнение, в котором правая часть является константой (предполагаем, что напряжение меняется ступенчато).

Для нахождения неизвестных R , L и C в схеме, показанной на рис. 1, а, введем переменные замены:

$$A = R_1 + R_2; B = C_1 R_1 R_2 + L_1; D = L_1 R_2 C_1; F = C_1 R_2. \quad (4)$$

В режиме отключения, используя схему замещения, показанную на рис. 3, а, в соответствии со вторым правилом Кирхгофа, а также используя связь заряда на конденсаторе с током через конденсатор, имеем

$$U_{\text{откл}}(t) = \frac{q(t)}{C_1}, R_2 i_2(t) = \frac{q(t)}{C_1}, i_2(t) = -\frac{dq(t)}{dt};$$

отсюда имеем дифференциальное уравнение первого порядка для напряжения после снятия электропитания

$$U_{\text{откл}}(t) + C_1 R_2 \frac{dU_{\text{откл}}(t)}{dt} = 0. \quad (5)$$

Учитывая ступенчатый характер изменения напряжения, имеем в силу (3)–(5)

$$A i(t) + B \frac{di(t)}{dt} + D \frac{d^2 i(t)}{dt^2} = E(t), U_{\text{откл}}(t) + F \frac{dU_{\text{откл}}(t)}{dt} = 0. \quad (6)$$

Как видно из (6), величина F является постоянной времени отключения $\tau_{\text{откл}}$, получаемой из динамики напряжения отключения $U_{\text{откл}}(t)$, будем далее полагать $F = \tau_{\text{откл}}$. Отсюда для схемы замещения, показанной на рис. 1, а, в силу (4) имеем

$$L_1 = \frac{D}{\tau_{\text{откл}}}, R_1 = \frac{B}{\tau_{\text{откл}}} - \frac{D}{\tau_{\text{откл}}^2}, R_2 = A - \frac{B}{\tau_{\text{откл}}} + \frac{D}{\tau_{\text{откл}}^2}, C_1 = \frac{\tau_{\text{откл}}^3}{A\tau_{\text{откл}}^2} - B\tau_{\text{откл}} + D. \quad (7)$$

Определив, используя (6), из кривых тока и напряжения, взятых в переходных процессах после подачи и отключения питания, параметры A , B , D , $F = \tau_{\text{откл}}$, затем из (7) мы определим параметры схемы замещения, показанной на рис. 1, а.

Для схемы, показанной на рис. 1, б, для режима включения, используя схему замещения, показанную на рис. 2, б, в соответствии с первым правилом Кирхгофа, а также учитывая связь тока через конденсатор с зарядом на конденсаторе, имеем

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t), i_2(t) = i_3(t) + i_n(t), i_3(t) = \frac{dq_2(t)}{dt}, i_1(t) = \frac{dq_1(t)}{dt}; \quad (8)$$

по второму правилу Кирхгофа имеем

$$E(t) = R_1 i(t) + L_1 \frac{di(t)}{dt} + \frac{q_1}{C_1}, \frac{q_1(t)}{C_1} - \frac{q_2(t)}{C_2} - L_2 \frac{di_2(t)}{dt} - R_2 i_2(t) = 0, \frac{q_2(t)}{C_2} - R_n i_n(t) = 0. \quad (9)$$

Из (8) и (9) получаем дифференциальное уравнение четвертого порядка:

$$E(t) + ((R_H + R_2)C_1 + R_H C_2) \frac{dE(t)}{dt} + (L_2 + R_H R_2 C_2) C_1 \frac{d^2 E(t)}{dt^2} + R_H L_2 C_2 C_1 \frac{d^3 E(t)}{dt^3} = (R_H + R_1 + R_2) i(t) + (R_1 C_1 (R_H + R_2) + R_H (R_1 + R_2) C_2 + L_1 + L_2) \frac{di(t)}{dt} + ((R_H + R_2) C_1 L_1 + R_H C_2 (L_1 + L_2) + R_1 C_1 (R_H R_2 C_2 + L_2)) \frac{d^2 i(t)}{dt^2} + ((R_H R_2 C_2 + L_2) L_1 + R_H L_2 C_2 R_1) C_1 \frac{d^3 i(t)}{dt^3} + R_H L_1 L_2 C_1 C_2 \frac{d^4 i(t)}{dt^4}. \quad (10)$$

Для определения параметров схемы, показанной на рис. 1, б, введем переменные замены:

$$A = R_H + R_1 + R_2, B = R_1 C_1 (R_H + R_2) + R_H (R_1 + R_2) C_2 + L_1 + L_2, H = R_H L_1 L_2 C_1 C_2, \quad (11)$$

$$D = C_1 L_1 (R_H + R_2) + R_H C_2 (L_1 + L_2) + R_1 C_1 (R_H C_2 R_2 + L_2), F = R_H C_1 C_2 L_2, \quad (12)$$

$$G = (R_H R_2 C_2 + L_2) C_1 L_1 + R_H L_2 C_1 C_2 R_1, J = C_1 (R_2 R_H C_2 + L_2), M = R_H C_2 + C_1 (R_2 + R_H). \quad (13)$$

Согласно (11)–(13) уравнение (10) с учетом ступенчатого характера изменения напряжения примет вид

$$E(t) = A i(t) + B \frac{di(t)}{dt} + D \frac{d^2 i(t)}{dt^2} + G \frac{d^3 i(t)}{dt^3} + H \frac{d^4 i(t)}{dt^4}. \quad (14)$$

Для режима отключения питания, используя схему замещения, показанную на рис. 3, б, согласно первому правилу Кирхгофа, а также учитывая связь тока через конденсатор с зарядом на конденсаторе, имеем

$$i_2(t) = i_3(t) + i_H(t), i_3(t) = \frac{dq_2(t)}{dt}, i_2(t) = -\frac{dq_1(t)}{dt};$$

по второму правилу Кирхгофа имеем

$$\frac{q_2(t)}{C_2} = R_H i_H(t), \frac{q_1(t)}{C_1} = R_2 i_2(t) + \frac{q_2(t)}{C_2} + L_2 \frac{di_2(t)}{dt}, U_{\text{откл}}(t) = \frac{q_1(t)}{C_1},$$

отсюда из полученных уравнений имеем для напряжения отключения $U_{\text{откл}}$ дифференциальное уравнение третьего порядка

$$U_{\text{откл}}(t) + (R_H C_2 + R_2 C_1 + R_H C_1) \frac{dU_{\text{откл}}(t)}{dt} + C_1 (R_2 R_H C_2 + L_2) \frac{d^2 U_{\text{откл}}(t)}{dt^2} + R_H C_1 C_2 L_2 \frac{d^3 U_{\text{откл}}(t)}{dt^3} = 0;$$

отсюда, учитывая (12) и (13), получим окончательно

$$U_{\text{откл}}(t) + M \frac{dU_{\text{откл}}(t)}{dt} + J \frac{d^2 U_{\text{откл}}(t)}{dt^2} + F \frac{d^3 U_{\text{откл}}(t)}{dt^3} = 0. \quad (15)$$

Имея временные динамики напряжения $U_{\text{откл}}(t)$ в режиме переходных процессов после отключения, а также временные динамики напряжения и тока в переходных процессах после включения, из (14) и из (15) определяем A, B, D, F, G, H, J, M , используя вытекающее из (11)–(13) соотношение

$$B = \frac{JD}{F} + \left(\frac{G}{F} - J \frac{H}{F^2} \right) \left(M - \frac{J^2}{F} \right) + \frac{H}{F} \left(1 - \frac{MJ}{F} \right). \quad (16)$$

Затем, исходя из (11)–(13), получаем параметры схемы замещения, показанной на рис 1, б, в силу

$$L_1 = \frac{H}{F}, R_1 = \frac{G-JL_1}{F}, C_1 = \frac{F}{D-ML_1-JR_1}, L_2 = \frac{F}{C_1(M-C_1(A-R_1))}, \quad (17)$$

$$R_2 = \frac{J-C_1L_2}{C_1(M-C_1(A-R_1))}, C_2 = \frac{M-C_1(A-R_1)}{A-R_1-R_2}, R_H = A - R_1 - R_2. \quad (18)$$

Взятие производных по времени с использованием конечно разностной схемы повлечет за собой большие погрешности определения производных, обусловленные погрешностями измерений и малым приращением времени. Поэтому для того, чтобы производные были взяты корректно, необходимо использовать аппроксимацию снятой кривой, построенной по точкам при снятии переходного процесса. Рассмотрим вид аппроксимационного аналитического выражения, который необходимо использовать для аппроксимации переходных процессов. Этот вид аппроксимационного аналитического выражения определяется характером переходных процессов.

Переходный процесс в схемах замещения, показанных на рис. 1, а, б, может быть апериодическим или колебательным. Характеристическое уравнение схемы замещения, показанной на рис. 1, а, для режима включения в силу (3) примет вид

$$C_1L_1R_2\lambda^2 + (C_1R_1R_2 + L_1)\lambda + (R_1 + R_2) = 0; \quad (19)$$

для режима отключения в силу (5) примет вид

$$C_1R_2\lambda + 1 = 0. \quad (20)$$

Характеристическое уравнение схемы замещения, показанной на рис. 1, б, для режима включения в силу (14) примет вид

$$H\lambda^4 + G\lambda^3 + D\lambda^2 + B\lambda + A = 0; \quad (21)$$

для режима отключения в силу (15) примет вид

$$F\lambda^3 + J\lambda^2 + M\lambda + 1 = 0. \quad (22)$$

Имея диапазон характеристик потребителей электрической энергии (сопротивлений, емкостей и индуктивностей), можно, определив λ из (19)–(22), примерно оценить, какой будет режим апериодический (λ действительные) или режим затухающих колебаний (λ комплексные), и исходя из этого уже следует задавать аппроксимацию.

Так как общее решение любого линейного неоднородного дифференциального уравнения (в том числе и (3)) является суммой общего однородного и частного неоднородного решений такого уравнения, а также общее однородное решение представляет собой линейную комбинацию экспонент (действительных или комплексных), то аппроксимацию входного тока для схемы, показанной на рис. 1, а, для режима включения, исходя из (6), зададим в виде

$$i(t) = i_0 + S_1e^{-\lambda_1 t} + S_2e^{-\lambda_2 t}, S_1, S_2, \lambda_1, \lambda_2 = const, \quad (23)$$

где λ_1 и λ_2 , являющиеся решением (19), могут быть как действительными (апериодический режим), так и комплексными (режим затухающих колебаний); аппроксимацию напряжения отключения в режиме отключения питания зададим, исходя из (6), в виде

$$U_{откл}(t) = Se^{-\lambda t}, S, \lambda = const, \quad (24)$$

где λ – решение (20). Из (20) видно, что решение этого уравнения является действительным. Аппроксимацию входного тока для схемы, показанной на рис. 1, б, для режима включения, исходя из (14), зададим в виде

$$i(t) = i_0 + S_1 e^{-\lambda_1 t} + S_2 e^{-\lambda_2 t} + S_3 e^{-\lambda_3 t} + S_4 e^{-\lambda_4 t}, S_1, S_2, S_3, S_4, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4 = const, \quad (25)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$, являющиеся решением (21), могут быть как действительными (апериодический режим), так и комплексными (режим затухающих колебаний); аппроксимацию напряжения отключения в режиме отключения питания зададим, исходя из (15), в виде

$$U_{откл}(t) = S_1 e^{-\lambda_1 t} + S_2 e^{-\lambda_2 t} + S_3 e^{-\lambda_3 t}, S_1, S_2, S_3, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 = const, \quad (26)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, являющиеся решением (22), могут быть как действительными (апериодический режим), так и комплексными (режим затухающих колебаний). Следует отметить, что если в (25) и (26), применимых к схеме замещения, показанной на рис. 1, б, значения λ с разными индексами получатся близкими друг к другу, то в таком случае предполагается, что схема замещения, показанная на рис. 1, б, вырождается в схему замещения, показанную на рис. 1, а.

Итак, определение параметров приемников электрической энергии на борту летательного аппарата осуществляется в соответствии со следующим формализмом.

1. Проанализировав, используя (19), (20) для схемы замещения, показанной на рис. 1, а, и, используя (11)–(13), (21), (22) для схемы замещения, показанной на рис. 1, б, характер переходных процессов, задаем, используя (23), (24) для схемы замещения, показанной на рис. 1, а, и, используя (25), (26) для схемы замещения, показанной на рис. 1, б, аппроксимационные аналитические зависимости для определения тока в режиме включения и напряжения в режиме отключения.

2. Имея снятые кривые напряжений и токов в режиме включения и отключения, определяем коэффициенты заданных в предыдущем пункте аппроксимационных выражений динамик токов и напряжений в переходных процессах. Если в случае схемы замещения, показанной на рис. 1, б, значения λ с разными индексами получатся близкими друг к другу, то в таком случае необходимо перейти к схеме замещения, показанной на рис. 1, а, и вернуться к пункту 1.

3. Используя полученные аналитические выражения для токов и напряжений, получа-

ем производные по времени для токов в режиме включения до второго порядка включительно (для схемы, показанной на рис. 1, а) и до четвертого порядка включительно (для схемы, показанной на рис. 1, б), а также первую производную напряжения после отключения питания для схемы, показанной на рис. 1, а, и производные напряжения по времени до третьего порядка включительно для схемы, показанной на рис. 1, б.

4. Задав дискретные моменты времени t_i , $i = 0, N$, где $N + 1$ – число дискретных моментов времени, используя полученные аналитические выражения для токов и напряжений и их производных по времени, из системы уравнений (6) определяем методом наименьших квадратов параметры $A, B, D, F = \tau_{откл}$ для схемы замещения, показанной на рис. 1, а, и из (14)–(16) параметры A, B, D, F, G, H, J, M для схемы замещения, показанной на рис. 1, б.

5. Определив параметры $A, B, D, F = \tau_{откл}$ для схемы замещения, показанной на рис. 1, а, определяем в соответствии с (7) сопротивления, емкости и индуктивности схемы замещения, показанной на рис. 1, а. Определив параметры A, B, D, F, G, H, J, M для схемы замещения, показанной на рис. 1, б, определяем

в соответствии с (17) и (18) сопротивления, емкости и индуктивности в схеме замещения, показанной на рис. 1, б.

Задание в пункте 4 дискретных моментов времени и использование метода наименьших квадратов позволит исключить неудачный выбор дискретных моментов времени для определения соответствующих параметров. По определенным в настоящем формализме характеристикам реактивных элементов, а также по скорости их изменения (получается путем многократного косвенного измерения параметров реактивных элементов через некоторые промежутки времени с дальнейшей оценкой скорости их изменения) возможно делать вывод о работоспособности контролируемых приемников электрической энергии.

Результаты исследования

Для экспериментальной проверки методики идентификации реактивных характеристик авиационных потребителей электроэнер-

гии [3] были проведены экспериментальные исследования переходных процессов схемы замещения входных цепей вторичного источника питания, показанной на рис. 1, а, которая используется в авиационных потребителях электрической энергии.

Для экспериментальных исследований переходных процессов использовался симметричный генератор прямоугольных импульсов, скважность которого больше времени релаксации. В процессе экспериментальных исследований было снято 4 кривых напряжения и входного тока в переходных процессах при различных значениях параметров в схеме, показанной на рис. 1, а. Экспериментальные данные для схемы с одним каскадом RLC представлены на рис. 4–7. Следует отметить, что данные снимались как при логической единице на входе, так и при логическом нуле на входе. Из этих данных, как нетрудно видеть из (3), (4), (6), могут быть получены параметры A , B , D . Снятие данных тока при логическом нуле входного напряжения позволяет минимизировать случайную погрешность измерения.

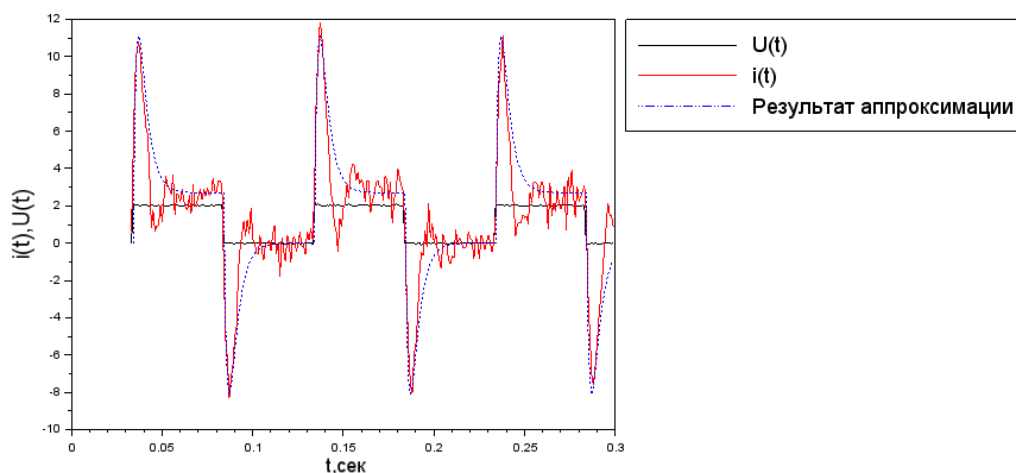


Рис. 4. Переходные процессы для схемы рис. 1, а, вар. 1
Fig. 4. Transient processes for the circuit of Figure 1, а, option 1

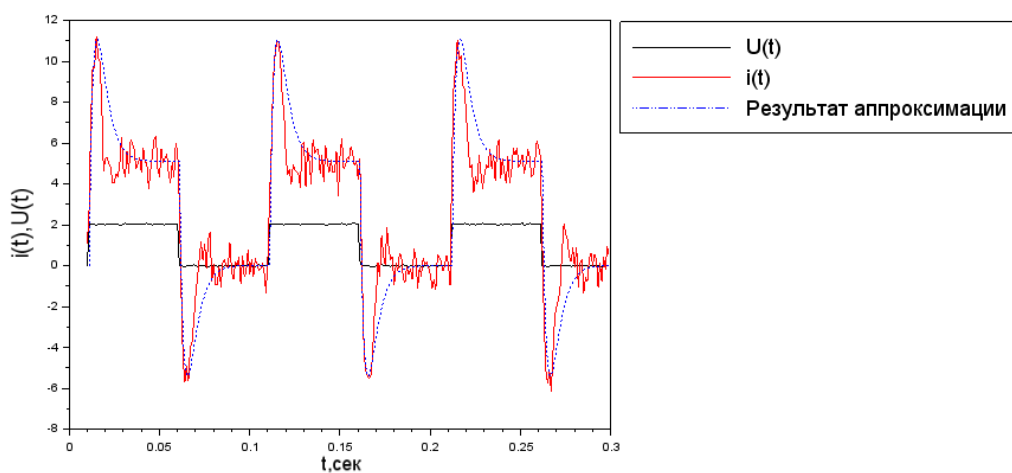


Рис. 5. Переходные процессы для схемы рис. 1, а, вар. 2
Fig. 5. Transient processes for the circuit of Figure 1, а, option 2

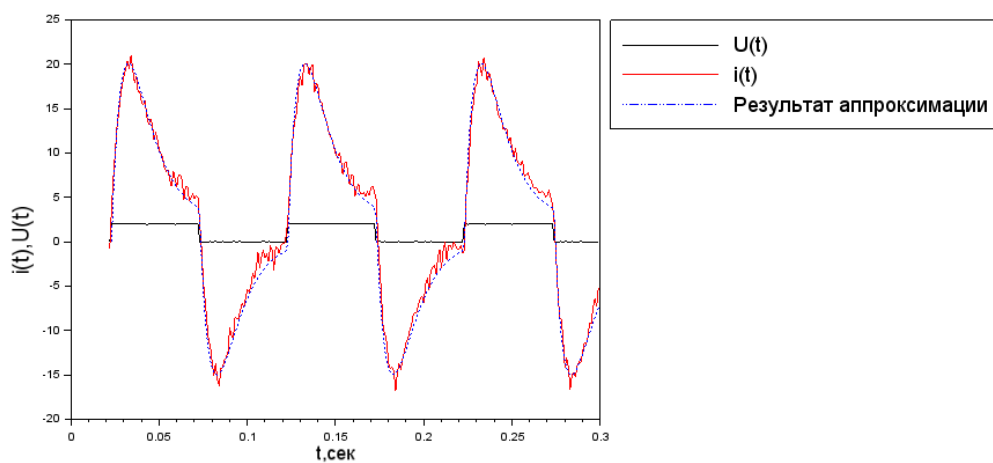


Рис. 6. Переходные процессы для схемы рис. 1, а, вар. 3
Fig. 6. Transient processes for the circuit of Figure 1, а, option 3

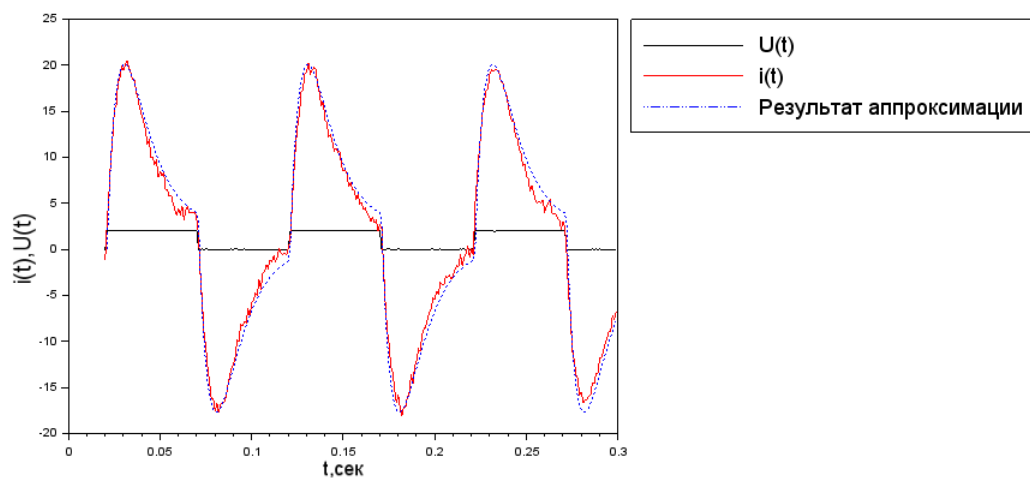


Рис. 7. Переходные процессы для схемы рис. 1, а, вар. 4
Fig. 7. Transient processes for the circuit of Figure 1, а, option 4

Используя полученные экспериментальные кривые, а также замерив время отключения, мы в соответствии с предложенным выше формализмом определим параметры схемы замещения, показанной на рис. 1, б. Па-

раметры аппроксимационных выражений применительно к схеме замещения, показанной на рис. 1, а, приведены в табл. 1, а рассчитанные параметры схемы замещения, показанной на рис. 1, а, приведены в табл. 2.

Таблица 1
Table 1

Коэффициенты аппроксимирующих выражений
Coefficients of approximating expressions

№№	S1	S2	λ_1	λ_2	i0
1	28,794255	31,494255	230,25851	550,94681	2,7
2	56,731084	61,831084	230,25851	328,0401	5,1
3	148,25101	150,95101	92,103404	128,80492	5,1
4	283,06558	285,76558	100,1124	119,35155	2,7

Таблица 2
Table 2

Характеристики схемы рис. 1, а замещения
Characteristics of the equivalent circuit Figure 1, a

№ динамики	R1, Ом	R2, Ом	C1, мкФ	L1, мГн	$\tau_{\text{откл}}, \text{с}$
1	478,087	270,475	29,9	727	0,0081
2	302,678	93,71	77,2	718	0,00723
3	144,681	303,367	169,1	713	0,0513
4	144,853	608,003	153	716	0,093

Погрешность расчетов по сравнению с опытными данными не превысила 20 %.

Экспериментальные данные для схемы с двумя каскадами RLC (рис. 1, б) представлены на рис. 8–11.

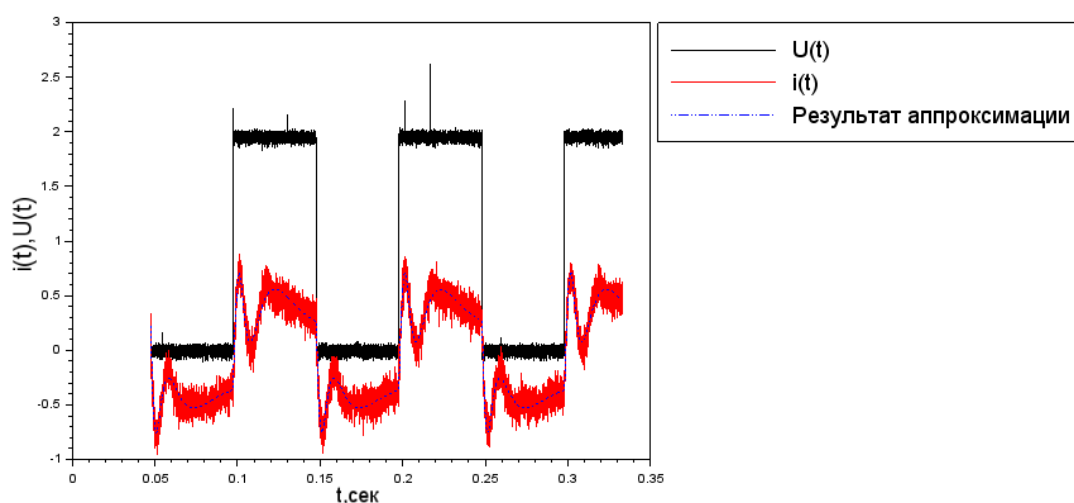


Рис. 8. Переходные процессы для схемы рис. 1, б, вар. 1
Fig. 8. Transient processes for the circuit of Figure 1, b, option 1

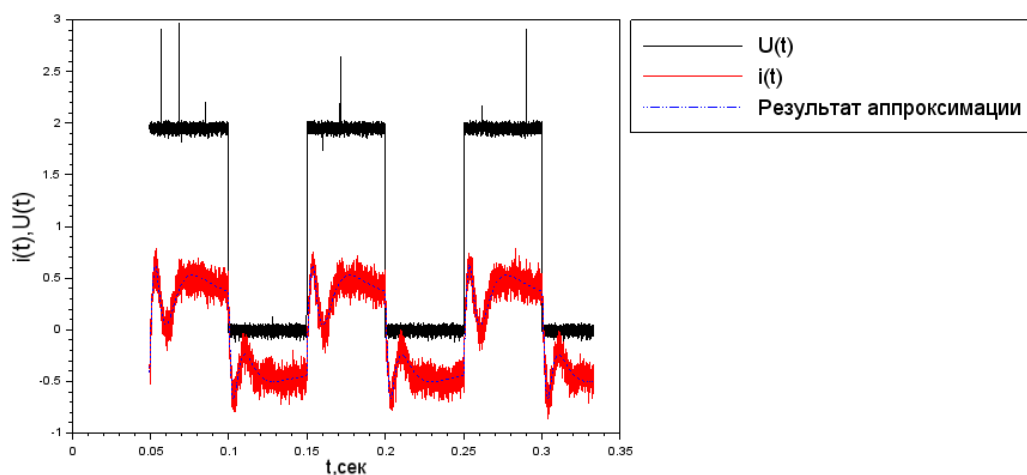


Рис. 9. Переходные процессы для схемы рис. 1, б, вар. 2
Fig. 9. Transient processes for the circuit of Figure 1, b, option 2

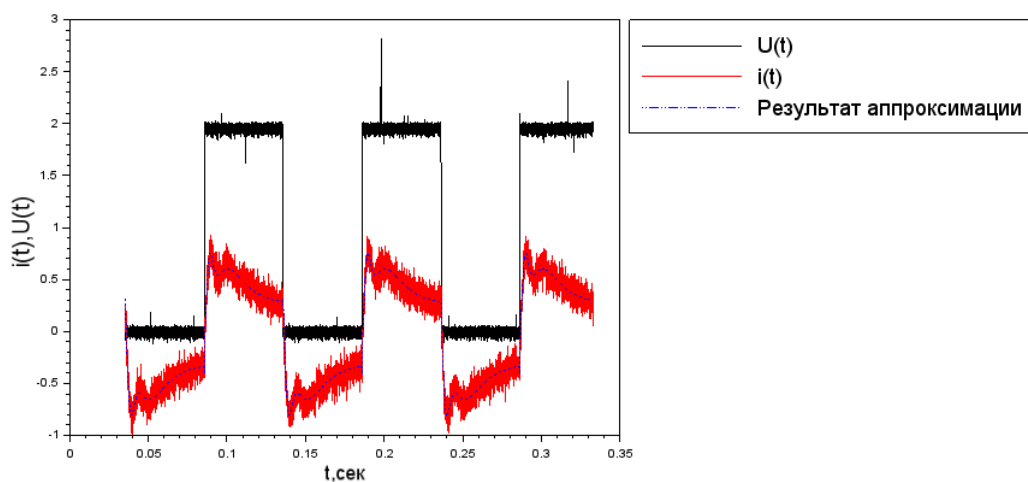


Рис. 10. Переходные процессы для схемы рис. 1, б, вар. 3
Fig. 10. Transient processes for the circuit of Figure 1, b, option 3

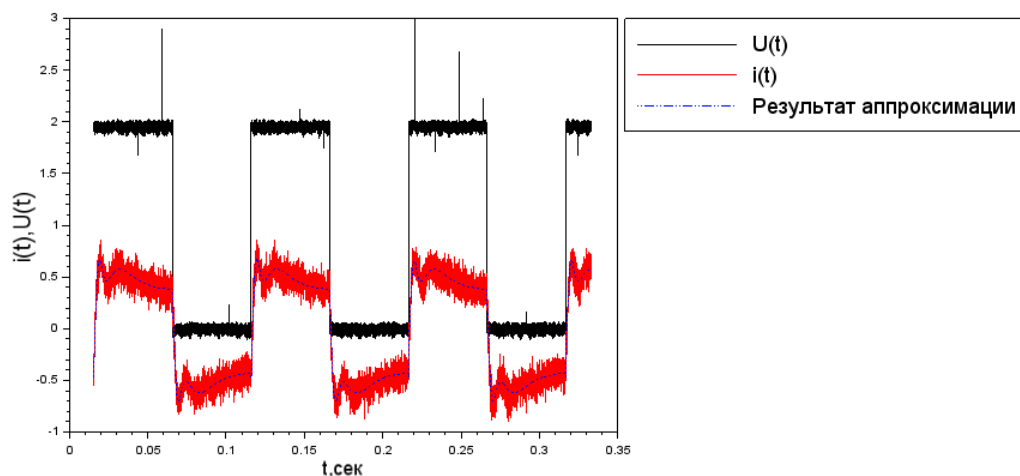


Рис.11. Переходные процессы для схемы рис. 1, б, вар. 4
Fig. 11. Transient processes for the circuit of Figure 1, b, option 4

Аналогичным образом рассчитанные из кривых тока параметры схемы замещения,

показанные на рис. 1, б, приведены в табл. 3, а времена отключения приведены в табл. 4.

Таблица 3
Table 3

Характеристики схемы рис. 1, б замещения
Characteristics of the equivalent circuit Figure 1, b

№ динамики	R1, Ом	R2, Ом	C1, мкФ	L1, мГн	C2, мкФ	L2, мГн	Rн, Ом
1	8,854	65,293	326,107	7,171	227,021	947,075	1198,028
2	6,711	74,005	546,353	6,263	322,777	616,444	579,522
3	10,489	120,846	251,987	7,547	142,808	1308,697	637,011
4	14,974	446,613	222,259	12,732	212,189	5223,336	73,07

Таблица 4
Table 4

Постоянные времени отключения
Trip time constants

Индекс кривой	tauOff1	tauOff2	tauOff3
1	0,03	0,04	0,07
2	0,01	0,07	0,09
3	0,02	0,03	0,05
4	0,01	0,03	0,06

Для исследуемых переходных процессов получен цифровой двойник, который представляет собой математическую модель. Данная модель легко реализуется в интеллектуальных системах распределения воздушных судов. В ходе эксплуатации при изменении параметров реактивных элементов исследуемой схемы можно судить о состоянии входных каскадов устройств. Модель данного исследования полностью подтверждает теоретические предположения о работоспособности данного метода диагностики авиационного оборудования.

Заключение

Предложенный в настоящей работе формализм определения характеристик реактивных элементов в схеме замещения дает возможность расширить функциональные возможности интеллектуальных систем распре-

деления электрической энергии за счет добавления функционала диагностирования и прогнозирования состояния входных цепей питания вторичных источников питания авиационного оборудования.

Предложенный в настоящей работе метод диагностирования технического состояния потребителей электроэнергии подтверждается экспериментально.

Из этого следует, что алгоритмы диагностирования можно строить на основе данных о мгновенных значениях тока в переходных процессах, полученных экспериментально на борту летательного аппарата. Предложенный алгоритм определения характеристик схем замещения входных каскадов вторичных источников питания, встроенных в авиационное оборудование, является математическим ядром цифрового двойника для исследуемого оборудования. Такой цифровой двойник легко реализовать в бортовом компьютере локальных центров управления нагрузками

в системе распределения перспективных воздушных судов.

Используя данный метод для диагностирования оборудования в режиме реального времени, можно существенно повысить безопасность полетов и существенно снизить эксплуатационные расходы.

В дальнейшем, используя данный метод, можно будет с определенной степенью точности прогнозировать отказы, характеризующиеся изменением этих параметров.

Для полноценной реализации предложенного метода необходимо решить дополнительные задачи:

- исследование режимов работы потребителей электроэнергии для определения предельных отклонений реактивных параметров от заданных значений, определяющих предаварийные состояния;

- формирование требований к аппаратному и программному обеспечению локальных центров управления нагрузкой для реализации предложенного метода, в том числе требований к цифровым устройствам измерения напряжения и тока, разрядности и быстродействию используемых микропроцессоров.

Список литературы

1. Левин А.В., Халютин С.П., Жмуров Б.В. Тенденции и перспективы развития авиационного электрооборудования // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 213 (3). С. 50–57.

2. Грузков С.А., Румянцев М.Ю. Полная электрификация самолетов как один из важнейших путей решения экологических проблем и повышения эксплуатационной экономической и топливно-энергетической эффективности воздушного транспорта // Известия Академии электротехнических наук РФ. 2016. Выпуск 18. С. 35–60.

3. Pavlova V.I., Khalyutin S.P. Diagnostics of the state of secondary power supplies input circuits parameters based on analytical expressions // International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices. EDM, 30 June – 04 July 2021.

Рр. 305–309. DOI: 10.1109/EDM52169.2021.9507642

4. Жмуров Б.В. Перспективы развития электроэнергетических систем беспилотных летательных аппаратов // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. 2010. № 1. С. 231–234.

5. Прилепский В.А., Коптев В.Н. Контроль состояния и диагностирование неисправностей авиационных электросистем и пилотажно-навигационных комплексов: учеб. пособие. Самара: СГАУ им. С.П. Королева, 2011. 102 с.

6. Дурнев В.В. Основные направления развития систем диагностики и прогностики технического состояния летательных аппаратов / В.В. Дурнев, И.Е. Мухин, С.Л. Селезнев, Ф.М. Мирзаянов // Инновации. 2014. № 9 (191). С. 110–113.

7. Воробьев В.Г., Константинов В.Д. Надежность и техническая диагностика авиационного оборудования: учебник. М.: МГТУ ГА, 2010. 448 с.

8. Савелов А.А., Давидов А.О. Экспериментальные исследования локальных блоков управления питанием для мониторинга состояния электрооборудования // Электропитание. 2019. № 2. С. 6–21.

9. Жмуров Б.В. Процесс проектирования систем электроснабжения воздушных судов как объект автоматизации // Научный Вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 1. С. 88–103. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-1-88-103

10. Бабак А.В. Анализ методов и средств технической диагностики авиационной техники // Проблемы науки. 2018. № 7 (127). С. 31–34.

11. Халютин С.П. Система распределения электроэнергии воздушных судов – центр диагностирования и прогнозирования состояния авиационного электрооборудования // Электропитание. 2020. № 2. С. 4–14.

12. Савелов А.А., Решетов С.А. и др. Разработка демонстратора системы контроля, диагностики, прогнозирования технического состояния потребителей электроэнергии // Отчет о НИР МГТУ ГА, 2018. 120 с.

13. Савелов А.А. Применение локальных центров управления нагрузками для кон-

троля приемников электроэнергии // Электропитание. 2018. № 1. С. 4–13.

14. Машошин О.Ф. Диагностика авиационной техники: учеб. пособие. М.: МГТУ ГА, 2007. 141 с.

15. Pavlova V.I. Monitoring and diagnostics of the technical condition of built-in power sources of aviation equipment / V.I. Pavlova, S.P. Khalyutin, A.A. Savelov, A.O. Davidov // International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. EDM, June 29–03 July 2019. Pp. 464–468. DOI: 10.1109/EDM.2019.8823092

16. Чернодаров А.В. Контроль, диагностика и идентификация авиационных приборов и измерительно-вычислительных комплексов. М.: Научтехлитиздат, 2017. 300 с.

17. Eulldji A., Tienti A., Boudghene Stambouli A. A novel modelling approach of RLC electrical circuits for symbolic circuit analysis by the direct topological method // Arabian Journal for Science and Engineering. 2020. Vol. 45, iss. 3. Pp. 1897–1909. DOI: 10.1007/s13369-019-04280-0

18. Улахович Д.А. Основы теории линейных электрических цепей: учеб. пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2009. 816 с.

19. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники, электрические цепи: учебник для бакалавров. 12-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2016. 701 с.

References

1. Levin, A.V., Khalyutin, S.P., Zhmurov, B.V. (2015). Trends and prospects of aviation equipment development. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 213 (3), pp. 50–57. (in Russian)

2. Gruzkov, S.A., Rummyantsev, M.Yu. (2016). Full electrification of aircraft as one of the most important ways to solve environmental issues and to improve the operational economical fuel and energy efficiency of air transport. *Izvestiya Akademii elektrotekhnicheskikh nauk RF*, issue 18, pp. 35–60. (in Russian)

3. Pavlova, V.I., Khalyutin, S.P. (2021). Diagnostics of the state of secondary power supplies input circuits parameters based on analyti-

cal expressions. *International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, EDM*, pp. 305–309. DOI: 10.1109/EDM52169.2021.9507642

4. Zhmurov, B.V. (2010). Development potentials of drones' electric power systems. *Innovatsii na Osnove Informatsionnykh i Kommunikatsionnykh Tekhnologiy*, no. 1, pp. 231–234. (in Russian)

5. Prilepskiy, V.A., Koptev, V.N. (2011). Condition monitoring and troubleshooting of aviation electrical systems and flight navigation systems: Tutorial. Samara: SGAU im. S.P. Koroleva, 102 p. (in Russian)

6. Durnev, V.V., Mukhin, I.E., Seleznev, S.L., Mirzayanov, F.M. (2014). Principal lines of development of fault detection system and aircraft technical state detection. *Innovatsii*, no. 9 (191), pp. 110–113. (in Russian)

7. Vorobyov, V.G., Konstantinov, V.D. (2010). Reliability and technical diagnostics of aviation equipment: Textbook. Moscow: MGTU GA, 448 p. (in Russian)

8. Savelov, A.A., Davidov, A.O. (2019). Experimental researches of local power management units for monitoring the status of electrical equipment. *Elektropitaniye*, no. 2, pp. 6–21. (in Russian)

9. Zhmurov, B.V. (2018). Aircraft power supply system design process as an automation object. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 21, no. 1, pp. 88–103. (in Russian)

10. Babak, A.V. (2018). Analysis of methods and means of technical diagnostics of aviation equipment. *Problemy Nauki*, no. 7 (127), pp. 31–34. (in Russian)

11. Khalyutin, S.P. (2020). Aircraft electrical power distribution system – equipment diagnostics and prognostics center. *Elektropitaniye*, no. 2, pp. 4–14. (in Russian)

12. Savelov, A.A., Reshetov, S.A. et al. (2018). Development of a demonstrator system for monitoring, diagnosing, predicting the technical state of electricity consumers. *Otchet o NIR MGTU GA*, 120 p. (in Russian)

13. Savelov, A.A. (2018). Application for local load control centers for monitoring of electricity consumer. *Elektropitaniye*, no. 1, pp. 4–13. (in Russian)

14. **Mashoshin, O.F.** (2007). Diagnostics of aviation equipment: Tutorial. Moscow: MGТУ GA, 141 p. (in Russian)

15. **Pavlova, V.I., Khalyutin, S.P., Save-
lov, A.A., Davidov, A.O.** (2019). Monitoring and diagnostics of the technical condition of built-in power sources of aviation equipment. *International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM*, pp. 464–468. DOI: 10.1109/EDM.2019.8823092

16. **Chernodarov, A.V.** (2017). Control, diagnostics and identification of aviation devices and computing measuring systems. Moscow: Nauchtehlitizdat, 300 p. (in Russian)

17. **Eulldji, A., Tienti, A., Boudghene, S.A.** (2020). A novel modelling approach of RLC electrical circuits for symbolic circuit analysis by the direct topological method. *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 45, issue 3, pp. 1897–1909. DOI: 10.1007/s13369-019-04280-0

18. **Ulakhovich, D.A.** (2009). Fundamentals of the theory of linear electrical circuits: Tutorial. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 816 p. (in Russian)

19. **Bessonov, L.A.** (2016). Theoretical foundations of electrical engineering, electrical circuits: Textbook for Bachelors. 12th ed. ispr. i dop. Moscow: Yurayt, 2016. 701 p. (in Russian)

Сведения об авторах

Павлова Виктория Игоревна, аспирант кафедры электротехники и авиационного электрооборудования МГТУ ГА, kviki6819@gmail.com.

Старостин Игорь Евгеньевич, доктор технических наук, профессор кафедры электротехники и авиационного электрооборудования МГТУ ГА, starostinigo@yandex.ru.

Information about the authors

Viktoriia I. Pavlova, Postgraduate Student of the Electrical Engineering and Aviation Electrical Equipment Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, kviki6819@gmail.com.

Igor E. Starostin, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Electrical Engineering and Aviation Electrical Equipment Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, starostinigo@yandex.ru.

Поступила в редакцию 20.02.2023
Принята в печать 25.05.2023

Received 20.02.2023
Accepted for publication 25.05.2023

УДК 621.45.04

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-94-102

Результаты оценки трибологических свойств авиационных масел для двигателей воздушных судов

М.В. Селезнев¹, К.И. Грядунов¹, К.Э. Балышин¹

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

Аннотация: Разработка современных и теплонапряженных авиационных двигателей является комплексным процессом, который основывается на передовых достижениях различных отраслей науки и техники, включая химмотологию. Каждое новое поколение авиационных двигателей предъявляет более жесткие требования к качеству применяемых авиационных масел, требуемых для обеспечения надежной работы в том числе маслосистем двигателей, подшипников опор роторов и других узлов. Одним из важных факторов снижения трения и износа современных газотурбинных двигателей является использование высококачественных масел с высоким уровнем противоизносных и антифрикционных свойств, позволяющих обеспечить работу двигателей при различных режимах смазки. В отечественной нормативно-технической документации противоизносные свойства авиационных масел оцениваются с помощью четырехшариковой машины трения (ЧМТ) по ГОСТ 9490, а антифрикционные свойства не учтены. Указанная машина трения имеет ряд недостатков. В этой связи авторами проведена оценка противоизносных и антифрикционных свойств отечественных авиационных масел с помощью универсального вибротрибометра, позволяющего исследовать эксплуатационные свойства масел при режимах, наиболее характерных для реальной эксплуатации авиационных двигателей, по сравнению с параметрами испытаний масел на четырехшариковой машине трения. В отличие от ЧМТ в конструкции вибротрибометра используется схема контакта в паре трения «шарик – плоскость пластины». При этом на указанном приборе установлена термокамера, которая обеспечивает постоянный нагрев пары трения и испытуемых смазочных масел до требуемой температуры (от 0 до 150 °С). По результатам испытаний установлено, что наилучшими противоизносными и антифрикционными свойствами обладает масло авиационное ИПМ-10, а с увеличением температуры испытаний масел происходит пропорциональное увеличение износа в паре трения «шарик – плоскость пластины».

Ключевые слова: авиационные масла, антифрикционные свойства, газотурбинные двигатели, противоизносные свойства, универсальный вибротрибометр, четырехшариковая машина трения.

Для цитирования: Селезнев М.В., Грядунов К.И., Балышин К.Э. Результаты оценки трибологических свойств авиационных масел для двигателей воздушных судов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 3. С. 94–102. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-94-102

Evaluation results of the tribological properties of aviation oils for aircraft engines

M.V. Seleznev¹, K.I. Gryadunov¹, K.E. Balyshin¹

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

Abstract: The development of modern heat-stressed aircraft engines is a complex process based on the advanced achievements of various branches of science and technology, including chemmotology. Each new generation of aircraft engines imposes stricter requirements on the quality of the aviation oils used to ensure the reliable operation, including engine oil systems, rotor bearings and other components. One of the important factors in reducing friction and wear-out of modern gas turbine engines is the use of high-quality oils with a high level of anti-wear and anti-friction properties which allow engines to operate under various relubrication intervals. In the domestic regulatory and technical documentation, the anti-wear properties of aviation oils are evaluated using a four-ball friction machine according to GOST 9490, and the anti-friction properties are not taken into account. The specified friction machine has a variety of disadvantages. In this regard, the authors evaluated the anti-wear and anti-friction properties of domestic aviation oils using a versatile vibro-tribometer which allows for the operational properties of oils to be

researched under the modes that are the most characteristic for the actual operation of aircraft engines compared with parameters of oil tests by a four-ball friction machine. Unlike the four-ball friction machine, the vibro-tribometer design implements a contact-interaction scheme in a “ball-plate plane” friction pair. At the same time, a thermal chamber is installed on this application that provides constant heating of the friction pair and the tested lubricating oils to the required temperature (from 0 to 150 °C). It has been found that IPM-10 aviation oil possesses the best anti-wear and anti-friction properties, and with an increase in the tested oil temperature, a proportional increase in wear-out in the “ball-plate plane” friction pair occurs.

Key words: aviation oils, anti-friction properties, gas turbine engines, anti-wear properties, multi-operated vibro-tribometer, four-ball friction machine.

For citation: Seleznev, M.V., Gryadunov, K.I., Balishin, K.E. (2023). Evaluation results of the tribological properties of aviation oils for aircraft engines. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 3, pp. 94–102. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-94-102

Введение

Период развития отечественного и мирового авиадвигателестроения характеризуется сменой ряда поколений газотурбинных двигателей (ГТД) и включает в себя разработку принципиально новых и уникальных технических решений, использование новых технологий, а также конструкционных материалов. Создание современных и теплонапряженных авиационных двигателей является комплексным процессом, который основывается на передовых достижениях различных отраслей науки и техники, включая химмотологию [1, 2]. Современные и теплонапряженные авиационные двигатели являются уникальным продуктом машиностроения, обладающим высоким уровнем интенсивности рабочего процесса, нагруженности и теплового режима эксплуатации. При этом каждое новое поколение авиационных двигателей предъявляет более жесткие требования к качеству применяемых авиационных масел, требуемых для обеспечения надежной работы в том числе маслосистем двигателей, подшипников опор роторов и других узлов [3, 4]. Одним из важных факторов снижения трения и износа современных газотурбинных двигателей является использование высококачественных масел с высоким уровнем противоизносных и антифрикционных свойств, позволяющих обеспечивать работу двигателей при различных режимах смазки: гидродинамическом, эластогидродинамическом и граничном. Для этого в компонентные составы авиационных масел вводят противоизносные присадки на основе фосфора, в основном трикрезилфосфаты, по-

скольку соединения серы в указанных маслах вызывают образование сильных кислот при их окислении [5]. Также немаловажное значение имеют антифрикционные свойства масел, позволяющие обеспечивать снижение расхода топлива [6, 7].

При этом отечественная методологическая база по сравнению с зарубежной в области оценки физико-химических и эксплуатационных свойств авиационных масел в ряде показателей качества не соответствует современным требованиям. Наблюдаются отличия в методических подходах и используемом испытательном оборудовании [8–11]. В частности, в российской нормативно-технической документации противоизносные свойства авиационных масел оцениваются с помощью четырехшариковой машины трения (ЧМТ) по ГОСТ 9490, а антифрикционные свойства не учтены [12, 13]. Испытания проводят по двум показателям качества: критической нагрузке (кратковременные одномоментные испытания) и диаметру пятна износа (испытание в течение 60 мин) при осевой нагрузке 196 Н [14, 15]. Принцип действия ЧМТ основан на вращении под заданной нагрузкой верхнего шарика относительно трех нижних шариков, неподвижно закрепленных в чашке машины и погруженных в испытываемое масло. Фактически узел трения ЧМТ включает в себя пирамиду, состоящую из четырех контактирующих в одной точке стальных шариков диаметром 12,7 мм. Принципиальная схема узла трения ЧМТ представлена на рис. 1. Недостатками данной схемы узла трения являются отсутствие мертвых точек движения, методики измерения объема износа верхнего

и нижних шаров ЧМТ и зачастую расхождение полученных данных с результатами испытаний масел в условиях реальной эксплуатации авиационных двигателей. Указанный метод также не позволяет получать информацию о коэффициенте трения. Данные обстоятельства вызывают сложности при необходимости достоверной и объективной оценки эксплуатационных свойств масел на этапе их применения. При этом за рубежом трибологические характеристики масел оцениваются преимущественно на шестеренчатых стендах, а испытания на четырехшариковой машине трения практически не включаются в их спецификации [16].

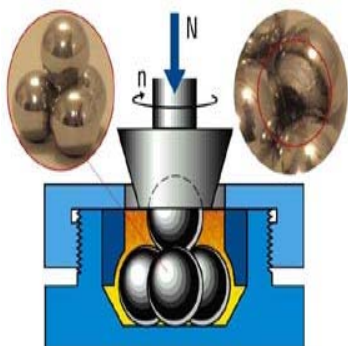


Рис. 1. Принципиальная схема узла трения четырехшариковой машины трения

Fig. 1. The schematic diagram of the four-ball friction machine friction unit

На основании изложенного расширение методологического подхода в области оценки качества авиационных масел вызывает потребность увеличения новых исследований основных эксплуатационных свойств, в том числе противоизносных и антифрикционных, при режимах, приближенных к реальным условиям эксплуатации.

Методы и методология исследований

По результатам исследований авторами [16] установлено, что применение вибрационного трибометра, в котором используется пара трения «пластина – шарик» с возвратно-поступательным движением, позволяет получить вы-

сокую степень сходимости лабораторных и стендовых результатов испытаний. В источниках [17, 18] приведены результаты исследований авиационных масел на трибометре SRV и выявлено, что необходимо использовать геометрию контакта по линии, которая соответствует трибометру, а не точечную. Следует отметить, что испытания авиационных масел на трибометрах типа SRV дополняют метод оценки эксплуатационных свойств на четырехшариковой машине трения и позволяют получать более объективную оценку об уровне их трибологических характеристик.

Противоизносные и антифрикционные свойства авиационных масел испытывали согласно методу оценки трибологических характеристик смазочных масел, который описан в СТО 08151164-0146-2013. В качестве прибора для оценки трибологических (противоизносных и антифрикционных) свойств исследуемых авиационных масел использован вибротрибометр UMT-3. При этом на указанном приборе установлена термокамера, которая обеспечивает постоянный нагрев пары трения и испытуемых смазочных масел до требуемой температуры (от 0 до 150 °С). В конструкции пары трения трибометра шарик, имеющий диаметр 12,7 мм, является неподвижным элементом, а пластина осуществляет возвратно-поступательное движение в отношении прижатого к ее плоскости шарика. Принципиальная схема узла трения вибротрибометра представлена на рис. 2.

Исследования могут осуществляться в ряду скоростей скольжения, соответствующих диапазону от 0,01 до 0,3 м/с, и нормальных нагрузок от 2 до 2000 Н. Скорость скольжения задается посредством частоты осцилля-

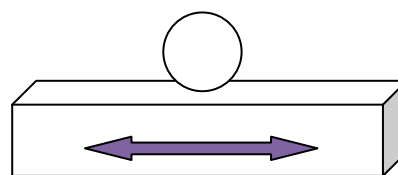


Рис. 2. Принципиальная схема узла трения вибротрибометра UMT-3

Fig. 2. The schematic diagram of the UMT-3 vibro-tribometer friction unit

ций, которая изменяется от 1 до 60 Гц. Измерительная система испытательного оборудования УМТ-3 оснащена функцией постоянной регистрации значений коэффициента трения в ходе испытаний смазочных материалов [19].

Объектами исследования были выбраны отечественные авиационные масла: авиационное масло ИПМ-10 по ТУ 38.1011299-2006, применяемое в теплонапряженных ГТД с максимальной рабочей температурой до 200 °С, масло синтетическое Б-3В по ТУ 38.101295-85, предназначенное для газотурбинных и других специальных двигателей и редукторов вертолетов, синтетическое масло ЛЗ-240 по ТУ 301-04-010-92 для ГТД и редукторов вертолетов, масла синтетические ВНИИ НП 50-1-4ф по ГОСТ 13076 и ВНИИ НП 50-1-4у по ТУ 38.401-58-12-91, применяемые для газотурбинных двигателей самолетов и турбохолодильников, унифицированное авиационное синтетическое масло АСМО-200 по СТО 07548712-001-2014, предназначенное для авиационных газотурбинных двигателей и редукторов вертолетов.

Материалом пары трения являлась сталь ШХ-15. Амплитуда возвратно-поступательного движения пластины соответствовала значению 0,5 мм, а частота осцилляций пластины – 50 Гц. В качестве нормальной нагрузки на неподвижный шарик принята величина в 175 Н.

Перед началом каждого испытания пластина и шарик погружались в образец авиационного масла, который предварительно загрузжался в смазочную ванну УМТ-3 и нагревался в течение 90 мин до температуры 80 °С. Затем в течение последующих 120 мин проводили испытание пары трения в образце масла при постоянной температуре в термокамере прибора. При этом для каждого образца авиационного масла проводилось два параллельных испытания, а результаты рассчитывались как среднее арифметическое значение. По завершении теста пластина и

шарик с помощью ультразвуковой ванны промывались нефрасом, а затем спиртом. После указанной процедуры испытания образца авиационного масла воспроизводили при аналогичных режимах и последовательности, но при температуре в камере прибора равной 120 °С.

В качестве критериев трибологических (противоизносных и антифрикционных) свойств авиационных масел использованы величины линейного износа шарика ($d_{ли}$) и объемного износа пластины ($W_{V, пласт}$, $W_{V, шар}$), а также значение среднего давления в контакте пары трения ($P_{ФПК}$) и динамического коэффициента трения (COF). Величину износа пары трения определяли с помощью оптической системы прибора ПТМ-3 и профилометрии с применением универсального измерителя шероховатости TR-200. Принцип работы прибора TR-200 заключается в перемещении алмазной иглы по поверхности изношенной детали (пластины) и фиксации датчиком ее отклонения от ровной поверхности пластины.

Антифрикционные свойства образцов авиационных масел исследовались в соответствии с СТО 08151164-0146-2013 и анализировались в конце испытания в интервале от 5 000 до 7 000 с по значениям динамического коэффициента трения, которые регистрировались прямым измерением с помощью датчиков прибора [20].

Результаты исследования

Для наглядного понимания характерного износа пары трения после испытания авиационного масла на вибротрибометре на рис. 3 приведены примеры линейного износа шарика и пластины.

Результаты проведенного исследования по оценке противоизносных и антифрикционных свойств различных авиационных масел представлены в табл. 1 и на рис. 4.

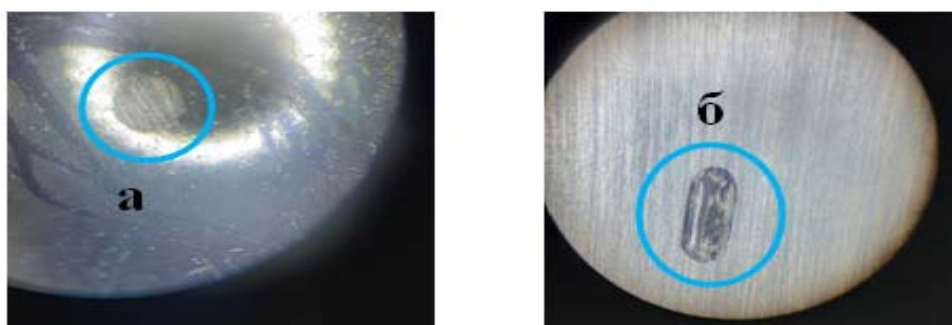


Рис. 3. Пример линейного износа: а – шарика, б – пластины

Fig. 3. Example of linear wear-out of: a – ball; b – plate

Таблица 1
Table 1

Результаты испытаний по оценке противоизносных свойств авиационных масел
Test results according to the evaluation of anti-wear properties of aviation oils

Наименование масла	Наименование показателей противоизносных свойств			
	$W_{V, \text{пласт}}, 10^3 \text{ мкм}^3$	$W_{V, \text{шар}}, 10^4 \text{ мкм}^3$	$d_{\text{ш}}, \text{ мм}$	$P_{\text{ФПК}}, \text{ МПа}$
При температуре 80 °С				
ИПМ-10	1312	129	0,478	983
Б-3В	5014	2120	0,982	264
ЛЗ-240	2144	1060	0,681	420
ВНИИНП-1-50-4ф	1340	136	0,480	972
ВНИИНП-1-50-4у	1452	193	0,521	834
АСМО-200	1613	152	0,492	885
При температуре 120 °С				
ИПМ-10	1922	623	0,575	646
Б-3В	6014	2656	1,257	149
ЛЗ-240	3044	1530	0,810	342
ВНИИНП-1-50-4ф	1936	651	0,586	598
ВНИИНП-1-50-4у	2057	984	0,677	492
АСМО-200	2012	788	0,634	613

Обсуждение полученных результатов

По результатам исследования установлено, что наилучшими противоизносными свойствами обладает масло авиационное ИПМ-10. При этом наибольший износ пары трения характерен при испытаниях на масле Б-3В, что, вероятно, связано с выпадением в осадок соединений 2-меркаптобензтиазола

(присадки каптакс). Анализ данных табл. 1 показывает, что с увеличением температуры масла происходит пропорциональное увеличение износа в паре трения «шарик – плоскость пластины», что, по-видимому, происходит вследствие снижения кинематической вязкости авиационных масел с ростом температуры испытаний.

Результаты оценки антифрикционных свойств авиационных масел показывают (рис. 4), что изменение температуры масел

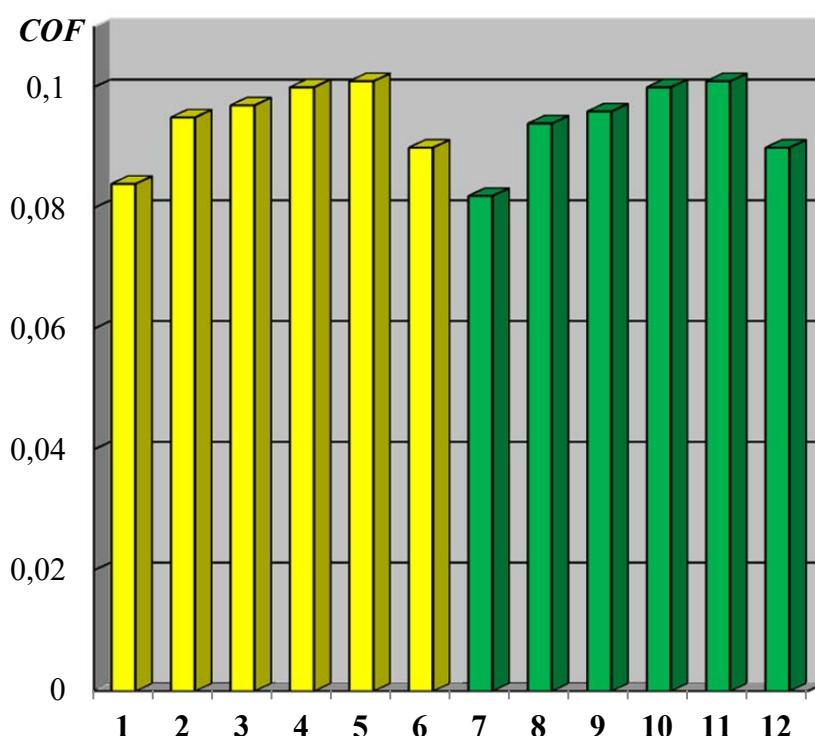


Рис. 4. Результаты оценки антифрикционных свойств авиационных масел при температуре 80 °С:
1 – ИПМ-10, 2 – Б-3В, 3 – ЛЗ-240, 4 – ВНИИНП-1-50-4ф, 5 – ВНИИНП-1-50-4у, 6 – АСМО-200;
при температуре 120 °С: 7 – ИПМ-10, 8 – Б-3В, 9 – ЛЗ-240, 10 – ВНИИНП-1-50-4ф,
11 – ВНИИНП-1-50-4у, 12 – АСМО-200

Fig. 4. Results of evaluation of anti-friction aviation oil properties at the temperature of 80 °C:
1 – IPM-10, 2 – B-3V, 3 – LZ-240, 4 – VNIINP-1-50- 4f, 5 – VNIINP-1-50- 4u, 6 – ASMO-200; at the temperature of
120 °C, 7 – IPM-10, 8 – B-3V, 9 – LZ-240, 10 – VNIINP-1-50- 4f, 11 – VNIINP-1-50- 4u, 12 – ASMO-200

практически не оказывает влияния на величину коэффициента трения. При этом наименьшее значение COF соответствует маслу авиационному ИПМ-10, а наибольшее – маслу ВНИИНП-1-50-4у.

Заключение

В результате проведенных исследований получены данные по уровню противоизносных и антифрикционных свойств авиационных масел с помощью универсального вибротрибометра, позволяющего исследовать эксплуатационные свойства масел при режимах (давление в паре трения в начале опыта – 1500 МПа, температура масла – 80 и 120 °С, вид движения пары трения – возвратно-поступательное), наиболее характерных для реальной эксплуатации авиационных двига-

телей по сравнению с четырехшариковой машиной трения. Указанный метод предлагается использовать в нормативно-технической документации на авиационные масла, однако предварительно необходимо осуществить накопление статистических данных по испытаниям масел различного компонентного состава и определить корреляцию с другими методами оценки трибологических характеристик.

Полученные результаты испытаний свидетельствуют, что повышенный износ характерен для масла Б-3В ($W_{V,плас} = 5014 \cdot 10^3$ мкм³, $W_{V,шар} = 2120 \cdot 10^4$ мкм³), а наилучшими трибологическими характеристиками обладает масло ИПМ-10 ($W_{V,плас} = 1312 \cdot 10^3$ мкм³, $W_{V,шар} = 129 \cdot 10^4$ мкм³). Наименьшее значение коэффициента трения соответствует маслу авиационному ИПМ-10 (0,084), а наибольшее – маслу ВНИИНП-1-50-4у (0,101) при температурах

масел 80 и 120 °С соответственно. Таким образом, в узлах и механизмах теплонапряженной авиационной техники, которые предъявляют повышенные требования к уровню противоизносных и антифрикционных свойств, рекомендуется в качестве основной марки использовать авиационное масло ИПМ-10 по сравнению с маслами синтетическими ВНИИ НП 50-1-4ф и ВНИИ НП 50-1-4у, а в газотурбинных двигателях и редукторах вертолетов унифицированное авиационное синтетическое масло АСМО-200 по сравнению синтетическими маслами ЛЗ-240 и Б-3В.

Список литературы

1. **Серегин Е.П.** Развитие химмотологии. М.: Первый том, 2018. 880 с.
2. **Liberio P.D., Garver J.M.** Lubricity of military jet fuels // *Lubrication Engineering*. 1995. Vol. 51. Pp. 27–32.
3. **Кривошеев И.А., Рожков К.Е., Симонов Н.Б.** Развитие методов проектирования турбин и компрессоров в составе газотурбинных двигателей // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2022. № 2. С. 111–125.
4. **Агульник А.Б.** Оценка диапазона возможных параметров гидридного газотурбинного двигателя с твердооксидными топливными элементами для среднемагистрального самолета / А.Б. Агульник, С.М. Каленский, И.В. Кравченко, Ю.А. Эрохи // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2022. № 2. С. 126–131.
5. **Thirupathi A.** Эпоксидированные оксикасторполиоловые эфиры: многофункциональное базовое масло для авиационного и судового применения / A. Thirupathi, K. Kamalakar, V. Siddaiah, M.S.L. Karuna, M. Devarapaga // *Нефтехимия*. 2022. Т. 62, № 6. С. 1059–1070. DOI: 10.31857/S0028242122060260
6. **Куц К.А., Коваленко Г.В.** Определение статистического компенсационного запаса топлива для флота «Боинг-777» на фиксированных маршрутах // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2021. № 4. С. 4–10.
7. **Макаева Р.Х.** Диагностика технического состояния авиационных подшипников качения с применением голографической интерферометрии / Р.Х. Макаева, В.В. Такмовцев, А.М. Царева, Н.И. Шакиров // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2021. № 4. С. 90–95.
8. **Оганесова Э.Ю.** Трибологическая активность метиловых эфиров диалкилдитиокарбоновых кислот в составе композиций смазочных материалов / Э.Ю. Оганесова, Е.Г. Бордубанова, А.С. Лядов, О.П. Паренато // *Нефтехимия*. 2022. Т. 62, № 4. С. 561–566. DOI: 10.31857/S0028242122040116
9. **Сулима С.И.** Перспективы технологий получения синтетических основ моторных масел / С.И. Сулима, В.Г. Бакун, Н.С. Чистякова, М.В. Ларина, Р.Е. Яковенко, А.П. Севостьянов // *Нефтехимия*. 2021. Т. 61, № 6. С. 760–775. DOI: 10.31857/S0028242121060022
10. **Данилов А.М.** Современное состояние исследований в области биоразлагаемых смазочных материалов / А.М. Данилов, С.А. Антонов, Р.В. Бартко, П.А. Никульшин // *Нефтехимия*. 2021. Т. 61, № 4. С. 445–460. DOI: 10.31857/S0028242121040018
11. **Цветков О.Н., Черемискин А.А.** Трибологическая оценка свойств смазочных масел // *Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний*. 2017. № 2. С. 25–27.
12. **Исследование смазочных материалов при трении: сборник статей / Под ред. Р.М. Матвеевского.** М.: Наука, 1981. 144 с.
13. **Орешенков А.В., Гришин Н.Н., Степанова С.Е.** Трибологические характеристики горюче-смазочных материалов // *Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний*. 2017. № 2. С. 23–25.
14. **Яхьяев Н.Я.** Смазочная композиция для улучшения трибологических характеристик смазочного материала / Н.Я. Яхьяев, Ж.Б. Бегов, Ш.Д. Батырмурзаев, А.Ш. Батырмурзаев // *Трение и смазка в машинах и механизмах*. 2010. № 7. С. 29–32.
15. **Пучков В.Н., Заскалько П.П.** Исследования влияния добавок наноструктурированных материалов на трибологические свойства смазочных масел // *Трение и смазка в машинах и механизмах*. 2010. № 11. С. 25–30.

16. Маньшев Д.А. Исследование эксплуатационных свойств масла для малоразмерного поршневого авиационного двигателя / Д.А. Маньшев, А.В. Иванов, С.А. Криушин, А.В. Чернышева, С.Г. Потупчик // Труды 25 ГосНИИ МО РФ. 2020. № 59. С. 253–261.

17. Заславский Ю.С., Артемьева В.П. Новое в трибологии смазочных материалов: монография. М.: Нефть и газ, 2001. 480 с.

18. Правоторова Е.А., Буяновский И.А. Метод минимизации количества трибологических испытаний // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. № 3. С. 15–20.

19. Морозов А.В. Экспериментальное определение статического и динамического коэффициентов трения скольжения эпиламинированных материалов // Трение и износ. 2014. Т. 35, № 2. С. 114–120.

20. Гаврилов К.В. Оценка антифрикционных свойств твердосмазочных покрытий для юбки поршня высокофорсированного дизеля / К.В. Гаврилов, А.В. Морозов, М.В. Селезнев, Ю.В. Рождественский, Н.А. Хозенюк, А.А. Дойкин, В.С. Худяков // Трение и износ. 2020. Т. 41, № 5. С. 647–654. DOI: 10.32864/0202-4977-2020-41-5-647-654

References

1. Seregin, E.P. (2018). Chemmotology development. Moscow: Pervyy tom, 880 p. (in Russian)

2. Liberio, P.D., Garver, J.M. (1995). Lubricity of military jet fuels. *Lubrication Engineering*, vol. 51, pp. 27–32.

3. Krivosheev, I.A., Rozhkov, K.E., Simonov, N.B. (2022). Development of methods for designing turbines and compressors as a part of gas turbine engines. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Aviatsionnaya Tekhnika*, no. 2, pp. 111–125. (in Russian)

4. Agul'nik, A.B., Kalenskii, S.M., Kravchenko, I.V., Ezrokhi, Yu.A. (2022). Estimation of a range of possible parameters for a hybrid turbine engine with solid oxide fuel cells for airliner. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Aviatsionnaya Tekhnika*, no. 2, pp. 126–131. (in Russian)

5. Thirupathi, A., Kamalakar, K., Sidaiah, V., Karuna, M.S.L., Devarapaga, M. (2022). Epoxy-acylated oxycastor polyol esters: a multifunctional base oil for aviation and marine applications. *Neftekhimiya*, vol. 62, no. 6, pp. 1059–1070. DOI: 10.31857/S0028242122060260 (in Russian)

6. Kuts, K.A., Kovalenko, G.V. (2021). Boeing 777 fleet statistical contingency fuel determination on fixed routes. *Russian Aeronautics*, vol. 64, no. 4, pp. 583–590.

7. Makaeva, R.K., Takmoltsev, V.V., Tsareva, A.M., Shakirov, N.I. (2021). Diagnostics of the technical condition of aircraft rolling bearings using the holographic interferometry. *Russian Aeronautics*, vol. 64, no. 4, pp. 688–694.

8. Ogenesova, E.Y., Bordubanova, E.G., Lyadov, A.S., Parenago, O.P. (2022). Tribological performance of dialkyldithiocarbamic acid methyl esters in lubricating compositions. *Petroleum Chemistry*, vol. 62, no. 6, pp. 672–676. DOI: 10.1134/S0965544122040132

9. Sulima, S.I., Bakun, V.G., Chistyakova, N.S., Larina, M.V., Yakovenko, R.E., Savost'yanov, A.P. (2021). Prospects for technologies in the production of synthetic base stocks for engine oils (a review). *Petroleum Chemistry*, vol. 61, no. 11, pp. 1178–1189. DOI: 10.1134/S0965544121110013

10. Danilov, A.M., Antonov, S.A., Bartko, R.V., Nikulshin, P.A. (2021). Recent advances in biodegradable lubricating materials (a review). *Petroleum Chemistry*, vol. 61, no. 7, pp. 697–710. DOI: 10.1134/S0965544121050121

11. Tsvetkov, O.N., Cheremiskin, A.L. (2017). Tribological evaluation of properties of lube oils. *World of Petroleum Products Scientific and Technical Journal*, no. 2, pp. 25–27. (in Russian)

12. Matveevskiy, R.M. (Ed.). (1981). Research on lubricants in friction: a collection of articles. Moscow: Nauka, 144 p. (in Russian)

13. Oreshenkov, A.V., Grishin, N.N., Stepanova, S.E. (2017). Tribological characteristics fuels and lubricating materials. *World of Petroleum Products Scientific and Technical Journal*, no. 2, pp. 23–25. (in Russian)

14. Yakhyaev, N.Ya., Begov, Zh.B., Batyrmurzaev, Sh.D., Batyrmurzaev, A.Sh. (2010). The lubricant composition for improving the tribological characteristics of the lubricant. *Treniye i Smazka v Mashinakh i Mekhanizмах*, no. 7, pp. 29–32. (in Russian)

15. Puchkov, V.N., Zaskalko, P.P. (2010). Research on influence of nanostructured materials additives on the tribological properties of lubricating oils. *Treniye i Smazka v Mashinakh i Mekhanizмах*, no. 11, pp. 25–30. (in Russian)

16. Manishev, D.A., Ivanov, A.V., Kriushin, S.A., Chernyshova, A.V., Potupchik, S.G. (2020). Performance study of motor oil intended for small-sized reciprocating aviation engine. *Scientific Investigations of the 25-th State Research Institute of Chemmotology, Ministry of Defence of Russian Federation*, pp. 253–261. (in Russian)

17. Zaslavskiy, Yu.S., Artemeva, V.P. (2001). New in tribology lubricants: Monograph. Moscow: Neft i gaz, 480 p. (in Russian)

18. Pravotorova, E.A., Buyanovskiy, I.A. (2009). Minimizing the number of tribological tests. *Treniye i Smazka v Mashinakh i Mekhanizмах*, no. 3, pp. 15–20. (in Russian)

19. Morozov, A.V. (2014). Experimental determination of static and dynamic coefficients of sliding friction of epilam-coated materials. *Journal of Friction and Wear*, vol. 35, no. 2, pp. 114–120. DOI: 10.3103/S1068366614020093

20. Gavrilov, K.V., Rozhdestvenskii, Y.V., Khozeniuk, N.A., Doikin, A.A., Hudya-kov, V.S., Morozov, A.V., Seleznev, M.V. (2020). Evaluation of anti-friction properties of solid lubricant coatings for a piston skirt of a high-force diesel. *Journal of Friction and Wear*, vol. 41, no. 5, pp. 480–485. DOI: 10.3103/S1068366620050104

Сведения об авторах

Селезнев Максим Витальевич, кандидат технических наук, доцент кафедры авиатопливообеспечения и ремонта ЛА, МГТУ ГА, mr.selmaks@mail.ru.

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

Балышин Кирилл Эдуардович, преподаватель кафедры авиатопливообеспечения и ремонта ЛА, МГТУ ГА, knpnlll@ya.ru.

Information about the authors

Maxim V. Seleznev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aviation Fuel Supply and Aircraft Repair Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, mr.selmaks@mail.ru.

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

Kirill E. Balyshin, Teacher of the of Aviation Fuel Supply and Aircraft Repair Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, knpnlll@ya.ru.

Поступила в редакцию 07.12.2022
Принята в печать 25.05.2023

Received 07.12.2022
Accepted for publication 25.05.2023

МАШИНОСТРОЕНИЕ

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

УДК 629.7.016:533.68

DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-103-113

Features of vortex trace propagation for aircraft with propellers

A.I. Zhelannikov¹

¹*Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovsky, Russia*

Abstract: The article presents the results of a study of the characteristics of the wake vortex of aircraft with turboprop engines. Using the example of the An-12 aircraft, it is shown that rotating propellers make a noticeable contribution to the propagation of the vortex trail behind the aircraft. This is proved by some studies, as well as numerous observations. It also describes a technique for studying the wake vortex of aircraft with propellers. The method is based on the method of discrete vortices. The relevance of such studies is due to the growing interest of carrier companies in aircraft with turboprop engines. It has been proven that when transporting passengers and cargo on such vessels over distances of 700–800 km, maintenance and fuel costs are reduced by about 30–40%. Therefore, the fleet of turboprop aircraft, such as An-22, An-70, An-12, as well as Tu-95, Il-38, C-130, etc., has been preserved so far. New turboprop aircraft are being developed and put into operation: A-400M, Il-114, Il-112M. The vortex trail behind such aircraft also poses a danger to other aircraft flying behind. A feature of the propagation of the wake vortex behind aircraft with propellers is the interaction of vortices coming off the airframe and vortices from the propellers. As a result, due to the rotation of all the screws in one direction, symmetry is broken in the propagation of vortices descending from the right and left halves of the wing. Therefore, it is important to understand how differently the vortices that descend from the airframe of an aircraft with turboprop engines behave. For the convenience of the study, the method of accounting for the effect of vortices from screws is integrated into a special calculation and software package, also based on the method of discrete vortices. In it, when calculating the characteristics of the wake vortex, the flight weight, speed and altitude of the aircraft, its flight configuration, atmospheric conditions, proximity of the earth, axial velocity in the core of the vortex and some other factors are taken into account. This complex has passed the necessary testing and state registration. A number of measures were carried out to validate and verify the developed complex, confirming the operability of the programs included in it and the reliability of the results obtained from it. The results of the study of the characteristics of the wake vortex behind the Antonov-12 aircraft in the form of vertical velocity spectra and fields of perturbed velocities at various distances from it are presented. It is shown that propellers noticeably affect the propagation of the wake vortex behind turboprop aircraft. This circumstance must be taken into account by the crews of aircraft flying behind such aircraft.

Key words: propellers, wake vortex, aircraft, vortex interaction, turboprop aircraft.

For citation: Zhelannikov, A.I. (2023). Features of vortex trace propagation for aircraft with propellers. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 3, pp. 103–113. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-103-113

Особенности распространения вихревого следа за воздушными судами с винтами

А.И. Желанников¹

¹*Центральный аэрогидродинамический институт имени проф. Н.Е. Жуковского,
г. Жуковский, Россия*

Аннотация: В статье приводятся результаты исследования характеристик вихревого следа за воздушными судами с турбовинтовыми двигателями. На примере самолета Ан-12 показано, что вращающиеся винты вносят заметный вклад

в распространение вихревого следа за самолетом. Это доказывают и некоторые исследования, а также многочисленные наблюдения. Также описывается методика для исследования вихревого следа за воздушными судами с винтами. В основе методики лежит метод дискретных вихрей. Актуальность таких исследований обусловлена возрастающим интересом компаний-перевозчиков к воздушным судам с турбовинтовыми двигателями. Доказано, что при перевозках пассажиров и грузов на таких судах на расстояния 700–800 км затраты по обслуживанию и на топливо сокращаются примерно на 30–40 %. Поэтому до сих пор сохранен парк турбовинтовых самолетов, таких как Ан-22, Ан-70, Ан-12, а также Ту-95, Ил-38, С-130 и др. Разрабатываются и вводятся в эксплуатацию новые турбовинтовые самолеты: А-400М, Ил-114, Ил-112М. Вихревой след за такими самолетами также представляет опасность для других, летящих следом самолетов. Особенностью распространения вихревого следа за самолетами с винтами является взаимодействие вихрей, сходящих с планера самолета и вихрей от винтов. В результате из-за вращения всех винтов в одну сторону нарушается симметрия в распространении вихрей, сходящих с правой и левой половин крыла. Поэтому важно понимать, насколько по-разному ведут себя вихри, сходящие с планера самолета с турбовинтовыми двигателями. Для удобства исследования методика учета влияния вихрей от винтов интегрирована в специальный расчетно-программный комплекс, базирующийся также на методе дискретных вихрей. В нем при расчете характеристик вихревого следа учитываются полетный вес, скорость и высота полета самолета, его полетная конфигурация, атмосферные условия, близость земли, 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 по нему результатов. Приводятся результаты исследования характеристик вихревого следа за самолетом Ан-12 в виде спектров вертикальной скорости и полей возмущенных скоростей на различных удалениях от него. Показано, что воздушные винты заметно влияют на распространение вихревого следа за турбовинтовыми самолетами. Это обстоятельство необходимо учитывать экипажам воздушных судов, летящих следом за такими самолетами.

Ключевые слова: воздушные винты, вихревой след, воздушное судно, взаимодействие вихрей, турбовинтовые самолеты.

Для цитирования: Желанников А.И. Особенности распространения вихревого следа за воздушными судами с винтами // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 3. С. 103–113. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-3-103-113

Introduction

Nowadays the aeronautical communities of many countries face the current problem of the ever-growing airport capacity provision due to air traffic increase maintaining the objective aircraft flight safety level. Vortex safety provision [1–5] is one of main challenges for implementation of such plans. The essence of vortex safety issue is wake vortex following the aircraft [6–11]. This wake is an induced velocity and pressure field which is dangerous for aircraft following it. It is worth noticing that one should distinguish between the concepts of wake vortex and vortex path. It is correctly suggested in work [12] that there is a *wake vortex* following the body in motion developing lift (for example, an aircraft). Whether the body in motion does not develop lift (for example, a car), there is a *vortex path* following it.

The work focuses on a wake vortex following the propeller aircraft. Turboprop aircraft observation shows us that wake vortex following them is different from the one following the turbo-jet aircraft (fig.1). It is connected to propeller

rotation influencing the aircraft wake vortex. Wake vortex following the aircraft loses its symmetry almost at once as the propeller spins one way, which can be seen in (fig. 1).

The long-haul propeller aircraft introduction has required the research of the long-distance wake vortices following them. Wake vortex following such aircraft is also dangerous for other aircraft behind it. The question of propeller impact on long-distance wake vortex characteristics is still open so far. Analysis shows us that the research developments in this area are insufficient. The majority of them are scattered studies in the flight experiment of the USA Department of Transportation program on wake vortex following the propeller aircraft. There are almost no approaches and mathematical models for wake vortex following the propeller aircraft.

The interest in propeller aircraft has grown recently, as they are cheaper in terms of passenger and cargo transportation on equal distances, in comparison to turbo-jet aircraft. Some foreign experts estimate that service and fuel charges are reduced by about 30–40% during passenger and cargo transportation given the distance of



Fig. 1. Random visualization of the wake vortex following the Antonov-12 turboprop aircraft during takeoff

700–800 km. That is why some aerospace corporations are starting the turboprop aircraft development. For instance, the Canadian engineering company Bombardier is now developing and producing the twin-engine turboprop aircraft DHC-8. Airbus Military has developed the A-400M aircraft and started its manufacturing production. ATR is doing the same thing. There are also Ilyushin Il-114 and Ilyushin Il-112B in use in Russia. There is also data about other similar constructions.

Research methodology

Wake vortex following the propeller aircraft research methodology, used in this work, is described in details in paper [12] and article [13]. In this article it is integrated into a special calculating and software package [14], also based on discrete wake method [15–17]. The essence of integration is in the following. It was necessary to develop such a propeller mathematic model, in which its work effect record was made through discrete vortex points with the known circulations and coordinates on Trefftz plane. The fact is the long-distance wake vortex mathematical model of the calculating and software package is also based on vortex points. In this case the propeller mathematical model is inte-

grated into the long-distance wake vortex mathematic model [12, 18].

Let us interpolate the following designations:

d – propeller diameter;

L – the aircraft typical linear dimension;

ω – the propeller angular velocity;

V_0 – the airspeed;

r_0 – the propeller rotor head radius;

$\xi = \frac{r_0}{R}$ – the relative propeller rotor head

radius; where $R = \frac{d}{2}$;

$\bar{\alpha}$ – the propeller thrust coefficient;

n – the number of propeller blades;

$\frac{V_0}{nd} = \lambda$ – the propeller speed coefficient;

$\bar{\beta}$ – the propeller power coefficient.

The following vortex model of the propeller (fig. 2) is developed for the given mathematical model integration into the calculating and software package [14]. There is an axial flow circulation wake Γ^* in the middle of the propeller, the n wakes are set around the propeller circumference perimeter, modelling the propeller jet flow. The research in work [13] showed us, that n should correspond to the number of propeller

blades. Then the wake circulation around the propeller circumference will be equal to Γ^*/n . It is possible to define the intensity of the propeller-generated axial flow wake by formula [13], whether the propeller work regime is set – λ , $\bar{\alpha}$, $\bar{\beta}$ and the relative propeller rotor head diameter is known:

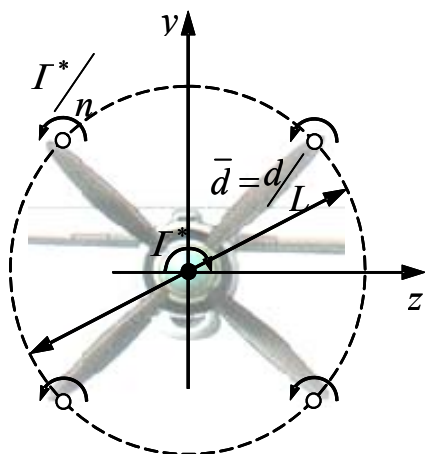


Fig. 2. Vortex model of the propeller screw

$$\bar{\Gamma} = \frac{4\bar{\beta}}{\pi^3 (1-\xi^2) \left[\frac{\lambda}{2\pi} + \sqrt{\frac{\lambda^2}{4\pi^2} + \frac{2\bar{\alpha}}{\pi^3 (1-\xi^2)}} \right]}.$$

Let us interpolate the axial flow non-dimensional circulation according to formulae for the aircraft in general, $\Gamma^* = \frac{\Gamma}{V_0 L}$, where

L is a typical size, then $\bar{\Gamma}$ and Γ^* will be linked by formula

$$\bar{\Gamma} \omega R d = \Gamma^* V_0 L$$

where

$$\Gamma^* = \bar{\Gamma} \frac{\omega R d}{V_0 L} = \bar{\Gamma} \frac{2\pi n d}{V_0} \frac{d}{2L} = \bar{\Gamma} \frac{\pi}{\lambda} \bar{d},$$

and finally

$$\Gamma^* = \bar{\Gamma} \frac{\pi}{\lambda} \bar{d}.$$

$\bar{d}$ is a relative propeller diameter $\bar{d} = d/L$. Then, the vortex propeller jet flow scheme (in Trefftz plane) will look as it is shown in Figure 1: n number of vortices, set around the circumference by the diameter equal to the propeller diameter, model the propeller jet flow surface. The number of vortices corresponds to the number of blades here. Circulation of each vortex is Γ^*/n , and spinning direction opposes the axial flow vortex spinning direction. At the same time the axial flow vortex produces spinning, which corresponds to propeller spinning direction. Thus, the purpose is achieved. The vortex points, which are modelling the propeller work, are integrated into the calculating and software package [14].

The results of the research

The characteristics of long-distance wake vortex following the C-130 aircraft at 1000 m height, at $V = 51$ m/s speed were calculated to confirm the effectiveness of the developed methodology and credibility of the results based on them. The flight experiment data has been obtained from paper [2] on wake vortex maximum vertical velocity measurement for this aircraft and the flight conditions. There are the vertical speed calculations behind the C-130 at distances $X = 0$ and 1.4 km in Figure 2. It can be seen that the vertical speed graph is sawtooth if $X = 0$ (that is fuselage longitudinal section, rhombs). It is connected with propeller rotation impact on the wake vortex behind the aircraft.

The whole spectrum of vertical velocity (squares) is calculated at distance $X = 1.4$ km from C-130 aircraft. It can be seen that the calculation (squares) and flight experiment (triangles) correspond satisfactorily to each other, which confirms indirectly the credibility of the results (fig. 3).

Furthermore, the characteristics of Antonov An-12 aircraft wake vortex were also observed. It is shown that rotating propellers cause a noticeable impact on wake vortex distribution. The first stage shows us, how the vertical velocity spectrum changes in the middle of An-12 vortex without taking propeller spinning into considera-

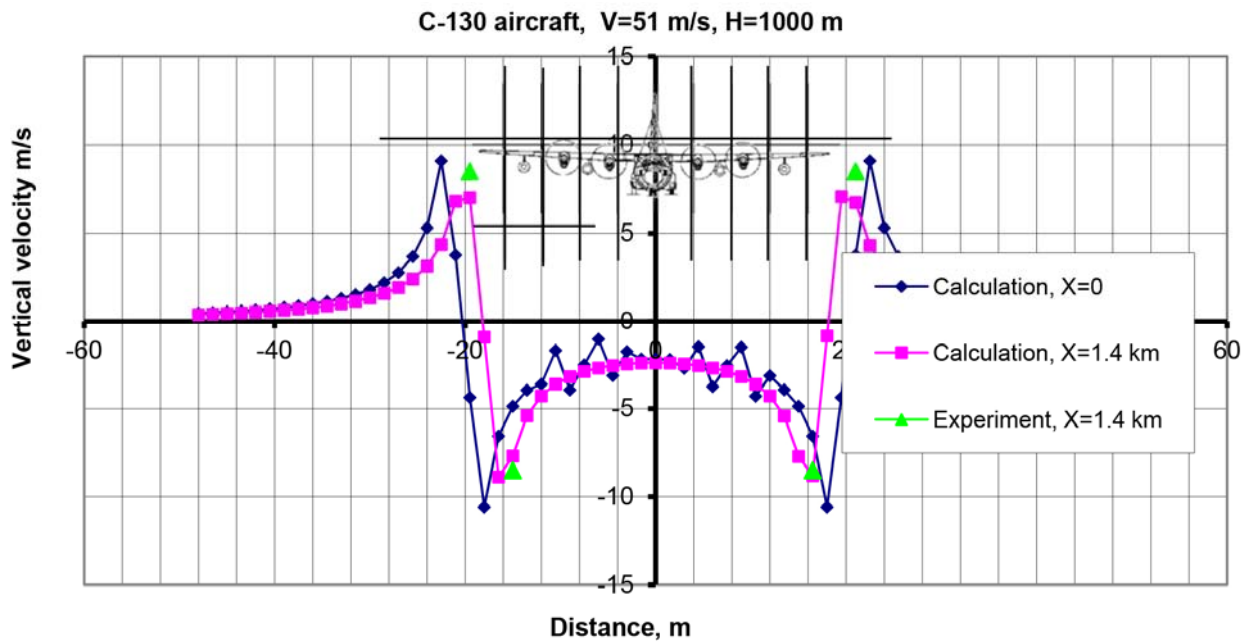


Fig. 3. Vertical velocity distribution in the vortex core of the C-130 aircraft

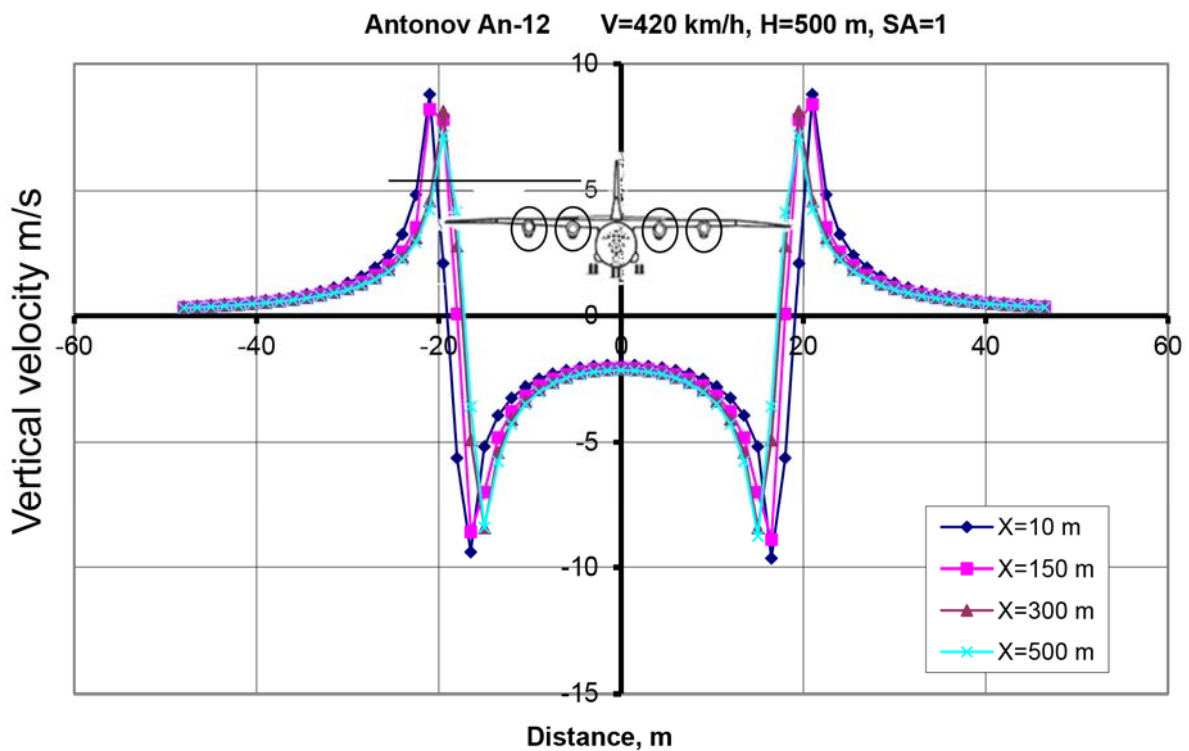


Fig. 4. Distribution of vertical velocities in the vortex core of the An-12 aircraft (excluding the influence of propellers)

tion (fig. 4), and with it (fig. 5). The vertical velocity was calculated at $X = 10, 150, 300$ и 500 m distance. The speed of flight then was $V = 420$ km/h, and height was $H = 500$ m. $\lambda, \bar{\alpha}, \bar{\beta}$ pa-

rameters were extracted from An-12 cruise flight diagram. The atmosphere is stable, $SA = 1$ [12].

It can be seen that vertical velocity spectra are significantly different in Figures 4 and 5. It is also

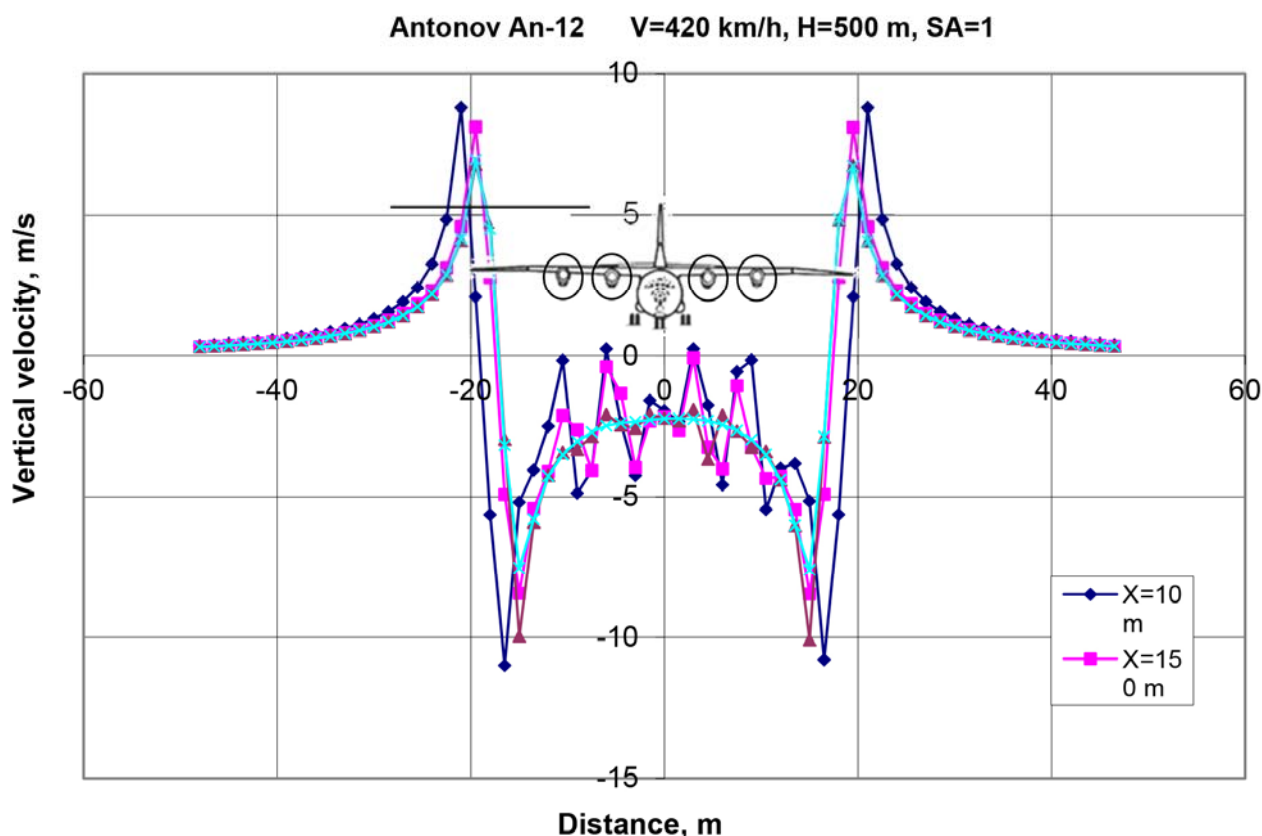


Fig. 5. Distribution of vertical velocities in the vortex core of the An-12 aircraft
(Taking into account the influence of propellers)

worth noticing, that propeller rotation impact on vertical velocity almost disappears already at $X = 500$ m distance. It is connected with vortex natural ease-off due to atmosphere turbulence, along with vortex dissipation and diffusion.

At the second stage, the perturbed velocity fields behind the An-12 at up to 2 km distance (fig. 6) were observed. There are the results of wake vortex characteristics calculation as the perturbed velocity fields, which are presented as vectors of mixed speed W , calculated by formula

$$W = \sqrt{W_z^2 + W_y^2}$$

W_z and W_y are the parts of the vertical and horizontal perturbed speed. W speed variable can also be easily determined through step scale in Figure 6, which size is 10 m/s.

It can be seen that the vortex symmetry from the left and the right wing is broken while X distance from the aircraft is increasing.

This circumstance drastically distinguishes the wake vortex behind the turboprop and turbo-jet aircraft. The wake vortex following the turbo-jet aircraft remains symmetrical for a long time on both the left and the right wings [2, 12, 19–26]. This symmetry is broken almost at once between the turboprop aircraft due to propeller spinning impact. There are the works [12, 27], in which it is shown that propellers spinning one way also cause impact on the aircraft aerodynamic characteristics. It is connected with non-symmetrical flowing around of the aircraft airframe. There is some yet noticeable yawing and roll during the turboprop flight. There are some special procedures implemented in some aircraft structure for their disposal. Nevertheless, it can lead to increase in drag, and, consequently, to extra fuel costs. There are the aircraft with left and right propellers spinning different ways which allows to dispose airframe non-symmetrical flowing around. For instance, A-400M by Airbus Military.

Antonov An-12, $V=420$ km/h, $H=500$ m

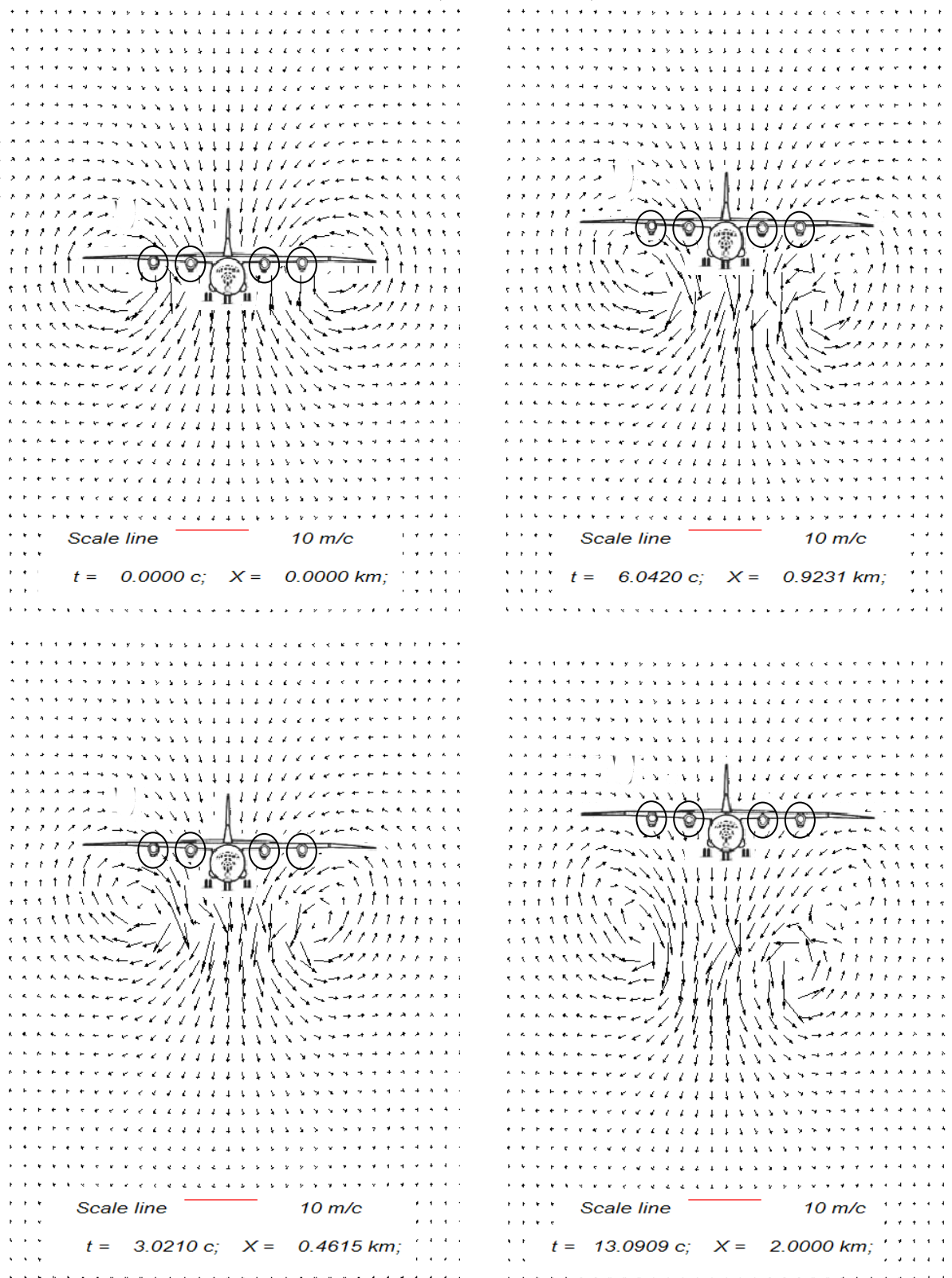


Fig. 6. The field of perturbed velocities behind the An-12 aircraft at various distances

Conclusions

Thus, the calculation showed us that wake vortex behind the turboprop aircraft differs drastically from the one behind the turbo-jet aircraft. The reason of such a difference is propeller rotation. Propellers of almost all the used turboprop aircraft rotate one way. Wake vortex symmetry behind the aircraft is broken during propeller vortex interaction with vortices from the aircraft airframe. It is necessary for the crews of aircraft following the turboprop aircraft to consider this circumstance. Besides that, it is also necessary to consider this peculiarity while providing wake vortex safety in the vicinity of large airports, when the safe separation between the taking-off and landing aircraft should be maintained.

References

1. Golovnev, I.G., Lapshin, K.V. (2017). On-board air data measurement system as a basis for alerting an aircraft about its entry into a vortex formation from another aircraft. *Navigatsiya, navedeniye i upravleniye letatelnyimi apparatami: sbornik tezisev dokladov tretyey Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*. Moscow: Nauchtekhlitizdat, pp. 219–220. (in Russian)
2. Vyshinsky, V.V., Sudakov, G.G. (2009). The vortex track of the aircraft and flight safety issues. *Trudy MFTI*, vol. 1, no. 3, pp. 73–93. (in Russian)
3. Animitsa, O.V., Gaifullin, A.M., Ryzhov, A.A., Sviridenko, Yu.N. (2015). Simulation of in-flight aircraft refueling on a pilot stand. *Trudy MFTI*, vol. 7, no. 1, pp. 3–15. (in Russian)
4. Bosnyakov, I.S., Sudakov, G.G. (2013). Modeling the destruction of a vortex wake behind a passenger aircraft using computational aerodynamics methods. *Trudy TsAGI*, issue 2730, pp. 3–12. (in Russian)
5. Bosnyakov, I.S., Sudakov, G.G. (2014). Calculation of the destruction of the vortex wake behind a passenger aircraft using the method of modeling large vortices of the second order of approximation. *Trudy MFTI*, vol. 6, no. 3 (23), pp. 3–12. (in Russian)
6. Khaustov, A.A. (2012). Aircraft wake vortex evolution model during cruise. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 184, pp. 118–122. (in Russian)
7. Unterstrasser, S., Stephan, A. (2020). 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
8. Speijker, L., Vidal, A., Barbaresco, F., Frech, M., Barny, H., Winkelmanns, G. (2007). ATC-Wake: Integrated wake vortex safety and capacity system. *Journal Air Traffic Control*, vol. 49, no. 1, pp. 17–32.
9. Gillis, T., Marichal, I., Winkelmanns, G., Chatelain, F. (2019). A 2D immersed interface Vortex Particle-Mesh method. *Journal of Computational Physics*, vol. 394, pp. 700–718. DOI: 10.1016/j.jcp.2019.05.033
10. Stephan, A., Schräll, 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
11. 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
12. Ginevsky, A.S., Zhelannikov, A.I. (2009). Vortex traces of aircraft. Springer Berlin, Heidelberg, 154 p. DOI: 10.1007/978-3-642-01760-5
13. Gulyaev, V.V., Zhelannikov, A.I., Moroshkin, D.V., Ushakov, S.A. (2007). The mathematical model of a distant vortical trace behind the airliners with propellers. *Nauchnyy Vestnik MGTU GA*, no. 111, pp. 21–27. (in Russian)
14. 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".
15. 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)

16. 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)

17. Setukha, A.V. (2020). Lagrangian description of three-dimensional viscous flows at large Reynolds numbers. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, vol. 60, no. 2, pp. 302–326. DOI: 10.1134/S0965542520020116

18. Belotserkovsky, S.M., Ginevsky, A.S. (1995). Modeling of turbulent jets and traces based on the discrete vortex method. Moscow: Fizmatlit, 368 p. (in Russian)

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

20. 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

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

22. Winckelmans, G., Bricteux, L., Cocolle, 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. In: *Proceeding 5th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP-5)*, Garching, Germany, vol. 1, pp. 327–331.

23. Frech, M., Holzapfel, 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

24. Holzapfel, F., Steen, M. (2007). Aircraft Wake-Vortex Evolution in Ground Proximity: Analysis and parameterization. *Aeronautics I Astronautics Journal*, vol. 45, no. 1, pp. 218–227. DOI: 10.2514/1.23917

25. Vyshinsky, V.V., Sudakov, G.G. (2006). Vortex trace of an airplane in a turbulent

atmosphere. *Trudy TsAGI*, issue 2667, 155 p. (in Russian)

26. Grigorev, M.A., Zamyatin, A.N., Rogozin, V. (2016). Airflow visualization during research of large scale vortex flows. In: *ICAS 2016, 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Science in Daejeon*. Korea, pp. 1–7.

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

Список литературы

1. Головнев И.Г., Лапшин К.В. Бортовая система измерений воздушных данных как основа для оповещения ЛА о вхождении его в вихревое образование от другого ЛА // Навигация, наведение и управление летательными аппаратами: сборник тезисов докладов третьей Всероссийской научно-технической конференции, Москва, 21–22 сентября 2017 г. ГНЦ РФ ФГУП «ГосНИИАС». М.: Научтехлитиздат, 2017. С. 219–220.

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

3. 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.

4. 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.

5. Босняков И.С., Судаков Г.Г. Расчет разрушения вихревого следа за пассажирским самолетом с помощью метода моделирования больших вихрей второго порядка аппроксимации // Труды МФТИ. 2014. Т. 6, № 3 (23). С. 3–12.

6. Хаустов А.А. Модель эволюции спутного следа воздушного судна при полете

на крейсерском режиме // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 184. С. 118–122.

7. **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

8. **Speijker L.** ATC-Wake: Integrated wake vortex safety and capacity system / L. Speijker, A. Vidal, F. Barbaresco, M. Frech, H. Barny, G. Winckelmans // *Journal Air Traffic Control*. 2007. Vol. 49, no. 1. Pp. 17–32.

9. **Gillis T.** A 2D immersed interface Vortex Particle-Mesh method / T. Gillis, I. Marichal, G. Winckelmans, F. Chatelain // *Journal of Computational Physics*. 2019. Vol. 394. Pp. 700–718. DOI: 10.1016/j.jcp.2019.05.033

10. **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

11. **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

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

13. **Гуляев В.В.** Математическая модель дальнего вихревого следа за самолетами с воздушными винтами / В.В. Гуляев, А.И. Желанников, Д.В. Морозкин, С.А. Ушаков // Научный Вестник МГТУ ГА. 2007. № 111. С. 21–27.

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

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

16. **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.

17. **Сетуха А.В.** О лагранжевом описании трехмерных течений вязкой жидкости при больших значениях числа Рейнольдса // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2020. Т. 60, № 2. С. 297–322. DOI: 10.31857/S004446692002012X

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

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

20. **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

21. **Winckelmans G.** Experimental and numerical study of counter-rotating vortex pair dynamics in ground defect / G. Winckelmans, C. Cottin, G. Daeninck, T. Leweke // In: 18th Congress Français de Mécanique. Grenoble, France, 27–31 August 2007. Pp. 28–33.

22. **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. Cogle, M. Duponcheel, L. Georges // In: Proceedings 5th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (TSFP-5). Garching, Germany, 27–29 August 2007. Vol. 1. Pp. 327–331.

23. **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

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

25. **Вышинский В.В., Судаков Г.Г.** Вихревой след самолета в турбулентной ат-

мосфере // Труды ЦАГИ. 2006. Вып. 2667. 155 с.

26. Grigorev M.A., Zamyatin A.N., Rogozin V. Airflow visualization during research of large scale vortex flows // In: ICAS 2016. 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Science in Daejeon. Korea, September 2016. Pp. 1–7.

27. Grigorev M.A., Zamyatin A.N. Experimental and theoretical investigations of large scale vortex flows // In: ICVFM 2016. 7th International Conference on Vortex Flows and Vortex Models. Rostock, Germany, 19–22 September 2016. Pp. 98–99.

Сведения об авторе

Желанников Александр Иванович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, zhelannikov@yandex.ru.

Information about the author

Alexander I. Zhelannikov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of TsAGI named after prof. N.E. Zhukovsky, zhelannikov@yandex.ru.

Поступила в редакцию 18.12.2022
Принята в печать 25.05.2023

Received 18.12.2022
Accepted for publication 25.05.2023

ББК 05
Н 34
Св. план 2023

Научный Вестник МГТУ ГА
Том 26, № 02, 2023
Civil Aviation High TECHNOLOGIES
Vol. 26, No. 02, 2023

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

Оформить подписку на печатную версию журнала можно на сайте Объединенного каталога «Пресса России» www.pressa-rf.ru. Подписной индекс 84254.

Подписано в печать 25.05.2023.

Печать цифровая

Формат 60×90/8

14,25 усл. печ. л.

Заказ № 964/

Тираж 50 экз.

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

© Московский государственный
технический университет ГА, 2023