

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ**

**НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК
ГосНИИ ГА**

**SCIENTIFIC BULLETIN
OF THE STATE SCIENTIFIC RESEARCH
INSTITUTE OF CIVIL AVIATION**

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ (№ 351)

№ 40

**Москва
2022**

ББК 39.5

НЗ4

Научный вестник ГосНИИ ГА

№ 40

Научный вестник ГосНИИ ГА включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation is included in the List of peer-reviewed scientific publications, which should be published basic scientific results of dissertations for the degree of Candidate of Sciences, for the degree of Doctor of Sciences.

Учредитель. Издатель. Редакция:

Федеральное государственное унитарное предприятие
Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации
Российская Федерация, 125438, Москва, ул. Михалковская, д. 67, корп. 1

Founder, Publisher, Editorial board:

The State Scientific Research Institute of Civil Aviation
Mikhalkovskaya Street, 67, building 1, 125438 Moscow, Russian Federation

Подписной индекс в Интернет-каталоге
«Пресса России» 70663
© ФГУП Государственный НИИ гражданской
авиации, 2022

Редакционная коллегия

Главный редактор	– А. В. Максименко, канд. социол. наук (ГосНИИ ГА)
Зам. главного редактора	– А. А. Богоявленский, д-р техн. наук (ГосНИИ ГА)
Ответственный секретарь	– С. В. Диогенов, канд. воен. наук (ГосНИИ ГА)

Члены редакционной коллегии

- В. И. Горбаченко, д-р техн. наук, проф. (ПГУ, Пенза, Россия)
- М. С. Громов, лауреат Премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, заслуженный работник транспорта Российской Федерации, канд. техн. наук (ГосНИИ ГА, Москва, Россия)
- С. В. Далецкий, заслуженный работник транспорта Российской Федерации, д-р техн. наук, проф. (ГосНИИ ГА, Москва, Россия)
- А. В. Кан, канд. техн. наук (НИЦ «Институт им. Н. Е. Жуковского», Москва, Россия)
- А. Я. Книвель, канд. техн. наук (Авиарегистр России, Москва, Россия)
- В. Б. Козловский, д-р техн. наук, проф. (ПАНХ, Краснодар, Россия)
- Е. А. Куклев, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, д-р техн. наук, проф. (СПбГУ ГА, Санкт-Петербург, Россия)
- У. Э. Курманов, канд. техн. наук, доц. (Кыргызский авиационный институт им. И. Абдраимова, Бишкек, Кыргызская Республика)
- Е. Е. Нечаев, заслуженный работник транспорта Российской Федерации, д-р техн. наук, проф. (МГТУ ГА, Москва, Россия)
- В. А. Соколов, заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, д-р физ.-мат. наук, проф. (Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова, Ярославль, Россия)
- О. Ю. Страдомский, заслуженный работник транспорта Российской Федерации, канд. техн. наук (ГосНИИ ГА, Москва, Россия)
- Р. С. Фадеев, канд. техн. наук (Ассоциация «Транспортная безопасность», Москва, Россия)
- Фам Вьет Зунг, канд. техн. наук (Министерство транспорта Вьетнама, Ханой, Вьетнам)
- О. Г. Феоктистова, д-р техн. наук, доц. (МГТУ ГА, Москва, Россия)

тел./факс: 8 (495) 956 49 63 (*1018)

e-mail: science@gosniiga.ru

Плата за публикацию в Научном вестнике ГосНИИ ГА с аспирантов не взимается

Editorial Board

Chief editor	– Maksimenko A. V., Cand. Sci. (Sociol.), GosNII GA, Moscow, Russia
Deputy chief editor	– Bogoyavlenskiy A. A., Dr. Sci. (Eng.), GosNII GA, Moscow, Russia
Responsible Secretary	– Diogenov S. V., Cand. Sci. (Mil.), GosNII GA, Moscow, Russia

The members of the Editorial Board

Gorbachenko V. I., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Penza State University, Penza, Russia
Gromov M. S., Cand. Sci. (Eng.), GosNII GA, Moscow, Russia
Daletskiy S. V., Dr. Sci. (Eng.), Prof., GosNII GA, Moscow, Russia
Dung Pham Viet, Cand. Sci. (Eng.), Department of Air Navigation of the Ministry of Transport of Vietnam, Hanoi, Vietnam
Kan A. V., Cand. Sci. (Eng.), National Research Center “Zhukovsky Institute”, Moscow, Russia
Knivel A. Ya., Cand. Sci. (Eng.), Aviation Register of the Russian Federation, Moscow, Russia
Kozlovskiy V. B., Dr. Sci. (Eng.), Prof., PANH Helicopters, Krasnodar, Russia
Kuklev E. A., Dr. Sci. (Eng.), Prof., Saint-Petersburg State University CA, Saint-Petersburg, Russia
Kurmanov U. Eh., Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Kyrgyz Aviation Institute named after I. Abdraimova, Bishkek, Kyrgyzstan
Nechaev E. E., Dr. Sci. (Eng.), Prof., MSTU CA, Moscow, Russia
Sokolov V. A., Dr. Sci. (Phys.-Mat.), Prof., P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russia
Stradomskiy O. Yu., Cand. Sci. (Eng.), GosNII GA, Moscow, Russia
Fadeev R. S., Cand. Sci. (Eng.), Transport Safety Association, Moscow, Russia
Feoktistova O. G., Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MSTU CA, Moscow, Russia

tel./fax: 8 (495) 956 49 63 (*1018)

e-mail: science@gosniiga.ru

Postgraduates are not charged for the publication of articles in the Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК ГОСУДАРСТВЕННОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ
--

№ 40

2022

СОДЕРЖАНИЕ

Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники

- Акопян К. Э., Цихоцкий А. Ф.** Проблемы трансформации нормативно-правовой базы по поддержанию летной годности. Сертификат летной годности 9
- Лосев А. И., Потапенко Ю. А., Неделько Д. В.** Результаты исследования причин разрушения корпуса втулки рулевого винта вертолета при стендовых испытаниях 20
- Мальцев О. Г., Поплетеев С. И., Мариничев В. И.** Исследование перспективных направлений снижения эмиссии веществ, вызывающих парниковый эффект, поступающих в атмосферу от деятельности отечественной гражданской авиации 31
- Борисов Е. Г., Шестаков И. Н.** Расчет координат источника радиоизлучения многопозиционной системой пассивной локации на основе разностно-дальномерных и энергетических определений 41
- Масленникова Г. Е., Дмитриева С. В., Тажетдинов Р. Р.** Математическая модель скороподъемности самолетов Ан-26 при температурах наружного воздуха ниже стандартной атмосферы 52
- Рябинин А. Л., Григорин-Рябов В. В., Карпова Т. А.** Обобщение опыта эксплуатации бортового оборудования самолетов Ил-76ТД(Т) за период 2014–2019 гг. 60

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

- Самойлов И. А., Лесничий И. В., Самойлов В. И., Кипчарский Д. А.** К вопросу выбора аэропортов для пилотного создания в них систем заправки среднемагистральных самолетов жидким водородом 68
- Арутюнян Д. В., Феоктистова О. Г.** Безопасность полетов при реализации концепции PBN 81
- Кан А. В., Степанский М. А., Топоров Н. Б., Шалкаускас А. П., Шапкин В. С.** Система моделей формирования облика комплекса обеспечения выживаемости гражданских воздушных судов 88

Фридлянд А. А., Чубуков А. П., Низаметдинов Р. Р. Анализ авиационной подвижности населения и ее дифференциация по регионам Российской Федерации	100
Спрысков В. Б., Шувалова Е. В., Кузнецов С. В. Модель оценки технического риска катастроф при эшелонировании воздушных судов в горизонтальной плоскости на основе информации системы наблюдения обслуживания воздушного движения	111
Белякова Н. С., Потураев А. В., Алпеев П. В., Карасев К. В., Дюжикова Г. Е. Об особенностях компоновки рабочего места внешнего пилота	124

Интеллектуальные транспортные системы

Болелов Э. А., Кудинов А. Т., Шикалов В. Н., Прохоров А. В., Губерман И. Б. Алгоритмы комплексной обработки информации глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и Бэйдоу в бортовой аппаратуре воздушных судов	132
Мусин С. М., Калий В. А., Плотников А. В. Надежность программных средств бортового оборудования воздушных судов	145
Великанов А. В., Шишкин А. В., Кочетова Ж. Ю., Осипов В. С., Дьякова Н. А. Применение беспилотных летательных аппаратов для проведения химической разведки грунта на зараженных территориях	154
Петрухин С. А., Черников П. Е., Глухов Г. Е., Еремин В. А. Перспективы использования блокчейна в информационно-аналитической системе мониторинга летной годности воздушных судов	164

SCIENTIFIC BULLETIN OF THE STATE SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE OF CIVIL AVIATION

№ 40

2022

CONTENTS

Navigation and operation of aircraft

Akopyan K. E., Tsikhotskiy A. F. Problems of transformation of the regulatory framework of the continuous airworthiness. Certificate of airworthiness	9
Losev A. I., Potapenko Yu. A., Nedelko D. V. The research results of the tail rotor housing sleeve structural fracture cause during bench tests of the helicopter	20
Maltsev O. G., Popleteev S. I., Marinichev V. I., The study of promising ways to reduce the emission of substances causing the greenhouse effect entering the atmosphere from the activities of domestic civil aviation	31
Borisov E. G., Shestakov I. N. Calculation of the coordinates of the radio emission source by a multiposition passive location system based on difference-ranging and energy determinations ...	41
Maslennikova G. E., Dmitrieva S. V., Tazhetdinov R. R. Aircraft An-26 climb rate model at temperatures below standard air temperatures	52
Ryabinin A. L., Grigorin-Ryabov V. V., Karpova T. A. Generalization of the airborne equipment operation experience of the IL-76TD(T) aircraft for the period between 2014–2019	60

Transport and transport-technological systems of the country, its regions and cities, organization of production in transport

Samoylov I. A., Lesnichiy I. V., Samoylov V. I., Kipcharskiy D. A. To the issue of selecting airports for the pilot creation of liquid hydrogen fueling systems in them for medium-haul aircraft	68
Arutyunyan D. V., Feoktistova O. G. Flight safety when implementing the concept of PBN	81
Kan A. V., Stepanskiy M. A., Toporov N. B., Shalkauskas A. P., Shapkin V. S. System of models for forming the appearance of a complex for ensuring the viability of civil aircraft	88
Fridlyand A. A., Chubukov A. P., Nizametdinov R. R. Analysis of air mobility of the population and its differentiation by regions of Russian Federation	100

Spryskov V. B., Shuvalova E. V., Kuznetsov S. V. Model for estimating technical risk of accident when separation aircraft in the horizontal plane based on air traffic service surveillance system 111

Belyakova N. S., Poturaev A. V., Alpeev P. V., Karasev K. V., Duzhikova G. E. About the features of the layout of the workstation of external pilot 124

Intelligent transport systems

Bolelov E. A., Kudinov A. T., Shikalov V. N., Prokhorov A. V., Guberman I. B. Algorithms of complex information processing of global navigation satellite systems GLONASS and Beidou in the onboard equipment of aircraft 132

Musin S. M., Kaliy V. A., Plotnikov A. V. Reliability of aircraft onboard equipment software .. 145

Velikanov A. V., Shishkin A. V., Kochetova Zh. Yu., Osipov V. S., Dyakova N. A. The use of unmanned aerial vehicles for chemical exploration of soil in contaminated areas 154

Petrukhin S. A., Chernikov P. E., Glukhov G. E., Eremin V. A. Prospects for the use of block-chain in the information and analytical system for monitoring the airworthiness of aircraft 164

Научная статья
УДК 629.735.017.1(083)

ПРОБЛЕМЫ ТРАНСФОРМАЦИИ НОРМАТИВНО-ПРАВОВОЙ БАЗЫ ПО ПОДДЕРЖАНИЮ ЛЕТНОЙ ГОДНОСТИ. СЕРТИФИКАТ ЛЕТНОЙ ГОДНОСТИ

К. Э. АКОПЯН, А. Ф. ЦИХОЦКИЙ

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. В статье рассматривается одна из фундаментальных проблем поддержания летной годности (ПЛГ) гражданских воздушных судов (ГВС) – выдача сертификата летной годности. Показана принципиальная необходимость выдачи сертификата летной годности. Главной целью этой процедуры является проведение периодических инспекций летной годности и государственная регистрация фактического уровня летной годности ВС, а в случае выявления отклонений – принятия корректирующих мер по изменению фактического уровня летной годности для его приведения к уровню, требуемому государством регистрации воздушного судна ВС. Проанализированы требования стандартов ИКАО, способы их реализации и лучшие практики гражданской авиации (ГА) СССР и западных стран. Авторами впервые в ретроспективе проанализированы системы ПЛГ, применяемые в российской и советской ГА и в гражданской авиации США и Европы. Выявлены, определены и показаны существенные отличия между ними. Показаны исторически обусловленные причины незначительной роли сертификации экземпляров ГВС в СССР, унаследованные затем российской ГА. На примерах тяжелых авиационных происшествий наглядно показана необходимость исправления сложившейся ситуации путем переработки существующих Федеральных авиационных правил в области ПЛГ и обязательного исполнения требований директив летной годности эксплуатантами и владельцами ВС. Подчеркнута актуальная необходимость принятия срочных мер для трансформации нормативно-правовой базы по ПЛГ в силу изменившейся в ГА Российской Федерации ситуации из-за санкций. Кратко перечислен минимально необходимый для этого набор мероприятий. Научно обоснована необходимость проведения коренной реформы системы ПЛГ ГВС, применяемой в практике отечественной ГА. Приведены примеры последствий грубого пренебрежения требованиями по ПЛГ, проявившихся в виде целого ряда авиационных происшествий.

Ключевые слова: летная годность, поддержание летной годности, сертификат летной годности, инспекция летной годности, ИКАО, воздушное судно, гражданская авиация

Для цитирования: Акопян К. Э., Цихоцкий А. Ф. Проблемы трансформации нормативно-правовой базы по поддержанию летной годности. Сертификат летной годности // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 40. С. 9–19.

PROBLEMS OF TRANSFORMATION OF THE REGULATORY FRAMEWORK OF THE CONTINUOUS AIRWORTHINESS. CERTIFICATE OF AIRWORTHINESS

K. E. AKOPYAN, A. F. TSIKHOTSKIY

The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract. The article deals with one of the fundamental problems of continuing airworthiness of civil aircraft – the issuance of an airworthiness certificate. The fundamental necessity of issuing an airworthiness certificate is demonstrated, the main purpose of which is to conduct periodic inspections of the airworthiness of aircraft to establish the actual level of their airworthiness by the state of registration, and in case of deviations, corrective measures are taken to change the actual level to bring it to the state of registration. The requirements of the ICAO standards, the ways of their implementation and the best practices of civil aviation (CA) of the USSR and Western countries are analyzed. The main differences in CA practices are shown, the fundamental ones are established, and the economic reasons for these differences are demonstrated. The article shows the historically determined reasons for the insignificant role of certification of copies of civil aircraft in the USSR, then inherited by the Russian CA. In the radically changed economic and legal conditions of the CA operation, the need to correct the current situation by reworking the existing Federal Aviation Regulations in the field of maintaining airworthiness and mandatory compliance with the requirements of airworthiness directives by operators and aircraft owners is clearly shown by examples of severe aviation accidents. The urgent need to take urgent measures to transform the regulatory framework for continuing airworthiness due to the radically changed situation in the CA of the Russian Federation due to sanctions was emphasized. The minimum necessary set of measures for the transformation of the regulatory framework for continuing airworthiness is briefly listed.

Keywords: continuous airworthiness, Certificate of airworthiness, airworthiness inspection, ICAO standards, civil aviation

For citation: Akopyan K. E., Tsikhotskiy A. F., Problems of transformation of the regulatory framework of the continuous airworthiness. Certificate of airworthiness, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 40, pp. 9–19. (In Russ.)

Введение

Российское законодательство в области летной годности в последние десятилетия находится не на должном уровне [1]. Несмотря на многочисленные реформы и издание новых нормативно-правовых актов, ситуация не меняется в лучшую сторону. Целью данной статьи является определение причин, обусловивших сложившуюся ситуацию с одним из основополагающих инструментов для контроля со стороны Государства Регистрации ВС в лице его Уполномоченного органа [2] за фактическим состоянием летной годности парка ВС ГА, ведь только установив фундаментальные причины сложившегося положения, можно рассчитывать на эффективное устранение проблемы.

Цель исследования

Специфические условия общественного строя и экономического уклада в СССР не могли не отразиться на условиях производственной деятельности. ГА СССР имела ряд существенных расхождений со сложившейся практикой международной ГА, в том числе в нормативно-правовом обеспечении деятельности. Кроме того, СССР сравнительно поздно вступил в Международную организацию гражданской авиации (ИКАО), подписав Чикагскую конвенцию лишь в ноябре 1970 года, и прямые требования стандартов ИКАО необходимо было приводить в соответствие с реалиями сложившейся за десятилетия работы отрасли.

В результате ряд процессов по поддержанию летной годности (ПЛГ), признанных стандартами ИКАО обязательными, исполнялись сугубо формально, без должного нормативного обеспечения и реального наполнения. В первую очередь, сказанное относится к сертификации экземпляров ВС.

Требование о наличии на борту самолета удостоверения о годности к полетам является практически единственным требованием к техническому состоянию ВС Чикагской Конвенции. (В современной терминологии термин «удостоверение о годности к полетам» заменен на

«сертификат летной годности» (СЛГ), как указано в Главе 3 Части II Приложения 8 к Чикагской Конвенции [3–5]).

Почему ИКАО уделяет столь большое внимание СЛГ, в то время как его наличие на борту самолета «Аэрофлота» времен СССР было лишь фактически формальностью?

Вопрос этот имеет отнюдь не только исторический интерес. Существующие проблемы с ПЛГ и выдачей СЛГ – это одна из тех причин, по которой большая часть парка магистральных пассажирских самолетов в России еще недавно была зарегистрирована в реестрах иностранных государств, чего не наблюдается даже в ГА африканских государств. Целью исследований является установление оснований для последующей разработки комплекса технических решений, конкретных предложений и рекомендаций, направленных на совершенствование работ по ПЛГ ВС, зарегистрированных в Государственном реестре гражданских воздушных судов (ГВС) Российской Федерации.

Постановка задачи

СЛГ выдается на основании удовлетворительного доказательства того, что это ВС отвечает требованиям к конструированию, предусмотренным соответствующими нормами летной годности [3, 4]. То есть СЛГ удостоверяет соответствие гражданского ВС типовой конструкции и его способность обеспечить безопасную эксплуатацию (ст. 35 Воздушного Кодекса России [2]).

В соответствии с действующими Федеральными авиационными правилами (ФАП), Часть 21, типовая конструкция авиационной техники представляет собой конструкцию изделия, одобренную в соответствии с процедурами указанных правил и удостоверенную Сертификатом типа или аттестатом о годности к эксплуатации, либо иным актом об утверждении типовой конструкции гражданского ВС, выданным до 1 января 1967 года (п. 21.11 ФАП-21). То есть СЛГ удостоверяет, что конкретное гражданское ВС соответствует одобренной государством типовой конструкции ВС.

Существует ли в принципе необходимость проверять это соответствие в течение всего срока службы ВС, если конкретное ВС выпущено изготовителем на одобренном авиационном заводе в соответствии с утвержденной конструкторской документацией, проверено и испытано и уже признано годным к эксплуатации, то есть соответствует типовой конструкции? Зачем ИКАО прямо требует чтобы «сохранение летной годности ВС определялось путем проведения регулярных проверок через соответствующие промежутки времени, учитывая при этом срок и характер эксплуатации, или на основании такой системы контроля, принятой государством, которая обеспечит получение по меньшей мере равноценных результатов» [4]?

Ответ на эти вопросы таков: типовая конструкция ВС определяется не только сертификатом типа (СТ) или аттестатом о годности к эксплуатации. Утвержденная в установленном порядке документация на внесение изменений в типовую конструкцию также определяет облик типовой конструкции ВС.

Изменения типовой конструкции экземпляров ВС в ходе эксплуатации, по мнению авторов, встречаются трех видов:

- I. Опциональные.
- II. Вынужденные.
- III. Обязательные.

Опциональные изменения вызываются изменением условий эксплуатации самолета и не связаны непосредственно с изменением требований к летной годности ВС. К таким изменениям можно отнести: изменение компоновки пассажирского салона самолета (например, установку салона бизнес-класса); установку устройств, повышающих комфорт пассажиров (например, антенн приема широкополосного спутникового интернета); повышение экономической

эффективности эксплуатации ВС (например, снижение расхода топлива в результате установки аэродинамических законцовок на крыло самолета) и т. п.

Опциональные доработки конструкции ВС могут иметь значительный масштаб, например – конвертация пассажирского самолета в грузовой, сопровождающаяся изменением конструктивно-силовой схемы фюзеляжа.

Опциональные изменения выполняются, как правило, исходя из коммерческих интересов эксплуатанта (или пожеланий владельца частного ВС).

Вынужденные изменения конструкции вводятся в результате появления новых требований к летной годности ВС. В качестве примера можно вспомнить доработку ВС для обеспечения полетов в условиях сокращенного вертикального эшелонирования. Хотя воздушное судно, не модифицированное для выполнения полетов в пространстве RVSM, может безопасно эксплуатироваться в странах, в которых система RVSM не введена, или на высотах менее 7500 м, очевидно, что коммерческий авиалайнер для полетов над Европой должен пройти модификацию.

Устранения повреждений конструкции ВС также пример вынужденных изменений. Ремонт повреждения силовых элементов конструкции ВС (в результате авиационного инцидента или чрезвычайного события), если такое повреждение на ВС не может быть отремонтировано путем замены отдельных компонентов или выполнением процедур, предусмотренных эксплуатационной документацией, требует разработки и утверждения в установленном порядке документации на ремонт поврежденной конструкции.

Обязательные изменения – изменения, направленные на устранение небезопасного состояния типовой конструкции ВС.

Несмотря на весь накопленный опыт эксплуатации десятков тысяч ВС в самых разных климатических условиях, современные методы испытаний и компьютерное проектирование, Разработчики не в состоянии проектировать и производить ВС, в конструкции которых отсутствуют опасные конструктивно-производственные дефекты, проявляющиеся только на различных этапах эксплуатации.

Здесь необходимо уточнить терминологию, которая отражает исторически сложившиеся особенности развития авиатранспортной отрасли. Разработчик, в соответствии с терминологией ФАП-21 – юридическое лицо, имеющее сертификат Разработчика. Как показано ниже, для советской и отчасти российской авиации это понятие практически тождественно термину Держатель СТ, и даже сейчас в нормативно-правовой базе России эти определения зачастую выступают в качестве синонимов. Мировая авиация более однозначно разделяет эти понятия. В отношении самолета определенного типа значительное количество юридических лиц может выступать в качестве Разработчика (например, модификаций) для этого типа ВС, в то время как Держатель СТ только один. Разработчик – то юридическое лицо, которое указано в карте данных сертификата типа в этом качестве. Например, в качестве Разработчика модификации самолета Airbus A320 в EASA на основании выданного одобрительного документа могут выступать десятки организаций, в то время как только один Разработчик является Держателем СТ на Airbus A320, и это именно компания Airbus S.A.S.

Самым свежим примером обязательных изменений стала необходимость доработки типовой конструкции самолетов семейства Boeing 737 MAX. Новейшая модификация лайнера вышла на линии весной 2017 года, а уже через два года эксплуатация всего парка Boeing 737 MAX была приостановлена из-за выявленного конструктивного дефекта, приведшего к двум катастрофам самолетов этого типа.

Обязательные изменения типовой конструкции, как правило, в настоящее время оформляются директивами летной годности (ДЛГ).

Таким образом, типовая конструкция ВС на протяжении всего жизненного цикла подвергается постоянным изменениям, ряд из которых жизненно необходим для обеспечения

безопасности полетов, а другие, хоть и не влияют непосредственно на летную годность ВС, обеспечивают экономическую эффективность его эксплуатации.

Для того, чтобы оценить масштаб этих изменений, необходимо привести несколько цифр.

Только ДЛГ – то есть обязательных требований к изменению типовой конструкции, например, на самолет Airbus A320-211, на июль 2022 года выпущено 517 единиц, а также еще и тысячи сервисных бюллетеней, причем, в указанное число не входят директивы по двигателю самолета и его опциональному оборудованию.

За один усредненный год пассажирский самолет, эксплуатирующийся на коммерческих воздушных перевозках, получает около 12 повреждений разной степени, выявляемых на силовых элементах, в его конструкцию внедряется 3 главных изменения и около 10 второстепенных.

Необходимость постоянного контроля за летной годностью ВС с весьма динамично меняющимся обликом и привела к созданию системы сертификации, основанной на периодических проверках эксплуатируемых ВС. Но только необходимостью оценки соответствия установленным требованиям система государственного надзора за ПЛГ не исчерпывается.

Поскольку полнота и периодичность выполнения технического обслуживания (ТО), соответствие установленным требованиям организаций по ТО ВС, актуальность используемой эксплуатационной документации непосредственным образом определяют летную годность и проверяются в ходе инспекций летной годности экземпляров ВС, авиационная администрация получает возможность при анализе результатов выполненных инспекций получать не просто информацию о выявленных несоответствиях, но и выявлять действующие в области ПЛГ ВС факторы риска до того момента, как эти факторы проявят себя очевидно негативным образом, приведя к авиационному инциденту или происшествию. Необходимость своевременного исключения факторов риска привела к соответствующим нормативным требованиям в отношении создания системы постоянного мониторинга летной годности во всех ведущих авиационных странах мира.

Настоящая статья поднимает актуальные проблемы необходимости качественного изменения (трансформации) нормативно-правовой базы в области ПЛГ парка ГВС, эксплуатируемых отечественными авиакомпаниями, а также показывает необходимость разработки комплекса технических решений, конкретных предложений и рекомендаций, направленных на совершенствование работ по ПЛГ ВС, зарегистрированных в Государственном реестре ГВС Российской Федерации.

Исторический экскурс

Почему же в отечественных реалиях система ПЛГ не получила должного внимания со стороны государства?

Причины прежде всего лежат в исторической плоскости. Как отмечено в начале статьи, система функционирования ГА в СССР развивалась независимо от ГА ведущих капиталистических держав. В результате, обеспечивая к концу 80-х годов XX века показатели безопасности полетов гражданских ВС, вполне сопоставимые с лучшими показателями ГА США и Европы, система ПЛГ в отечественной ГА имела ряд существенных отличий, а именно:

1. Функции по изменению типовой конструкции, в первую очередь по выпуску главных и второстепенных изменений конструкции, а также по разработке документации по ремонту (устранению повреждений) типовой конструкции ВС были предоставлены исключительно разработчику ВС (либо авиаремонтным заводам, в технологических бюро которых работали представители разработчика).

В сложившейся к этому времени общемировой практике такие доработки могли быть разработаны и сертифицированы организациями, не являющимися держателями сертификата типа на ВС, что обеспечивало мировой авиации высокую гибкость в отношении требований со

стороны эксплуатантов ВС и позволяло оперативно реагировать на самые различные требования заказчика. С другой стороны, выполнение модификаций по документации Разработчиков, не являющихся Держателем СТ, требовало постоянного контроля за постоянно меняющимся обликом типовой конструкции [6].

Вопрос же возможной несовместимости различных доработок, выполняемых совместно в одной и той же зоне конструкции конкретного ВС, в практике мировой гражданской авиации так до конца удовлетворительно и не решен, поскольку при разработке и сертификации изменений в расчет не могут быть приняты все возможные варианты доработок.

2. Сами разработчики и изготовители ВС являлись различными юридическими лицами, существовали в системе Министерства авиационной промышленности СССР (МАП) и не подчинялись Министерству гражданской авиации СССР (МГА).

В результате МГА имело достаточно условную возможность повлиять на разработчика и изготовителя ВС. Необходимость устранения выявленных в ходе эксплуатации дефектов вступала в противоречие с возможностями разработчика, не имевшего в условиях бурного развития отечественной авиации лишних ресурсов на решение эксплуатационных проблем. Для изготовителя ВС во главе угла стояло выполнение плановых показателей производственной деятельности по линии МАП. Безусловно, серьезные конструктивно-производственные дефекты устранялись своевременно, но ряд дефектов становился вечным.

В сложившейся мировой практике, именно ведомство гражданской авиации (ВГА, в терминологии ИКАО) имело административные рычаги воздействия на разработчиков и изготовителей ВС (поскольку именно ВГА выдавало разрешительные документы на деятельность в области ГА) и легко могло настоять на внесении необходимых изменений в типовую конструкцию.

Это не исключало возможности вмешательства в деятельность ВГА в ключе, желательном для разработчиков ВС. Из примеров таких вмешательств в первую очередь можно вспомнить аварийную ситуацию с замками грузовых дверей на самолетах McDonnell Douglas DC-10 в начале 70-х годов и давление со стороны тогдашнего президента США на руководство FAA, в результате чего американская авиационная администрация не выпустила ДЛГ, проект которой уже был подготовлен соответствующим подразделением FAA (отметим причину такого особенного отношения со стороны президента Никсона: концерн McDonnell Douglas был одним из основных спонсоров его президентских компаний 1968 и 1972 годов). Серьезный конструктивно-производственный недостаток устранялся сервисным бюллетенем разработчика, весьма в несрочном и не слишком обязательном порядке – вплоть до того момента, пока дефект не проявил себя в виде катастрофы с самолетом DC-10 TC-JAV 3 марта 1974 года, унесшей жизни 346 человек.

3. Обязательные изменения конструкции вводились, как правило, бюллетенями разработчика/изготовителя.

В результате в МГА а позже в российской авиационной администрации, не было структуры, ответственной за подготовку, публикацию и контроль за исполнением ДЛГ.

На первый взгляд, нет никакой принципиальной разницы, вводится ли обязательное изменение конструкции сервисным бюллетенем или ДЛГ. Тем более, что в случае необходимости выполнения доработок конструкции западные ДЛГ как правило будут содержать ссылку именно на соответствующие бюллетени производителя.

Но разница есть, и она является весьма существенной. ДЛГ – документ авиационной администрации, который может быть оперативно выпущен и, что более важно, оперативно доведен до сведения эксплуатантов ВС, в том числе и до авиационных администраций и эксплуатантов иностранных государств. Сервисные же бюллетени доводятся до сведения эксплуатантов как правило только при условии оплаты соответствующей подписки, которая в принципе не является обязательной.

Такие особенности доведения до эксплуатантов обязательной информации по ПЛГ, к сожалению, могут приводить к авиационным происшествиям с самолетами отечественного производства. Достаточно вспомнить катастрофу иранского самолета Ту-154М ЕР-СРG, произошедшую 15.07.2009 и связанную с разрушением диска первой ступени КНД первого двигателя. Бюллетени №№ 1864-БД-Г, 1865-БД-Г по ультразвуковому и вихретоковому контролю переднего и заднего торцов дисков первой ступени КНД были введены в действие в России за год до катастрофы, в 2008 году, но так и не были доведены до сведения иранской авиационной администрации и зарубежных эксплуатантов.

4. Структура эксплуатационной документации (ЭД) самолетов разработки СССР и стран СЭВ принципиально отличалась от структуры ЭД самолетов иностранного производства.

Значительно меньшая вариативность исполнения типовой конструкции, сосредоточение контроля за изменениями конструкции в руках разработчика ВС позволяли выполнять ТО по единым Регламентам. Необходимость разработки индивидуальных Программ ТО отсутствовала.

Сами экономические условия работы единого «Аэрофлота» в СССР и ВПО «Авиаремонт» исключали возможность «экономии» на выполнении периодического ТО и капитальных ремонтов ВС, и проблема надзора за объемом и периодичностью выполняемого ТО остро не стояла. Соответственно, и нужда в контроле за этим также отсутствовала.

5. Целый класс ГА – авиация общего назначения (АОН) в Советском Союзе отсутствовал. Все виды авиационных работ ГА выполнялись в структуре единой авиакомпания. Частный интерес граждан, испытывающих тягу к полетам, должны были удовлетворять авиационно-спортивные клубы ДОСААФ, структуры, функционировавшие в структуре государственной, а не гражданской авиации. Поэтому никаких нормативно-правовых актов, учитывающих специфику эксплуатации частных легких ВС, в МГА просто не существовало, ввиду отсутствия таких ВС в принципе.

Результаты

Таким образом, типовая конструкция гражданских ВС в ГА СССР находилась под контролем уполномоченного органа государства в значительно большей степени, чем в капиталистических странах, а сама вариативность исполнения типовой конструкции была значительно ниже. В силу этого оформление удостоверения о годности к полетам на экземпляр ВС в СССР не имело под собой объективной необходимости и представляло собой формальную процедуру, и именно так воспринималось всеми причастными к этой процедуре лицами. Абсолютно аналогичное отношение к СЛГ сохраняется в ГА России и поныне, невзирая на кардинальным образом изменившиеся условия существования отрасли и совершенно другие типы ВС в парках множества российских авиакомпаний.

В результате в ГА России система эффективного надзора за летной годностью ВС так и не была создана. Вся нормотворческая деятельность соответствующего департамента Минтранса России под лозунгом «либерализации бизнеса» свелась к выхолащиванию сути процесса сертификации, требования к летной годности ВС крайне расплывчаты, неконкретны и постоянно снижаются. Например, до сих пор в ФАП отсутствуют требования об обязательности выполнения ДЛГ эксплуатантами и владельцами ВС. Требования стандартов ИКАО к России, как государству регистрации ВС, о необходимости непосредственного одобрения (оценки) обязательной информации по ПЛГ, поступившей от государства – разработчика ВС [4] в отечественных правилах не реализованы. Понятно, что более специфические вопросы ПЛГ современных ВС, такие как требования к составу и порядку разработки Программ ТО или порядок разработки и утверждения ремонтной документации, тем более не являются предметом четко определенных нормативных требований. В таких условиях

вопрос о создании системы постоянного контроля за летной годностью парка ВС в принципе не может быть поставлен.

В условиях экономии средств на бюджетное финансирование уполномоченного органа выполнение постоянных периодических инспекций летной годности всего парка ВС российской авиационной администрацией с ее ограниченным кадровым составом невозможно, и этот вопрос был отдан на откуп частным коммерческим предприятиям, имеющим статус сертификационных центров (СЦ).

В принципе, это соответствует принятой мировой практике. Для Авиационной администрации ГА Бермудских островов, в реестре которых состояла еще в начале этого года львиная доля парка коммерческих воздушных перевозчиков России, такие работы выполняются частной компанией «Бюро Веритас».

Но в условиях, когда в ФАП отсутствуют четко сформулированные требования к летной годности ВС, определенные хотя бы на уровне минимальных требований стандартов ИКАО, тем более отсутствуют требования к деятельности отечественных СЦ и к квалификации их персонала. В результате работники СЦ зачастую не знают английского языка, состав эксплуатационной документации инспектируемых ВС и особенности процедур ПЛГ. В результате деятельность таких СЦ, как правило, сводится к оформлению всей необходимой для выдачи СЛГ документации еще до момента физической инспекции ВС, а зачастую – и вместо этой инспекции.

Поскольку вышеописанные проблемы с проведением инспекций летной годности ВС не являются секретом ни для менеджмента авиакомпаний, ни для частных владельцев ВС, ни для российской авиационной администрации, то отношение к СЛГ как к пустой фикции сформировалось и у новых поколений авиаторов. Ведущаяся сейчас вокруг вопроса оформления СЛГ общественная дискуссия сводится к требованиям полной отмены выполнения периодических инспекций летной годности и выдаче бессрочного СЛГ, действительного при любых условиях. Таким образом, весь мировой опыт ГА и требования стандартов ИКАО оказываются невосприимчивыми в нашем отечестве.

Наиболее ярко результаты грубого пренебрежения к требованиям по ПЛГ проявляются в российской АОН. Как было сказано выше, в этой сфере деятельности ГА вопросы адекватности требований ФАП стоят особенно остро. Пока что коммерческих воздушных перевозчиков спасает то, что на регулярные линии выходят либо самолеты старых отечественных типов, процедуры эксплуатации которых были отлажены еще при МГА, либо самолеты иностранного производства, состоявшие еще вчера в Государственных реестрах иностранных государств, и за чьей летной годностью, определяемой в соответствии со стандартами ИКАО, наблюдали квалифицированные и знающие иностранные языки специалисты.

Не приводя статистики по безопасности полетов АОН, не касаясь вопиющих случаев эксплуатации без СЛГ и подачи плана полетов, хотелось бы напомнить о нескольких случаях, когда комиссия по расследованию четко и недвусмысленно констатировала причинно-следственную связь между фактом авиационного происшествия и нарушениями в ПЛГ ВС.

Катастрофа ЕЭВС С-182ТД RA-1018G. Дата АП: 29.11.2009. Количество погибших: 1 [7].

Из выводов Комиссии по расследованию АП:

«Катастрофа самолета ЕЭВС С-182ТД RA-1018G произошла при выполнении вынужденной посадки с отказавшим двигателем на проезжую часть городской улицы.

Отказ двигателя явился следствием его неквалифицированного технического обслуживания (ТО), что, при замене масла в двигателе, привело к неправильной установке уплотнительного кольца крышки масляного фильтра, передавливанию уплотнительного кольца, утечке масла, масляному голоданию и заклиниванию двигателя.

Способствующими факторами, наиболее вероятно, явились:

- допуск к эксплуатации серийного ВС в качестве единичного экземпляра, что привело, в том числе, к технической эксплуатации имеющего сертификат типа двигателя специалистами

без прохождения соответствующего обучения, получения допуска и наличия требуемой документации...».

Катастрофа вертолета AS-355N RA-04109. Дата АП: 20.01.2011. Количество погибших: 1 [8].

Из выводов Комиссии по расследованию АП:

«Причиной авиационного происшествия с вертолетом AS-355N RA-04109 стала потеря КВС пространственной ориентировки при полете в условиях ограниченной видимости и “белизны” подстилающей поверхности (отсутствие контрастности, видимости естественного горизонта и удаленных ориентиров), не позволяющих продолжить полет по ПВП, что привело к неконтролируемому снижению с креном и столкновению вертолета с покрытой льдом поверхностью озера.

Способствующими факторами стали допущенные нарушения правил полетов:

- несоблюдение требований сертификата типа в части приборного оборудования (замена приборов, отградуированных в футах, на метрические)...».

Катастрофа ЕЭВС СКС-1-01 RA-0594G. Дата АП: 13.06.2015. Количество погибших: 2 [9].

Из выводов Комиссии по расследованию АП:

«Катастрофа самолета ЕЭВС СКС-1-01 RA-0594G произошла в результате его разрушения в воздухе.

Авиационное происшествие (разрушение самолета в воздухе) явилось следствием потери устойчивости лонжерона крыла вследствие его недостаточной прочности.

Недостаточный запас прочности был обусловлен ошибками при проектировании самолета (расчет на потерю устойчивости лонжерона крыла не был выполнен, либо выполнен некачественно), которые не были выявлены при сертификации ЕЭВС».

Катастрофа ЕЭВС F-28 RA-2348G. Дата АП: 24.02.2016. Количество погибших: 1 [10]

Из выводов Комиссии по расследованию АП:

«Наиболее вероятной причиной авиационного происшествия с ЕЭВС вертолетом F-28 RA-2348G явилось использование КВС в полете рукоятки управления составом топливной смеси, приведшее к ее обеднению, что в сочетании с возможным попаданием воды от растаявшего льда, находящегося в левом топливном баке, привело к дальнейшему обеднению топливной смеси и самовыключению двигателя в полете в процессе маневрирования на высоте менее 60 м.

Наиболее вероятными способствующими факторами явились:

- недостатки в сертификации ЕЭВС. В процессе сертификации не были выявлены недостатки эксплуатационно-технической документации ЕЭВС, выразившиеся в неполном описании топливной системы и определении порядка слива отстоя топлива.

Также в эксплуатационно-технической документации не был оговорен порядок использования рукоятки управления составом топливной смеси...».

Катастрофа ЕЭВС «Кенди» RA-2118G. Дата АП: 03.05.2016. Количество погибших: 3 [11].

Из выводов Комиссии по расследованию АП:

«Причиной АП с ЕЭВС вертолет «Кенди» RA-2118G явилась потеря оборотов несущего винта (НВ) и последующее интенсивное снижение ВС, приведшее к ускоренному малоцикло-вому разрушению наконечников тяг поворота лопастей в полете, в процессе развития явления известного как “тюльпан” НВ.

Наиболее вероятно, потеря оборотов НВ связана с потерей мощности двигателя LYCOMING O-540-F1B5 (заводской номер L-25601-40A), произошедшей из-за ненадлежащего ТО, по причинам невыполнения рекомендованного производителем двигателя капитального ремонта через 12 лет эксплуатации и отсутствия его периодического ТО (в течение года до АП), что явилось следствием получения ЕЭВС вертолет «Кенди» RA-2118G сертификата летной годности с согласованным РТО, позволявшим эксплуатацию ВС по состоянию (без учета требований и рекомендаций производителя ВС и двигателя по периодическому обслуживанию и ремонту)».

Счет человеческим жертвам из-за несовершенства системы ПЛГ давно открыт. Коренная реформа системы ПЛГ ВС в российской ГА, ввод в действие соответствующих стандартам ИКАО и лучшим мировым практикам ФАП давно назрели и перезрели. И в условиях введения незаконных ограничительных мер в отношении ГА России эта проблема становится вдвойне актуальной, поскольку теперь весь объем авиационных перевозок осуществляется только ВС, зарегистрированными в Государственном реестре ГВС Российской Федерации, и все проблемы ПЛГ теперь лежат на российской авиационной администрации. Кроме того, отсутствие технической поддержки со стороны разработчиков ВС выдвигает перед российской ГА дополнительные вызовы. Задача всей ГА России – успеть исправить ситуацию до первой тяжелой катастрофы при коммерческих воздушных перевозках.

Заключение

Проанализированы системы ПЛГ, применяемые в ГА России, США и Европы, а также ранее применявшиеся в советской ГА. Выявлены, определены и показаны существенные отличия между ними, обусловленные объективными, исторически сложившимися причинами. Научно обоснована необходимость проведения коренной реформы системы ПЛГ ГВС, коренной переработки существующих ФАП в области ПЛГ, сделав, наконец, исполнение требований ДЛГ обязательным для эксплуатантов и владельцев ВС, установив разумные, основанные на стандартах ИКАО требования к периодической выдаче СЛГ на основании необходимых объемов проверок, выполняемых квалифицированными экспертами.

Список источников

1. Совершенствование системы обеспечения безопасной эксплуатации воздушных судов. Москва: Воздушный транспорт, 2006. 270 с.
2. Воздушный кодекс Российской Федерации от 19.03.1997 № 60-ФЗ.
3. Конвенция о международной гражданской авиации. Дос 7300/9. Девятое издание. 2006. ИКАО. 114 с.
4. Приложение 8 к Конвенции о международной гражданской авиации. Летная годность воздушных судов. Двенадцатое издание. 2018. ИКАО. 268 с.
5. Руководство по летной годности. Дос 9760. Четвертое издание. 2020. ИКАО. 468 с.
6. Руководство по процедурам эксплуатационной инспекции, сертификации и постоянного надзора. Дос 8335. Пятое издание. 2010. ИКАО. 198 с.
7. Окончательный отчет по результатам расследования авиационного происшествия. С-182ТД RA-1018G. Межгосударственный авиационный комитет; 2010. 71 с.
8. Окончательный отчет по результатам расследования авиационного происшествия. AS355N RA-04109. Межгосударственный авиационный комитет; 2011. 43 с.
9. Окончательный отчет по результатам расследования авиационного происшествия. СКС-1-01 RA-0594G. Межгосударственный авиационный комитет; 2016. 56 с.
10. Окончательный отчет по результатам расследования авиационного происшествия. F-28 RA-2348G. Межгосударственный авиационный комитет; 2017. 38 с.
11. Окончательный отчет по результатам расследования авиационного происшествия. «Кенди» RA-2118G. Межгосударственный авиационный комитет; 2018. 40 с.

References

1. Improvement of the system for ensuring the safe operation of aircraft. Moscow, Vozdushnyj transport publ., 2006, 270 p. (In Russ.)

2. Aviation Code of the Russian Federation, 19.03.1997 № 60-FZ. (In Russ.)
3. Doc7300/9. Convention on International Civil Aviation. Ninth edition, 2006, International Civil Aviation Organization, 114 p.
4. Annex 8 to the Convention on International Civil Aviation. Twelfth Edition, 2018, International Civil Aviation Organization, 268 p.
5. Doc 9760. Airworthiness Manual. Fourth Edition, 2020, International Civil Aviation Organization, 468 p.
6. Doc 8335. Manual of Procedures for Operations Inspection, Certification and Continued Surveillance. Fifth Edition, 2010, International Civil Aviation Organization, 198 p.
7. Final report of the results of the air accident investigation. S-182TD RA-1018G, The Interstate Aviation Committee, 2010, 71 p. (In Russ.)
8. Final report of the results of the air accident investigation. AS355N RA-04109, The Interstate Aviation Committee, 2011, 43 p. (In Russ.)
9. Final report of the results of the air accident investigation. SKS-1-01 RA-0594G, The Interstate Aviation Committee, 2016, 56 p. (In Russ.)
10. Final report of the results of the air accident investigation. F-28 RA-2348G, The Interstate Aviation Committee, 2017, 38 p. (In Russ.)
11. Final report of the results of the air accident investigation. “Candy” RA-2118G, The Interstate Aviation Committee, 2018, 40 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Акопян Карен Эдуардович, кандидат технических наук, заместитель генерального директора, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, akopyan_ke@ncplg.ru

Цихотский Алексей Феликсович, заместитель директора сертификационного центра «Летная годности», Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, tzihotzkiy_af@ncplg.ru

Authors information

Akopyan Karen E., Candidate Science (Engineering), Deputy General Director, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, akopyan_ke@ncplg.ru

Tsikhotskiy Alexey F., Deputy Director of Certification centre “Airworthiness”, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, tzihotzkiy_af@ncplg.ru

Статья поступила в редакцию 28.07.2022; одобрена после рецензирования 10.10.2022; принята к публикации 18.10.2022.

The article was submitted 28.07.2022; approved after reviewing 10.10.2022; accepted for publication 18.10.2022.

Научная статья
УДК 629.735.45

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ КОРПУСА ВТУЛКИ РУЛЕВОГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА ПРИ СТЕНДОВЫХ ИСПЫТАНИЯХ

А. И. ЛОСЕВ¹, Ю. А. ПОТАПЕНКО¹, Д. В. НЕДЕЛЬКО²

¹ Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

² Казанский вертолетный завод, Казань, Россия

Аннотация. В процессе проведения периодических прочностных и ресурсных стендовых испытаний на усталость рулевых винтов многоцелевого вертолётной транспортной категории произошло разрушение корпуса втулки рулевого винта. Испытания проводились по программе нагружения рулевого винта переменным изгибающим моментом, действующим в плоскости тяги, и постоянной осевой растягивающей силой, имитирующей условия работы рулевого винта в эксплуатации. Разрушения произошли по дальним (от оси вращения) отверстиям крепления к корпусу каждой из двух лопастей. В статье приводятся результаты исследования причины разрушения корпуса втулки при стендовых испытаниях. На основе фрактографического анализа, выполненного как на макроуровне с использованием оптического микроскопа, так и на микроуровне с использованием электронного сканирующего микроскопа, установлен малоцикловый усталостный характер данного разрушения. Показано, что первоначальное зарождение разрушения инициировано фреттинг-коррозионными повреждениями поверхностного слоя корпуса втулки рулевого винта у отверстия в зоне контакта с фланцем стальной втулки под болт крепления лопасти. Отклонений в изготовлении корпуса втулки рулевого винта по результатам металлографических исследований, микрорентгеноспектрального анализа и измерения твердости материала не выявлено. Разрушение корпуса втулки зафиксировано при наработке, превышающей зачетную для установленного на данный момент ресурса рулевого винта. При внедрении мероприятий, направленных на исключение повреждения корпуса втулки фреттинг-коррозией возможно увеличение его назначенного ресурса.

Ключевые слова: усталость, трещина, разрушение, фреттинг-коррозия, усталостная бороздка, длительность разрушения

Для цитирования: Лосев А. И., Потапенко Ю. А., Неделько Д. В. Результаты исследования причин разрушения корпуса втулки рулевого винта вертолета при стендовых испытаниях // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 40. С. 20–30.

THE RESEARCH RESULTS OF THE TAIL ROTOR HOUSING SLEEVE STRUCTURAL FRACTURE CAUSE DURING BENCH TESTS OF THE HELICOPTER

A. I. LOSEV¹, YU. A. POTAPENKO¹, D. V. NEDELKO²

¹ The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia

² Kazan Helicopters, Kazan, Russia

Abstract. In the process of conducting the periodic structural and endurance bench tests for fatigue multi-purpose helicopter of the transport category tail rotor the housing sleeve of the tail rotor has experienced

failure. The testing program included loading of the tail rotor by a variable bending moment, applied in the thrust vectoring, and constant axial tensile load that imitates a tail rotor performance in service. The fracture has occurred at the far end (from the rotation axis) mounting holes of each of two blades to the housing sleeve. The article provides the research results of the housing sleeve fracture during the bench tests. Based on the fractographic analysis carried out on the macrolevel using the optical microscope as well as on the microlevel using the scanning electronic microscope it has been established that this fracture has the low-cycle fatigue nature. It was discovered that the initial fracture is initiated by the fretting corrosion damage of the rotor tail housing sleeve surface layer at the hole near contact zone with the steel hub flange for the blade mounting bolt. The research results based on the metallographic study, X-ray microanalysis and material hardness measurements didn't reveal any deviations in the tail rotor housing sleeve manufacturing. The tail rotor housing sleeve fracture was discovered at the time which exceeds the established tail rotor service life. Implementation of steps for housing sleeve fretting corrosion elimination can increase its assigned service life.

Keywords: fatigue, crack, fracture, fretting corrosion, fatigue groove, duration of destruction

For citation: Losev A. I., Potapenko Yu. A., Nedelko D. V., The research results of the tail rotor housing sleeve structural fracture cause during bench tests of the helicopter, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 40, pp. 20–30. (In Russ.)

Введение

Для контроля качества серийной продукции, контроля стабильности технологического процесса и подтверждения соответствия усталостной долговечности изготавливаемых агрегатов установленному назначенному ресурсу по условиям усталости в соответствии с ГОСТ 15.309-98¹ проводятся периодические заводские испытания. Применительно к втулкам рулевых винтов (РВ) вертолетов такие стендовые испытания проводятся по общепринятой стандартизированной процедуре в соответствии с оформленной программой стендовых усталостных испытаний.

В соответствии с программой усталостные испытания втулок рулевых винтов (РВ) в плоскости тяги проводятся на резонансном стенде при нагружении переменным изгибающим моментом M_v в плоскости тяги и постоянной осевой растягивающей силой $N_{цб}$.

Испытания ведутся последовательно на двух режимах нагружения. На первом режиме переменный изгибающий момент в контрольном сечении составляет $M_v = \pm 8,5$ кгс·м; на втором – $M_v = \pm 10,5$ кгс·м. Постоянная осевая растягивающая сила на обоих режимах составляет $N_{цб} = 8500$ кгс. Частота изменения переменной нагрузки $f = (21 \pm 5)$ Гц.

При отсутствии разрушения на первом режиме при наработке $N = 20 \cdot 10^6$ циклов испытания продолжают на втором режиме. Испытания заканчиваются при наработке на втором режиме $N = 60 \cdot 10^6$ циклов без разрушения.

При проведении испытаний разрушение РВ произошло при зачетной наработке:

- $20,01 \cdot 10^6$ циклов первого режима нагружения;
- $72,59 \cdot 10^6$ циклов второго режима нагружения.

Разрушение РВ в процессе испытаний заключалось в разрушении корпуса его втулки.

Постановка задачи

Ранее при проведении аналогичных ресурсных стендовых испытаний РВ вертолета разрушений не отмечалось. Разрушение произошло по зачетному месту, в связи с чем потребовалось провести комплекс исследований для установления характера, длительности и причины

¹ ГОСТ 15.309-98. Система разработки и постановки продукции на производство. Испытания и приемка выпускаемой продукции. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2010, 15 с.

разрушения корпуса ВРВ. Для дополнительных исследований корпус ВРВ, разрушенный при стендовых испытаниях, был направлен в НЦ ПЛГВС ГосНИИ ГА.

Методы исследования

Для установления характера, длительности и причины разрушения корпуса ВРВ вертолета выполнен комплекс исследований, включающий в себя следующие работы:

- оценку технического состояния фрагментов корпусов ВРВ;
- изучение изломов и состояния поверхностей в зоне отверстий корпусов ВРВ на бинокулярном микроскопе при увеличениях от 3- до 90-кратных;
- фрактографическое исследование изломов и изучение состояния поверхностей в зоне отверстий корпусов ВРВ с применением электронного сканирующего микроскопа типа TESCAN VEGA4 LMU;
- измерение твердости материала корпусов ВРВ с переводом в значения временного сопротивления разрыву σ_b ;
- металлографическое исследование материала корпусов ВРВ, с определением в том числе микроструктуры и наличия пережогов;
- микрорентгеноспектральный анализ материала корпусов ВРВ;
- обобщение полученных результатов.

Материалы исследования

Конструктивная схема корпуса ВРВ вертолета в зоне крепления лопастей показана на рис. 1. Для крепления лопастей ВРВ в проушинах корпуса втулки имеется по два отверстия с каждой стороны, расположенные вдоль продольной оси втулки. Под болты крепления лопастей в отверстиях (Ø19Н7) проушин установлены стальные втулки, имеющие с внутренней стороны проушины упорный буртик. Перед установкой стальных втулок отверстия Ø19Н7 в проушинах упрочняются стальными шариками. Стальные втулки устанавливаются на сырой грунтовке ФЛ-086. Наружные поверхности корпуса обрабатываются стеклянными микрошариками. Корпус ВРВ изготавливается из алюминиевого сплава АК-6Т1.

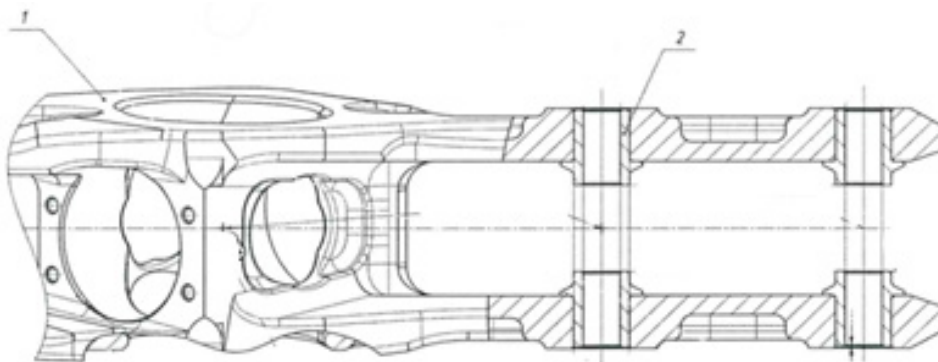


Рис. 1. Конструктивная схема корпуса втулки рулевого винта вертолета в зоне крепления лопастей:
1 – корпус; 2 – стальная втулка

Разрушение корпуса произошло по двум дальним от оси вращения ВРВ отверстиям под болты крепления лопастей. При этом одно отверстие (условный № 4) расположено на нижней проушине, второе (условный № 5) – на верхней, если рассматривать положение втулки при испытании на стенде. Условная нумерация отверстий нанесена на заводе-изготовителе. Стальные втулки, имевшиеся в отверстиях 4 и 5, были демонтированы для оценки состояния сопрягаемых деталей.

Вид разрушений у отверстий 4 и 5 корпуса ВРВ показан на рис. 2.

На внутренних поверхностях проушин вокруг каждого из отверстий в зоне контакта с упорными торцами стальных втулок имеются фреттинг-коррозионные повреждения, которые располагаются не по всей окружности контакта, а только в секторе у ближней к оси вращения втулки РВ стороне отверстия, то есть в зонах наименьшей податливости проушин под действием переменного изгибающего момента в плоскости тяги.

Разрушение проушины корпуса ВРВ в зоне отверстия 4 произошло по трем сечениям (рис. 2а). Причем по одной из перемычек, где развивались две трещины, произошло их слияние, в результате чего фрагмент перемычки между трещинами отделился. На исследование данный фрагмент не поступил, но имеющиеся ответные части изломов позволили выполнить их фрактографическое исследование.

Изучение изломов разрушенных проушин в зоне отверстий 4 и 5 на бинокулярном микроскопе показало, что все они имеют усталостный характер, но имеют свои отличительные особенности. Исследование изломов проводилось в соответствии с принципами, изложенными в [1–4].

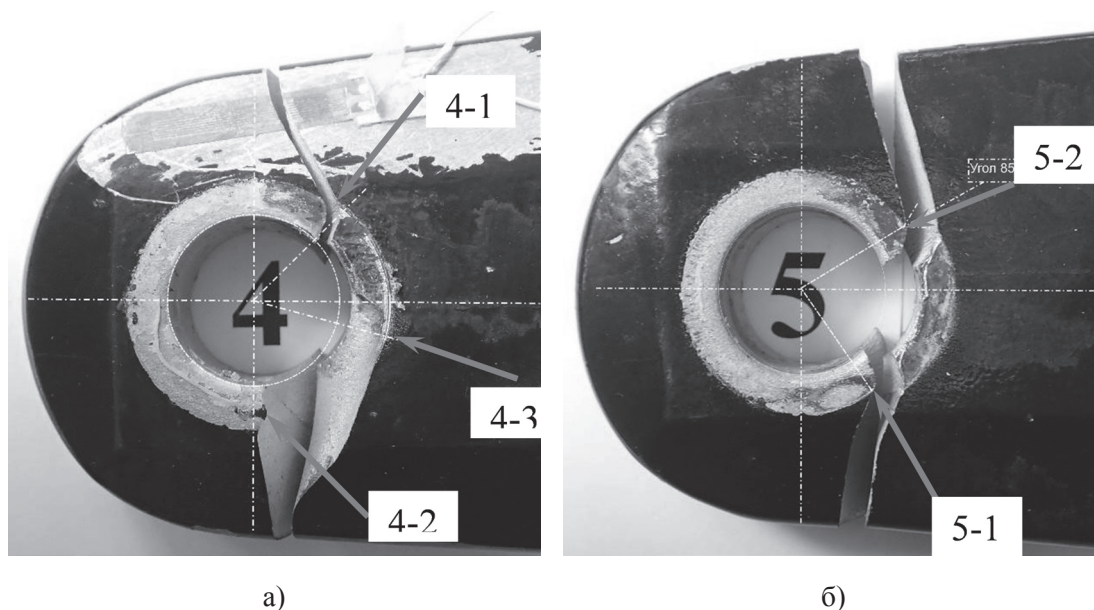


Рис. 2. Состояние внутренних поверхностей проушин в зоне разрушения у отверстий 4 (а) и 5 (б) корпуса втулки (x1,1). Стрелками с условными номерами указаны очаги усталости по сечениям разрушений

Разрушение по сечению 4-1 (здесь и далее сечения разрушений обозначены номером отверстия и порядковым номером трещины) началось с внутренней поверхности проушины от границы фреттинг-коррозионного повреждения [5, 6], возникшего от контакта проушины с фланцем стальной втулки (рис. 2а). Очаг разрушения расположен в сечении, лежащем под углом $\approx 45^\circ$ к продольной оси корпуса (рис. 2а). От очага трещина распространялась под углом $\approx 60^\circ$ к поверхности проушины в сторону сечения проушины, перпендикулярного продольной оси корпуса и проходящего через ось отверстия (наиболее напряженное сечение проушины в исходном состоянии). После развития трещины в глубину примерно на 7 мм от поверхности она развернулась на угол $\approx 60^\circ$, но уже в противоположную сторону. Несмотря на указанные особенности развития трещины, генеральное направление разрушения происходило от внутренней стороны проушины к внешней. После выхода трещины на противоположную (внешнюю) сторону проушины произошел ее долом. Площадь зоны долома составляет $\approx 7\%$ от общей площади излома. Причем фронт трещины при доломе был ориентирован к внешней поверхности проушины под некоторым углом с видимым разворотом в сторону отверстия 4 (рис. 3а).

Разрушение 4-2 по второй перемычке отверстия (рис. 2а) произошло по сечению, перпендикулярному продольной оси корпуса и проходящему через ось отверстия. Очаговая зона данной трещины в отличие от очага трещины 4-1 располагается не на внутренней поверхности проушины, а на поверхности отверстия на небольшом удалении от поверхности проушины (рис 3а). Усталостное разрушение началось от нескольких очагов. Об этом свидетельствуют имеющаяся в очаговой зоне ступенька, образовавшаяся в результате слияния двух самостоятельных трещин, и сохранившийся фрагмент одной из слившихся трещин, проросшей под другую трещину. В изломе наблюдаются усталостные макролинии, отвечающие положению фронта трещины по мере ее развития и указывающие, что в начале разрушение шло от отверстия в диаметральной направлении к боковой поверхности проушины с опережающим ростом угловой трещины вдоль образующей отверстия так, что при глубине трещины $\approx 5,8$ мм ее ширина составляла $\approx 10,5$ мм. Однако далее трещина постепенно переориентировалась по направлению к наружной поверхности проушины и к оси вращения ВРВ. В срединных по толщине слоях проушины трещина 4-2 постепенно развернулась аналогично трещине 4-1. При приближении трещины 4-2 к наружной поверхности проушины произошел ее долом. Площадь долома составляет ≈ 19 % от общей площади излома, а фронт трещины при доломе был ориентирован как и фронт трещины 4-1.

Ориентация фронтов трещин 4-1 и 4-2 при доломе указывает на то, что трещина 4-1 была первичной по отношению к трещине 4-2, и к моменту долома трещины 4-1 трещина 4-2, если уже и развивалась, то еще не достигла критических размеров.

Трещина 4-3 развивалась в той же перемычке, что и трещина 4-2, и эти трещины развивались практически одновременно (см. рис. 2а). В противном случае при существенном лидерстве в размерах одной из них пропадают условия для роста другой из-за разгрузки объемов материала

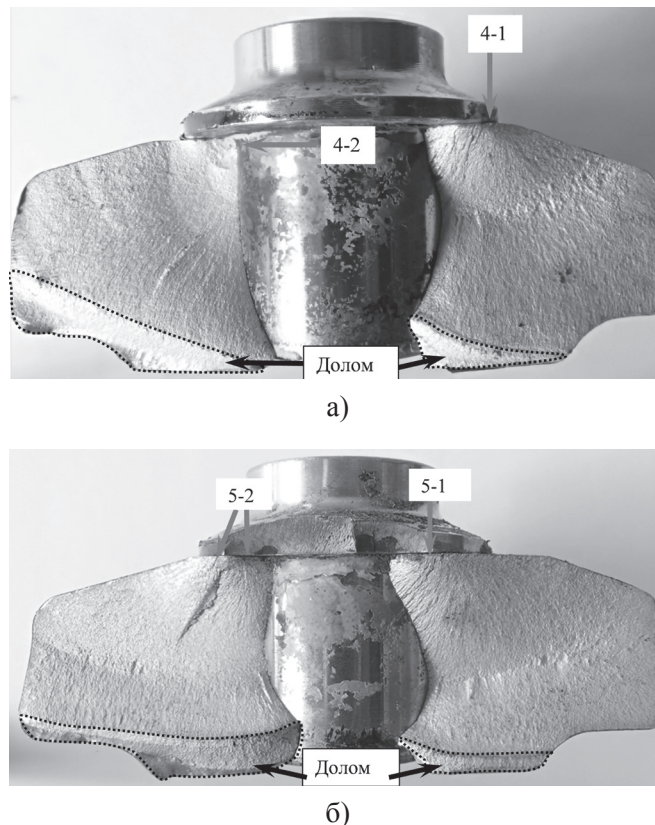


Рис. 3. Общие виды разрушений у отверстий 4 (а) и 5 (б) корпуса втулки РВ (х2). Стрелками указаны очаги трещин и направление развития усталости в очаговой зоне. Зоны долома очерчены пунктирной линией

проушины, затененных лидирующей трещиной. При этом трещина 4-3 имеет несколько очагов, расположенных на внутренней поверхности проушины в зоне фреттинг-коррозионного повреждения, как это имело место у трещины 4-1. Сечение расположения очагов трещины 4-3 лежит под углом $\approx (15-20)^\circ$ к продольной оси корпуса (рис. 2а). Как и в случае трещины 4-1, развитие трещины 4-3 происходило под углом $\approx 60^\circ$ к поверхности проушины в сторону наиболее напряженного сечения проушины (перпендикулярном к продольной оси корпуса и проходящем через ось отверстия). При длине в глубину ≈ 15 мм эта трещина слилась с трещиной 4-2.

Разрушение проушины корпуса в зоне отверстия 5 произошло по двум сечениям (рис. 2б). Разрушения по обоим сечениям имеют усталостный характер и инициированы фреттинг-коррозионными повреждениями на внутренней поверхности проушины в зоне контакта с торцом стальной втулки. Очаги трещин 5-1 и 5-2 лежат в сечениях, расположенных с разных сторон от продольной оси корпуса под углами $\approx 30^\circ$ и $\approx 55^\circ$ к ней. Очаг трещины 5-1 макроскопически сосредоточенный, а имеющаяся в очаговой зоне трещины 5-2 ступенька указывает на наличие как минимум двух самостоятельных очагов (рис. 3б). В целом особенности строения изломов трещин 5-1 и 5-2, в том числе и по траектории развития в теле проушины, повторяют особенности строения изломов трещин 4-1 и 4-3, описанные ранее.

Однако в отличие от трещин 4-1 и 4-3 при доломах трещин 5-1 и 5-2 их фронты были практически параллельны наружной поверхности проушин, что указывает на их долом при чистом изгибе в одной плоскости (в плоскости тяги). Площади зон долома составляют у трещин 5-1 и 5-2 соответственно $\approx 4\%$ и $\approx 16\%$ и практически равны зонам долома разрушения по отверстию 4. Это говорит о примерном равенстве напряженности проушин с отверстиями 4 и 5, как минимум на момент долома.

Для детального анализа очагов и характера разрушений было выполнено фрактографическое исследование основных изломов с применением микроскопа типа TESCAN VEGA4 LMU. При микроанализе установлено, что трещина 4-1 зародилась от нескольких локально расположенных очагов с поверхности проушины, поврежденной фреттинг-коррозией, как это отмечено при макроанализе. Уже в непосредственной близости от очагов на изломе наблюдаются усталостные бороздки с шагом примерно $0,27$ мкм. Разрушение материала с формированием усталостных бороздок соответствует малоцикловой области разрушения [7–9]. Бороздки наблюдаются на протяжении всей зоны стабильного роста трещины вплоть до долома. Исследование поверхности проушины в зоне контакта со стальной втулкой подтвердило, что она имеет повреждения в виде отслоений перенаклепанного материала и микрорастрескиваний в непосредственной близости от очага.

Трещина 4-2 зародилась также от нескольких очагов, но с цилиндрической поверхности отверстия под стальную втулку. Очаги лежат на некотором удалении друг от друга, то есть не столь локально, как у трещины 4-1. Поверхность отверстия под стальную втулку в зоне очагов трещины 4-2 имеет множественные растрескивания материала, некоторые из которых и послужили очагами зарождения усталостных трещин (рис. 4). Здесь же имеются отдельные пятна повреждения поверхности фреттинг-коррозией. В изломе трещины 4-2, также уже в непосредственной близости от очагов, наблюдаются усталостные бороздки с шагом около $0,3$ мкм, указывающие на малоцикловый характер усталостной трещины.

Трещина 5-1 зародилась от локального очага на поверхности проушины в зоне фреттинг-коррозионного повреждения материала. Развитие трещины сопровождалось формированием уже вблизи очага усталостных бороздок, шаг которых по мере развития трещины практически не изменяется и составлял $(0,15-0,3)$ мкм.

Механизм, процесс и принципы формирования усталостных бороздок в материалах изложены в работах [1, 2, 4, 7–9]. Подходы к определению скорости развития разрушения на основе измерения шага усталостных бороздок приведены в работах [2, 10]. Определение размера (шага) усталостных бороздок по длине исследованных трещин и расчет длительности развития этих

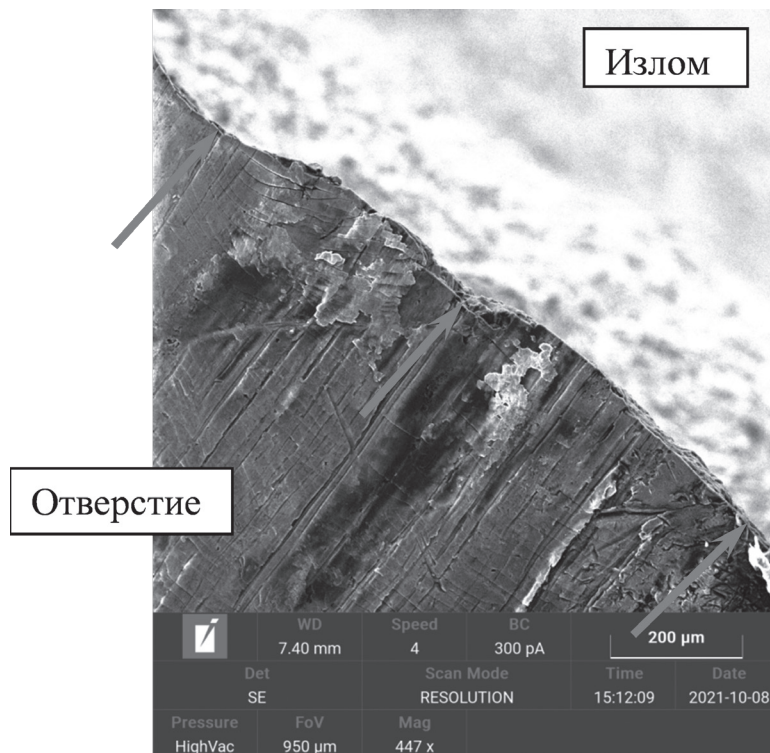


Рис. 4. Вид множественных растрескиваний материала цилиндрической поверхности отверстия в зоне очага трещины 4-2. Некоторые растрескивания (указаны стрелками) являются очагами усталостных трещин

трещин выполнены в соответствии с подходами, изложенными в указанных работах. Полученные результаты в графическом виде представлены на рис. 5.

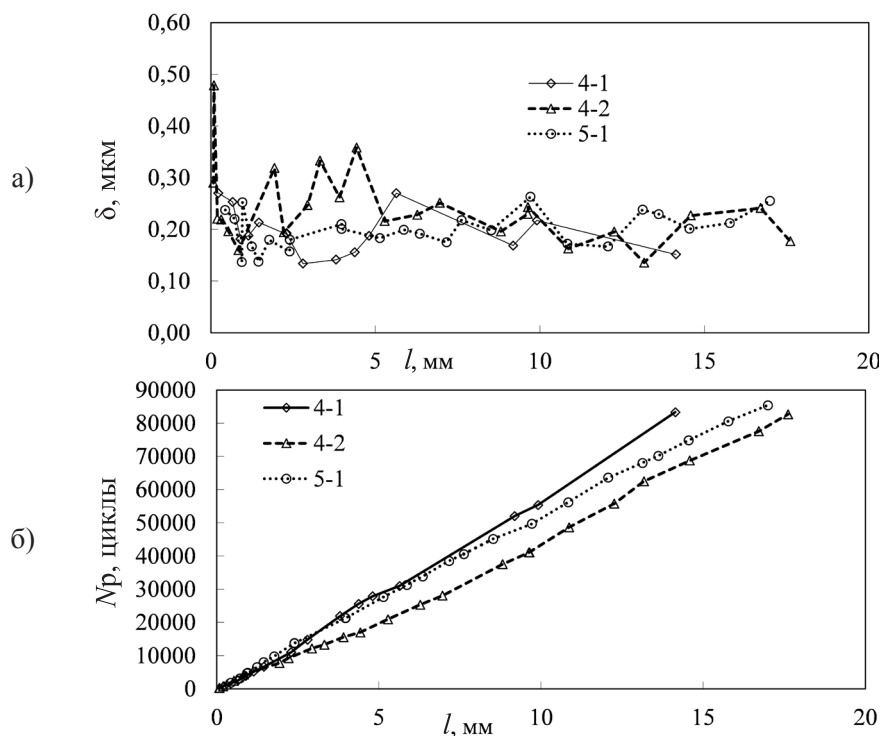


Рис. 5. Зависимости шага δ усталостных бороздок (а) и длительности N_p развития разрушения (б) от длины усталостных трещин l

Длительность развития трещин составила:

- трещины 4-1 до длины $l \approx 15,7$ мм (с учетом кривизны излома) примерно 82900 циклов при средней скорости 0,19 мкм/цикл;
- трещина 4-2 до $l \approx 17,6$ мм примерно 82700 циклов при средней скорости 0,213 мкм/цикл;
- трещина 5-1 до $l \approx 17,0$ мм примерно 85400 циклов при средней скорости 0,199 мкм/цикл.

Кинетика развития трещин 4-1 и 5-1 практически одинакова (рис. 5) и характеризуется фактически постоянной скоростью трещин по их длине на уровне в среднем 0,2 мкм/цикл. Большая скорость развития трещины 4-2 в пределах первых 5 мм объясняется ее зарождением от поверхности отверстий в более напряженном сечении проушины, чем трещины 4-1 и 5-1 и развитием в начале не по толщине проушин, а в направлении от отверстий.

Качество изготовления корпуса BPB оценено по результатам комплекса металлофизических исследований. Микроструктура материала корпуса втулки как вблизи поверхности, так и в сердцевине состоит из твердого раствора легирующих элементов (меди, кремния, магния, марганца, а также примесей железа и цинка) в алюминии и включений упрочняющей фазы, соответствующей термообработанному алюминиевому сплаву АК6. Характерных признаков пережога материала не выявлено. Твердость (по Бринеллю) материала корпуса втулки составляет 125HB_{2,5/62,5/30}, что соответствует требованиям чертежа на изготовление (по ТУ HB ≥ 100 кгс/мм²). Выполненный микрорентгено-спектральный анализ с применением энергодисперсионной приставки Oxford на микроскопе типа TESCAN VEGA4 LMU подтвердил соответствие по основным химическим элементам материала корпуса BPB сплаву АК6, требуемому ТУ чертежа. По результатам выполненных работ отклонений в изготовлении материала корпуса не выявлено.

Анализ и обобщение

Установлено, что разрушения проушин корпуса BPB произошли у дальних от оси вращения отверстий Ø19Н7 под стальные втулки для болтов крепления лопастей. Так как отверстия 4 и 5 располагаются на противоположных проушинах крепления двух разных лопастей РВ, то по условиям нагружения втулки при стендовых испытаниях развитие разрушений в них происходило самостоятельно и независимо друг от друга. У обоих отверстий первоначально разрушение развивалось по сечениям 4-1 и 5-1 соответственно. Данные разрушения имеют малоцикловый усталостный характер и инициированы фреттинг-коррозионными повреждениями в зоне отверстия боковой внутренней поверхности каждой проушины в результате контакта с упорным торцом стальной втулки, которая устанавливается в отверстие. В обоих случаях разрушение многоочаговое, но очаги расположены компактно, на небольшом удалении друг от друга по границе поврежденного и неповрежденного материала. Фреттинг-коррозионные повреждения располагаются не по всей окружности контакта, а только в секторе у ближней к оси вращения BPB стороне отверстий. У проушин, работающих в паре с проушинами отверстий 4 и 5, также имеются аналогичные повреждения фреттинг-коррозией, но меньшей степени. В зоне отверстий (Ø19Н7) первого ряда болтов крепления лопастей, расположенных ближе к оси вращения BPB, фреттинг-коррозионные повреждения отсутствуют.

Зарождение разрушений (4-1 и 5-1) произошло не в зоне максимальных напряжений. Наиболее нагруженным является сечение, перпендикулярное продольной оси корпуса и проходящее через центр отверстия, поэтому по мере удаления от концентратора напряжений в виде фреттинг-коррозии трещина, отслеживая поле действующих в материале напряжений, смещалась к центру отверстия, где напряжения от действующих нагрузок максимальны.

По мере развития трещин (4-1 и 5-1) и уменьшения несущего сечения соответствующих перемычек происходило перераспределение действующих нагрузок на оставшиеся сечения у каждого из отверстий, вызывая дополнительное нагружение второй перемычки отверстия. В результате этого с небольшой задержкой от аналогичных повреждений фреттинг-коррозией

отверстий (4 и 5) зародились усталостные трещины 4-3 и 5-2. В обоих случаях усталостное разрушение многоочаговое, с расположением очагов на значительном удалении друг от друга и непосредственно в зоне повреждения фреттингом, что также указывает на вторичность данных разрушений. При этом практически параллельно с трещиной 4-3 от нескольких очагов, расположенных на цилиндрической поверхности отверстия ($\varnothing 19H7$), зародилась усталостная трещина 4-2. Такое параллельное развитие трещин 4-2 и 4-3 происходило до тех пор, пока они не слились в одну. Очаги трещины 4-2 представляют собой микрорастрескивания цилиндрической поверхности отверстия ($\varnothing 19H7$). При этом параллельно разрушению 4-2 у противоположной стороны отверстия выявлена аналогичная трещина протяженностью около 3 мм, что также указывает на воздействие в данной зоне повышенных нагрузок и подтверждает вторичность данных разрушений. На это также указывают и размеры зон доломов по каждой перемычке (7 % и 19 % у отверстия 4 и 4 % и 16 % у отверстия 5 соответственно). При этом сравнительно небольшие зоны доломов обусловлены перераспределением действующих напряжений на второй болт крепления лопасти и на вторую проушину первого болта.

На исследованных с применением микроскопа типа TESCAN VEGA4 LMU изломах (4-1, 4-2, 5-1), начиная с зоны в непосредственной близости от очага и до долома, наблюдается регулярное формирование усталостных бороздок. Выявленный бороздчатый рельеф изломов характеризует разрушение корпуса ВРВ в области малоциклового усталости. Длительность развития трещин 4-1, 4-2 и 5-1, оцененная по зависимостям шага усталостных бороздок от длины этих трещин, составила соответственно ≈ 82900 циклов (до длины 15,7 мм), ≈ 82700 циклов (до длины 17,6 мм) и ≈ 85400 циклов (до длины 17,0 мм).

Заключение

Разрушения при стендовых испытаниях корпуса ВРВ вертолета имеют усталостный малоциклового характер и обусловлены снижением сопротивления усталости из-за фреттинг-коррозионных повреждений материала внутренней поверхности проушины от контакта с фланцем стальной втулки. Длительность развития первичных трещин по отверстиям 4 и 5 корпуса втулки составила соответственно около 82900 циклов и около 85400 циклов.

Разрушение корпуса втулки зафиксировано при наработке, превышающей зачетную для установленного на данный момент ресурса РВ. То есть испытаниями было подтверждено качество изготовления данных агрегатов заводом-изготовителем. При этом целесообразно разработать и внедрить мероприятия, направленные на исключение повреждения корпуса втулки фреттинг-коррозией, что позволит в дальнейшем увеличить назначенный ресурс ВРВ.

Список источников

1. Броек Д. Основы механики разрушения: Пер. с англ. Москва: Высшая школа, 1980. 368 с.
2. Шанявский А. А. Моделирование усталостных разрушений металлов. Синергетика в авиации. Уфа: ООО «Монография», 2007. 500 с.
3. Фрактография и атлас фрактограмм. Справочное издание / Перевод с англ. Шур Е. А. под ред. Бернштейна М. Л. Москва: Металлургия, 1982. 489 с.
4. Иванова В. С. Разрушение металлов. Москва: Металлургия, 1979. 167 с.
5. Петухов А. Н. Фреттинг-коррозия и фреттинг-усталость в малоподвижных соединениях // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королёва. 2006. Т. 5. № 2, ч. 1. С. 115–120.
6. Панова И. М., Панов А. Д. Анализ надежности соединений с натягом в особых условиях эксплуатации // Интернет-журнал «Наукоедение». 2017. Т. 9. № 4. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/26TVN417.pdf> (дата обращения: 19.09.2022).

7. Шанявский А. А. Масштабные уровни процессов усталости металлов // Физическая мезомеханика. 2014. Т. 17. № 6. С. 87–98.
8. Шанявский А. А. Ротационная неустойчивость деформации и разрушения металлов при распространении усталостных трещин на мезоскопическом масштабном уровне. I. Процессы пластической деформации в вершине трещины // Физическая мезомеханика. 2001. Т. 4. № 1. С. 73–80.
9. Шанявский А. А. Ротационная неустойчивость деформации и разрушения металлов при распространении усталостных трещин на мезоскопическом масштабном уровне. II. Механизмы разрушения // Физическая мезомеханика. 2001. Т. 4. № 1. С. 81–95.
10. Иванова В. С., Шанявский А. А. Количественная фрактография. Усталостное разрушение. Челябинск: Metallurgiya, 1988. 400 с.

References

1. Broek D., *Osnovy mekhaniki razrusheniya [Fundamentals of the mechanics of destruction]*, trans. from English, Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1980, 368 p. (In Russ.)
2. Shanyavsky A. A., *Modelirovanie ustalostnykh razrushenij metallov. Sinergetika v aviatsii [Modeling of metal fatigue failure. Synergetics in aviation]*, Ufa, Monografiya Publ., 2007, 500 p. (In Russ.)
3. Fraktografiya i atlas fraktogramm [Fractography and atlas of fractograms]. Reference edition, trans. from English, Moscow, Metallurgiya Publ., 1982, 489 p. (In Russ.)
4. Ivanova V. S., *Razrushenie metallov [Destruction of metals]*, Moscow, Metallurgiya Publ., 1979, 167 p. (In Russ.)
5. Petukhov A. N., Fretting-corrosion and fretting-fatigue in low-moving jointst, *Vestnik SSAU*, 2006, vol. 5, no. 2-1, pp. 115–120. (In Russ.)
6. Panova I. M., Panov A. D., Reliability analysis of connections with an interference fit in special operating conditions, *Online journal "Naukovedenie"*, 2017, vol. 9, no. 4 (In Russ.), available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/26TVN417.pdf> (accessed: 19.09.2022).
7. Shanyavsky A. A., Scales of the fatigue limit of metals, *Phys Mesomech*, 2015, vol. 18, iss. 2, pp. 163–173. <https://doi.org/10.1134/S1029959915020095>
8. Shanyavsky A. A., Rotational instability of mesoscale deformation and fracture of metals in fatigue crack propagation. I. Plastic deformation at the crack tip, *Phys Mesomech*, 2001, vol. 4, no. 1, pp. 73–80. (In Russ.)
9. Shanyavsky A. A., Rotational instability of mesoscale deformation and fracture of metals in fatigue crack propagation.. II. Mechanisms of fracture, *Phys Mesomech*, 2001, vol. 4, no. 1, pp. 81–95. (In Russ.)
10. Ivanova V. S., Shanyavsky A. A., *Kolichestvennaya fraktografiya. Ustalostnoe razrushenie [Quantitative fractography. Fatigue failure]*, Chelyabinsk, Metallurgiya Publ., 1988, 400 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Лосев Александр Иванович, кандидат технических наук, начальник группы, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, alivlos@mail.ru

Потапенко Юрий Александрович, заместитель начальника отдела, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, potapenko_ua@ncplg.ru

Неделько Дмитрий Валерьевич, доктор технических наук, доцент, заместитель начальника отдела прочности и аэродинамики, Опытнo-конструкторское бюро, Казанский вертолетный завод, Казань, Республика Татарстан, Россия, Nedelko_DV@kazanhelicopters.com

Authors information

Losev Alexandr I., Candidate of Sciences (Engineering), Head of the Group, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, alivlos@mail.ru

Potapenko Yuri A., Deputy Head of the Department, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, potapenko_ua@ncplg.ru

Nedelko Dmitriy V., Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Deputy Head of the Department of Strength and Aerodynamics, Experimental Design Bureau, Kazan Helicopters, Kazan, Republic of Tatarstan, Russia, Nedelko_DV@kazanhelicopters.com

Статья поступила в редакцию 28.07.2022; одобрена после рецензирования 12.09.2022; принята к публикации 20.09.2022.

The article was submitted 28.07.2022; approved after reviewing 12.09.2022; accepted for publication 20.09.2022.

Научная статья
УДК 620.9:662.75

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ НАПРАВЛЕНИЙ СНИЖЕНИЯ ЭМИССИИ ВЕЩЕСТВ, ВЫЗЫВАЮЩИХ ПАРНИКОВЫЙ ЭФФЕКТ, ПОСТУПАЮЩИХ В АТМОСФЕРУ ОТ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

О. Г. МАЛЬЦЕВ, С. И. ПОПЛЕТЕЕВ, В. И. МАРИНИЧЕВ

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы нового важного направления деятельности авиационной отрасли – снижения эмиссии веществ, вызывающих парниковый эффект, поступающих в атмосферу от деятельности гражданской авиации. В статье описаны принципиальные направления такого снижения, которые можно реализовать путем применения новых видов авиатоплив. Представлены известные на сегодня виды альтернативных топлив. Опираясь на международную спецификацию для авиатоплив, содержащих синтезированные компоненты ASTM D 7566 «Стандартные технические условия на авиационное турбинное топливо, содержащее синтезированные углеводороды» (“Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons”), приведены испытанные и допущенные к применению способы получения синтетических топлив, пригодных для использования в гражданской авиации в смешении с традиционными топливами. Приведены трудности, стоящие на пути развития направлений по снижению эмиссии в России в части авиационных горюче-смазочных материалов, а также пути решения этих вопросов с учетом требований спецификации по порядку одобрения новых топлив и присадок ASTM D 4054 «Стандартная практика для определения качества новых авиационных турбинных топлив и топливных присадок» (“Standard Practice for Evaluation of New Aviation Turbine Fuels and Fuel Additives”). Статья рассматривает два пути декарбонизации авиационной отрасли, наиболее реальные на сегодняшний день.

Ключевые слова: авиационное топливо, реактивный двигатель, авиационные горюче-смазочные материалы, риски, парниковый эффект, поддержание летной годности, воздушные перевозки, климат

Для цитирования: Мальцев О. Г., Поплетеев С. И., Мариничев В. И. Исследование перспективных направлений снижения эмиссии веществ, вызывающих парниковый эффект, поступающих в атмосферу от деятельности отечественной гражданской авиации // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 40. С. 31–40.

THE STUDY OF PROMISING WAYS TO REDUCE THE EMISSION OF SUBSTANCES CAUSING THE GREENHOUSE EFFECT ENTERING THE ATMOSPHERE FROM THE ACTIVITIES OF DOMESTIC CIVIL AVIATION

O. G. MALTSEV, S. I. POPLETEEV, V. I. MARINICHEV

The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract. The article discusses the issues of a new important area of activity of the aviation industry – reducing the emission of substances that cause a greenhouse effect entering the atmosphere from civil aviation

activities. The article describes the fundamental principles of such a reduction, which can be implemented through the use of new types of aviation fuels. The currently known types of alternative fuels are presented. Based on the international specification for aviation Fuels containing Synthesized Components ASTM D 7566 “Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons”, the methods of obtaining synthetic fuels suitable for use in civil aviation mixed with traditional fuels. The article shows the difficulties that stand in the way of the development of emission reduction directions in Russia in terms of aviation fuels and lubricants, as well as ways to solve these issues, taking into account the requirements of the specification for the approval of new fuels and additives ASTM D 4054 “Standard Practice for Evaluation of New Aviation Turbine Fuels and Fuel Additives”. The article considers two ways of decarbonization of the aviation industry, the most realistic to date.

Keywords: aviation fuel, jet engine, aviation fuels and lubricants, risks, greenhouse effect, airworthiness maintenance, air transportation, climate

For citation: Maltsev O. G. , Popleteev S. I., Marinichev V. I., The study of promising ways to reduce the emission of substances causing the greenhouse effect entering the atmosphere from the activities of domestic civil aviation, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 40, pp. 31–40. (In Russ.)

Введение

В последнее десятилетие во всем мире часто обсуждаемой стала тема низкоуглеродной экономики. Угроза «парникового эффекта» заставляет ООН и ведущие мировые державы принимать проактивные решения, направленные на снижение выбросов отдельных веществ в атмосферу.

Основная цель данной статьи – рассмотреть процессы снижения выбросов в атмосферу углекислого газа (CO_2) (процессы декарбонизации), которые могут быть реализованы или уже реализуются в мировой и российской гражданской авиации (ГА) при применении авиационных топлив. Статья описывает существующие направления и анализирует часть возникающих при этом рисков.

Первым отрицательным фактором, влияющим на скорость возникновения парникового эффекта, является поступление в атмосферу углекислого газа. Главным источником такого поступления при осуществлении полетов гражданских воздушных судов является топливо для реактивных двигателей – керосин. В нем содержится до 86 % углерода, и при сжигании килограмма авиационного керосина в атмосферу попадает от 2,5 до 3,15 кг CO_2 . Вторым отрицательным фактором является эмиссия оксидов азота. Она возникает вследствие высокой температуры в зоне горения топлива, что вызывает реакцию азота, находящегося в воздухе, с кислородом, в результате которой образуются оксиды азота (NO , NO_2). Оксиды азота, в свою очередь, вызывают появление на высотах более 10 км тропосферного озона, ускоряющего парниковый эффект. Третьим фактором является выделение метана CH_4 , возникающего вследствие неполного сгорания минерального топлива в двигателях внутреннего сгорания. Метан активно участвует в парниковом эффекте и дополнительно, как легкий газ, быстро попадает на границу тропосферы и стратосферы, где на высоте 15–20 км под действием солнечных лучей разлагается на водород и углерод. Углерод соединяется с кислородом, образуя CO_2 . В результате поглощения кислорода разрушаются молекулы O_3 – защитного слоя биосферы Земли. Образованный из метана CO_2 под действием турбулентной диффузии и конвекции распределяется в толще атмосферы, пополняя запасы атмосферного углерода, и тем самым участвует в парниковом эффекте. Таким образом, чем больше CH_4 попадает в атмосферу, тем больше образуется CO_2 .

Влияние третьего фактора в ГА России крайне мало из-за слабого развития поршневой авиации, но весьма актуально в развитых странах Европы и Северной Америки.

Большинство ведущих ученых считает, что эмиссия парниковых газов в результате человеческой деятельности является основной причиной наблюдаемых изменений климата с середины 20-го века. Продолжающаяся эмиссия парниковых газов может вызвать крайне нежелательные долгосрочные климатические изменения в глобальном масштабе, влекущие за собой серьезные, повсеместные и необратимые последствия для людей и экосистем.

Переход к низкоуглеродной экономике в глобальном масштабе может снизить формирующиеся сегодня климатические риски. Многие страны по всему миру разрабатывают и реализуют стратегии развития для достижения низкого уровня эмиссии парниковых газов. Эти стратегии направлены на достижение целей социального, экономического и экологического развития при одновременном сокращении долгосрочных выбросов парниковых газов и повышении устойчивости к последствиям изменения климата.

Следуя общемировым трендам экономического развития, для авиационной отрасли также были определены основные направления движения по снижению выбросов CO₂. В 2018 г. Советом ИКАО был одобрен Том IV «Система компенсации и сокращения выбросов углерода для международной авиации» Приложения 16 к Международной конвенции о гражданской авиации «Защита окружающей среды», называемая сокращенно CORSIA [1]. Документом предусматривается с 2027 года введение для авиакомпаний стран-участниц конвенции компенсационных платежей за дополнительные (по отношению к уровню базового 2019 года) выбросы парниковых газов. Эта система направлена на достижение цели «углеродно-нейтрального роста» мировой ГА, начиная с 2020 г.

АвиапЕРЕВОЗКИ ответственны за 3,5 % антропогенного вклада в глобальное потепление. Около трети этого количества приходится на выбросы углекислого газа, а две трети – на прочие факторы. К такому выводу по результатам исследований пришла большая международная группа ученых из Европы, Китая и США [2].

Авторы этой работы проанализировали данные по авиапЕРЕВОЗКАМ за 2018–2020 годы, учитывая вклад как продуктов сгорания топлива, так и других факторов, в том числе образования оксидов азота, загрязнения атмосферы аэрозолями и сажей, возникновения конденсационного следа, влияния полетов на облачность. Выбросы углекислого газа не являются преобладающими: больший вклад в глобальное потепление вносят облака, конденсирующиеся после пролетов, которые препятствуют рассеиванию поднимающегося снизу тепла.

С другой стороны, эта облачность быстро рассеивается, тогда как влияние CO₂ продолжается годами и столетиями. По оценке [2], за всю историю глобальной авиационной индустрии, начиная с 1940 года, самолеты выбросили в воздух 32,6 млрд т углекислого газа. На авиацию пришлось около 1,5 % общих выбросов CO₂ за этот срок, причем около половины этого количества поступило в атмосферу в последние 20 лет.

Однако общемировые тенденции, несмотря на относительно не столь большие величины выбросов CO₂, поступающие в атмосферу от ГА, направлены на стимулирование снижения этих выбросов. Несмотря на столь малое влияние авиации на формирование «парникового эффекта», введение CORSIA – это решенный вопрос. Поэтому в нашей стране также необходимо предпринять соответствующие шаги, которые позволили бы сократить затраты авиакомпаний на выплаты за выбросы углерода путем снижения этих выбросов.

Цели и методы исследования

Целью настоящего исследования является изучение одного из перспективных направлений снижения эмиссии за счет преодоления отрицательного эффекта от главного по масштабности фактора – сжигания углерода, входящего в состав авиационного топлива. В статье рассматривается такой способ снижения – внедрение в практику эксплуатации ВС ГА экологически чистых авиационных топлив. В настоящее время активно ведется поиск, особенно

за рубежом, альтернативных топлив, способных соответствовать экологическим и эксплуатационным требованиям, которые могут частично заменить нефтяные традиционные топлива.

Основным методом исследования является анализ международных решений, реализуемых в данном направлении, а также методов и путей внедрения в ГА альтернативных топлив.

В соответствии с рабочим документом второй конференции ИКАО по авиации и альтернативным видам топлива [3] все топливо делится на:

Обычное авиационное топливо (Conventional Aviation Fuel CAF) – это авиационное топливо, полностью полученное из источников нефти, включая сырую нефть, жидкие конденсаты природного газа, тяжелую нефть, горючие сланцы и нефтеносные пески. Он включает в себя как авиационный керосин (ТС-1, РТ, Jet-A, Jet-A1, Jet-B и др.), так и авиационный бензин.

Авиационное альтернативное топливо (Aviation Alternative Fuel AAF) – это заменитель топлива, получаемый из других источников, помимо нефти, таких как уголь, природный газ, биомасса и гидрогенизированные жиры и масла.

Устойчивое (биологически чистое) авиационное топливо (Sustainable Aviation Fuel SAF) – это AAF, которое соответствует критериям устойчивости.

Критерии устойчивости авиационного топлива изложены в Директиве 2009/28/ЕС европейского парламента и совета от 23 апреля 2009 г. «О стимулировании использования энергии из возобновляемых источников и внесении поправок в Директивы 2001/77/ЕС и 2003/30/ЕС с последующей отменой этих Директив» [4]. Основой всех приведенных в документе критериев является рекомендация, сделанная ИКАО в рамках резолюции А39-2 Ассамблеи ИКАО для государств-членов конвенции:

«Признавать существующие подходы к оценке устойчивости всех альтернативных видов топлива в целом, в том числе подходящих для использования в авиации, которые должны обеспечить снижение чистых выбросов парниковых газов (ПГ) на основе жизненного цикла, способствовать местному социально-экономическому развитию; следует избегать конкуренции с едой и водой». То есть биологически чистые (устойчивые) топлива – это топлива, произведенные из веществ, материалов, соединений, субстанций, не пригодных в своем естественном виде к поддержанию жизни и здоровья человека.

В мире изучены следующие виды альтернативных топлив для реактивных двигателей, сгруппированных по способам их получения и источникам:

1. **Синтетическое топливо** – топливо из попутного нефтяного газа. Основной метод получения – метод Фишера-Тропша. За рубежом это топливо штатно доступно для приобретения в аэропорту Доха под маркой GTL.

2. **Синтетическое топливо** – топливо из бурого угля. Основной метод получения – метод Фишера-Тропша. За рубежом топливо штатно доступно для приобретения в ЮАР под маркой CTL.

3. **Биотопливо** – топливо, получаемое из биомассы (растения, отходы, жиры, масла). За рубежом топливо доступно для приобретения в аэропорту Сингапура под маркой Neste MY Renewable Jet Fuel. Также некоторые авиакомпании периодически используют данное топливо. Опытное использование топлива производится в Индии, Швеции, ОАЭ. Стоит отметить, что в ОАЭ произведен коммерческий рейс Абу-Даби – Амстердам на Boeing 787 с использованием биотоплива, а в Швеции с декабря 2018 года биотопливо периодически доступно в 8 аэропортах.

4. **Водородное топливо.** Единственное топливо, по-настоящему альтернативное нефтяному. При сгорании водорода не образуется углекислого газа. Способы извлечения водорода на сегодня энергозатратны и финансовоемки. В 90-х годах в нашей стране успешно проведены наземные и летные испытания экспериментального самолета Ту-155, одна силовая установка которого работала на криогенном жидком водороде. Была разработана специальная криогенная система для подачи топлива в двигатель [5]. ФГУП ГПИиНИИ «Аэропроект» разработал

наземную систему для заправки ВС жидким водородом. Работы на сегодня остановлены. Распространения данное топливо не получило.

5. *Газомоторное топливо (ГМТ)* – топливо из попутного (природного) газа и компримированного и сжиженного метана. Основное изучение и испытания данных видов топлив проводились в России. Наиболее изучено и испытано топливо марки АСКТ (авиационное сконденсированное топливо) [6, 7].

6. *Электричество*. За рубежом активно идут испытания авиационной техники, использующей солнечную энергию, преобразуемую в электрическую. В основном это БПЛА и небольшие самолеты. В России данной тематикой занимается НИЦ им. Н. Е. Жуковского.

Россия также имеет свой опыт по разработкам в данном направлении:

В рамках госконтрактов с Минпромторгом России в период 2007–2010 гг. в ЦИАМ разработаны технические требования к опытным образцам синтетического жидкого топлива (СЖТ) из альтернативного сырья (природного газа) и совместно с ООО «ЮРД-Центр» изготовлены и испытаны опытные образцы СЖТ из природного газа. Организация промышленного выпуска синтетического топлива и его внедрение на авиатехнику не проводились.

Применительно к самолетному и вертолетному парку наиболее приемлемым рассматривался сжиженный газ пропан-бутанового ряда – АСКТ, на который ЦАГИ, ЦИАМ, ГосНИИ ГА и НИПИГаз в 1991 году были разработаны ТУ 39-1547-91 «Топливо авиационное сконденсированное из нефтяного газа» для газотурбинных двигателей на опытно-промышленную партию и сжиженный метан.

АСКТ представляет собой смесь предельных углеводородов, вырабатываемых из попутного нефтяного газа. Преимущество АСКТ заключается в простоте производства, для этого достаточно специального модуля на НПЗ. Также оно отличается своей универсальностью, т. к. меняя фракционный состав, можно получить необходимые качества топлива как для северных регионов эксплуатации с экстремально низкими температурами, так и для южных регионов с умеренным или теплым климатом. В 1987–1988 гг. были проведены наземные и летные испытания экспериментального вертолета Ми-8ТГ с двухтопливными двигателями ТВ2-117ТГ, работавшими на штатном топливе и АСКТ. А в 1995 году на авиасалоне был продемонстрирован промышленный образец вертолета Ми-8ТГ, работающий на АСКТ, керосине и их смесях в любой пропорции [7].

В 2021 году вышла международная спецификация, определяющая требования к авиатопливу, содержащему синтезированные углеводороды: ASTM D7566-21 [8]. В соответствии с положениями данной спецификации для производства SAF из обычного авиационного топлива (стандартного по терминологии документа) для реактивных (турбореактивных) двигателей могут быть использованы только следующие синтезированные углеводороды.

1) Fischer-Tropsch гидрообработанный синтезированный парафиновый керосин (**FT-SPK**): парафины и олефины, получаемые из синтез-газа в процессе Фишера-Тропша с использованием катализатора железа или кобальта.

2) Синтезированный парафиновый керосин из гидропереработанных сложных эфиров и жирных кислот (**HEFA**): n-моно, ди- и триглицериды, свободные жирные кислоты и сложные эфиры жирных кислот, которые были подвергнуты гидрообработке для удаления кислорода.

3) Синтезированные изо-парафины из гидропереработанных ферментных сахаров (**SIP**): n-фарнезан, который получают путем гидрообработки и фракционирования фарнезена, полученного в результате ферментации сахаров.

4) Синтезированный керосин с ароматиками, полученными при алкилировании легких ароматиков из нефтяных источников (**FT-SPK/A**): n-синтезированный парафиновым керосином Фишера-Тропша с ароматическими соединениями, полученными путем алкилирования легких ароматических углеводородов, не являющимися производными нефти (например бензол).

5) Спиртный синтетический парафиновый керосин (**ATJ-SPK**): полученный из спирта и обработанный на следующих этапах: дегидратация, олигомеризация, гидрирование и фракционирование.

6) Синтезированный керосин из гидротермальной конверсии эфиров жирных кислот и жирных кислот (**CHJ**): синтетический компонент смеси, состоящий в основном из нормального парафина, циклопарафина, изопарафина и ароматических соединений.

7) Синтезированный парафиновый керосин из гидропереработанных углеводородов, эфиров и жирных кислот (**HC-HEFA**): n-углеводороды биологического происхождения и свободные жирные кислоты и сложные эфиры жирных кислот (например метиловые эфиры жирных кислот), которые были подвергнуты гидрообработке для насыщения гидромолекулы углерода и удаления кислорода.

Применение синтетических топлив производится на сегодня только в различных пропорциях смешения со штатными топливами. В результате смешения, в зависимости от источников и с учетом Директивы 2009/28/ЕС [4] производитель получает или устойчивое (биологически чистое) топливо (SAF) или авиационное альтернативное топливо (AAF).

В настоящее время установлена пропорция смешения до 50 % для сохранения смазывающей способности топлива, плотности и величины содержания ароматических веществ. Риск от применения синтезированного керосина типа HEFA вытекает из содержания в нем метиловых эфиров жирных кислот (FAME), повышенная концентрация которых может вызвать отказ топливо-регулирующей аппаратуры из-за образования нагара и повышенного трения, а также повреждение уплотнительных материалов из-за высокого содержания ароматических веществ. На сегодня содержание FAME, например, в топливе ограничено международными спецификациями [9, 10] в количестве 50 мг/кг.

Более новые двигатели устойчивы к отрицательным свойствам синтетических топлив, так например, первоначально на военных самолетах было успешно испытано применение авиатоплива на 100 % состоящего из биотоплива типа HEFA.

Первое в мире исследование по использованию возобновляемого топлива (SAF) на широкофюзеляжных коммерческих пассажирских самолетах показало его преимущество над обычным керосином как минимум в вопросах экологии и топливной эффективности по данным мирового лидера производства возобновляемого топлива в мире финской Neste. «Исследовательская группа обнаружила, что SAF выделяет меньше твердых частиц, чем обычный керосин, при любых условиях работы двигателя, что указывает на потенциал улучшения качества воздуха вокруг аэропортов и снижения воздействия на климат», – говорится и в пресс-релизе компании Airbus [11].

Кроме того, у SAF ниже плотность, но выше энергосодержание на килограмм топлива по сравнению с обычным керосином, что дает преимущества в топливной эффективности самолета из-за меньшего расхода топлива и меньшей массы топлива на борту для выполнения той же задачи. Весной 2021 года Airbus, Rolls-Royce, немецкий исследовательский центр DLR вместе с Neste впервые проводили испытания на земле и в воздухе с использованием самолета Airbus A350-900 с двигателями Rolls-Royce Trent XWB, который был заправлен 100 % SAF. В апреле A350 совершил три полета над Средиземным морем, в сопровождении самолета DLR Falcon, чтобы сравнить в полете выбросы как керосина, так и топлива Neste. Во время этих испытательных полетов не возникло никаких проблем с эксплуатацией самолета. Обработка первоначальных результатов продолжается, а междисциплинарная команда, в которую также входят исследователи из Национального исследовательского совета Канады и Университета Манчестера, планирует опубликовать свои результаты в академических журналах к концу 2022 года. Уточняется также, что все участники исследования поддерживают широкомасштабное использование SAF в авиации. В планах компании Airbus к 2035 году – стать лидером среди производителей самолетов с минимальным выбросом CO₂. К 2050 году компания планирует все свои ВС выпускать с двигателями, обеспечивающими нулевые выбросы [11].

Основные результаты

Для применения синтетических топлив наземное оборудование и бортовые системы ВС не претерпевают никаких изменений. Применение АСКТ, СПГ и водорода влечет за собой конструктивные изменения топливорегулирующей и противопожарной систем двигателя и ВС, а также изменения оборудования наземных объектов авиатопливообеспечения [5].

Для нормативного закрепления применения альтернативных топлив, снижающих эмиссию в атмосферу веществ, вызывающих парниковый эффект, необходимо изменение законодательной базы, касающейся производства и применения авиационных топлив.

На сегодня не существует порядка внедрения (одобрения или, согласно ранее существовавшему термину – допуска) новых авиационных горюче-смазочных материалов (авиаГСМ) к применению в ГА. В обязанность нефтеперерабатывающих заводов при выпуске продукта на рынок входит проведение комплекса необходимых исследований и испытаний, что, однако, не закреплено ни в одном нормативно-правовом акте (НПА). Отсутствие законодательных требований ставит производителей в сложную ситуацию. Требований нет, а ответственность за выпуск в обращение топлива, не соответствующего целям его потребления – применению на гражданских ВС, обеспечивающему безопасность полетов – есть [12]. Результаты работы непредсказуемы, так как ее необходимость не закреплена юридически. Можно провести сотни испытаний, но все они будут вне рамок нормативных требований.

Самолетный парк ГА примерно на 85 % состоит из ВС зарубежного производства. Основываясь на этом, следует брать на вооружение мировой опыт и практику работы ведущих зарубежных авиакомпаний и нефтяных «гигантов» по внедрению в ГА устойчивых топлив.

В документе ASTM D4054-22 [13] изложен порядок действий при испытаниях продуктов для принятия решения о возможности использования их в ГА в качестве новых (или модернизированных) топлив или присадок. Цель документа состоит в том, чтобы направить производителя нового топлива или новой топливной присадки через четко определенный процесс оценки, который включает предварительное тестирование и необходимое взаимодействие с производителями двигателей и планеров; организациями по стандартизации; агентствами по летной годности, FAA и EASA. Этот документ содержит алгоритм расчета объема присадки или топлива, необходимого для испытаний, ориентировочные оценки стоимости испытаний, связанных с вводом нового топлива или новой присадки к топливу и создает необходимые предпосылки для внедрения новой технологии для последующего применения ее в ГА.

Используя положения ASTM D4054, можно предлагать на территории Российской Федерации новые по своей сути виды топлив, включающие в себя синтезированные углеводороды, опираясь на уже производимое и одобренное к применению в ГА топливо марки Jet A-1 по ASTM D1655 [9] или DEF STAN 091-91 [10].

Для перевода ГА России на альтернативные виды топлива потребуются пройти длительный и сложный путь. Внедрение устойчивых топлив на основе российских марок топлив для реактивных двигателей ТС-1 или РТ потребует больше времени, чем требуется в аналогичном случае для зарубежных топлив. Во-первых, в нашей стране отсутствует нормативная база по производству синтезированных углеводородов. Действующими стандартами и Техническими регламентами Таможенного союза не предусмотрено производство таких продуктов и, тем более, введение их в авиационное топливо. Во вторых, наличие большого запаса нефтяного сырья не стимулировало ранее глубоких разработок альтернативных топлив, поэтому, в случае принятия соответствующего решения, работы начнутся практически «с нуля». В третьих, процесс испытаний новых топлив на российской основе будет более сложным и объемным, так как потребуются проведение полного цикла испытаний и проверок, включая стендовые, ресурсные, летные, эксплуатационные испытания.

Внедрение SAF потребует изменения не только процесса производства, но и процессов применения топлива, содержащего синтезированные компоненты. Требуется актуализировать процедуры контроля качества SAF, процедуры транспортирования, хранения, ввода присадок, совместимости с российскими и зарубежными образцами оборудования, в первую очередь фильтрационного, необходимо обновление лабораторной базы на НПЗ и в аэропортах и т. д. Низкотемпературные свойства SAF, электризуемость и другие эксплуатационные качества этого продукта неизвестны.

Такая работа имеет широкий и ресурсно-затратный характер, однако, учитывая, что с 2027 года требования CORSIA [1] становятся обязательными, она должна быть начата в ближайшее время. Риски от невнедрения топлив с пониженным эмиссионным выбросом лягут на российские авиакомпании и, как следствие, на производителей топлива для реактивных двигателей, так как заправляться российским SAF станет экономически невыгодным.

ГосНИИ ГА приступил к участию в реализации программы декарбонизации экономики [12] в части, касающейся отечественной ГА.

Работы идут по двум направлениям. В целях участия в выработке основных путей внедрения SAF в ГА России институт стал членом SAF Alliance, в которую входят Airbus, Pratt & Whitney, Аэрофлот, Волга-Днепр и ЦИАМ. А второе направление – это постановка на производство на российских НПЗ топлива для турбореактивных двигателей, содержащего синтезированные углеводороды по ASTM D7566. Для реализации этого пути Институт заключил договор с ООО «Газпромнефть-Аэро» на выполнение данной работы. В настоящее время работы по договору и по участию Института в SAF Alliance приостановлены.

Исследования, результаты которых представлены в настоящей статье, проведены авторами в инициативном порядке.

Заключение

Несмотря на вовлеченность в процесс внедрения экологически чистых топлив, ГосНИИ ГА внимательно следит за развитием разработок других альтернативных топлив, в первую очередь водородного, как наиболее перспективного источника электрической энергии для двигателей ВС. Также с практической точки зрения представляется весьма перспективным топливо АСКТ, почти полностью готовое к применению.

Изменение структуры наземных служб, обеспечивающих заправку ВС альтернативными видами топлива, внедрение новых методов и способов контроля их качества является профессиональной сферой Института. Работы по приведению наземных объектов к требованиям, предъявляемым особенностями новых топлив, могут быть выполнены силами Научного центра аэропортовой деятельности и авиатопливообеспечения ГосНИИ ГА.

Список источников

1. Приложение 16 к Международной конвенции о гражданской авиации. Охрана окружающей среды. Том IV. Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA).
2. D. S. Lee, D. W. Fahey, A. Skowron, M. R. Allen, U. Burkhardt, Q. Chen, S. J. Doherty, S. Freeman, P. M. Forster, J. Fuglestad, A. Gettelman, R. R. De León, L. L. Lim, M. T. Lund, R. J. Millar, B. Owen, J. E. Penner, G. Pitari, M. J. Prather, R. Sausen, L. J. Wilcox, *Atmospheric Environment*, vol. 244, 2021, 117834. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>
3. Рабочий документ ИКАО CAAF/2-WP/03 24/07/17. Развитие событий в области научных исследований и сертификации альтернативных видов авиационного топлива. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.icao.int/Meetings/CAAF2/Documents/CAAF.2.WP.003.1ru.pdf> (дата обращения: 10.10.2022).

4. Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. [Электронный ресурс]. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028> (дата обращения: 16.09.2022).

5. Постоев С. К., Резников М. Е. Подготовка кадров криогенной авиации и наземного комплекса криогенного топливообеспечения // Сборник научных трудов ГосНИИ ГА. 2010. № 311. С. 161–164.

6. Аджиев А. Ю., Зайцев В. П., Маврицкий В. И., Постоев С. К., Яновский Л. С., Шмаль Г. И. Внедрение газотопливной технологии на воздушном транспорте – путь к удешевлению перевозок в арктическом и дальневосточном макрорегионах // Арктика. Экология и экономика. 2012. № 2(6). С. 94–101.

7. Постоев С. К., Зайцев В. П. Современное состояние и возможности перевода вертолетов и самолетов региональной авиации на авиационное сконденсированное топливо АСКТ // Сборник научных трудов ГосНИИ ГА. 2010. № 311. С. 119–124.

8. ASTM D7566-21. Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons, ASTM, 2021, 38 p. <https://doi.org/10.1520/D7566-21>

9. ASTM D1655-22. Standard Specification for Aviation Turbine Fuels, ASTM, 2022, 20 p. <https://doi.org/10.1520/D1655-22>

10. DEF STAN 91-091. Turbine Fuel, Kerosene Type, Jet A-1; NATO Code: F-35; Joint Service Designation: AVTUR, MODUK, 2022, 55 p., available at: https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=DEF%20STAN%2091-091&item_s_key=00450750 (accessed: 10.10.2022).

11. Airbus Press release, Toulouse, November 29, 2021, available at: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2021-11-this-chase-aircraft-is-tracking-100-safs-emissions-performance> (accessed: 10.10.2022).

12. Ст. 469 «Гражданский кодекс Российской Федерации (часть вторая)» от 26.01.1996 № 14-ФЗ (ред. от 01.07.2021, с изм. от 08.07.2021, с изм. и доп., вступ. в силу с 01.01.2022).

13. ASTM D4054-22. Standard Practice for Determining the Quality of New Aviation Turbine Fuels and Fuel Additives, ASTM, 2022, 49 p. <https://doi.org/10.1520/D4054-22>

14. Стратегия социально-экономического развития России с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года: Распоряжение Председателя Правительства Российской Федерации от 29 октября 2021 года № 3052-р. [Электронный ресурс]. URL: <http://government.ru/docs/all/137358/> (дата обращения 10.10.2022).

References

1. Annex 16 to the International Convention on Civil Aviation. Environmental Protection Volume IV. Carbon Compensation and Emission Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA).

2. D. S. Lee, D. W. Fahey, A. Skowron, M. R. Allen, U. Burkhardt, Q. Chen, S. J. Doherty, S. Freeman, P. M. Forster, J. Fuglestad, A. Gettelman, R. R. De León, L. L. Lim, M. T. Lund, R. J. Millar, B. Owen, J. E. Penner, G. Pitari, M. J. Prather, R. Sausen, L. J. Wilcox, *Atmospheric Environment*, vol. 244, 2021, 117834. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>

3. ICAO Working Paper CAA/2-WP/03 24/07/17. Developments in the field of scientific research and certification of alternative types of aviation fuel, available at: <https://www.icao.int/Meetings/CAAF2/Documents/CAAF.2.WP.003.1.en.pdf> (accessed: 10.10.2022).

4. Directive 2009/28/EC of The European Parliament and of the council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and the amendment and subsequent repeal of Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC, available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0028> (accessed: 16.09.2022).

5. Postoev S. K., Reznikov M. E., Perssonel preparation for cryogenic aviation and cryogenic fuel supply ground system, *Collection of scientific works of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2010, no. 311, pp. 161–164. (In Russ.)

6. Adzhiev A. Yu., Zaitsev V. P., Mavritskiy V. I., Postoev S. K., Yanovskiy L. S., Shmal G. I., Vnedrenie gazotoplivnoj tekhnologii na vozdushnom transporte – put' k udeshevleniyu perevozk v arkticheskom i dal'nevostochnom makroregionakh, *Arktika. Ehkologiya i ehkonomika*, 2012, no. 2(6), pp. 94–101. (In Russ.)
7. Postoev S. K., Zaitsev V. P., Contemporary state and possibilities of regional aviation aircraft and helicopters fuel changeover to condensed aviation fuel – ASKT, *Collection of scientific works of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2010, no. 311, pp. 119–124. (In Russ.)
8. ASTM D7566-21. Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons, ASTM, 2021, 38 p. <https://doi.org/10.1520/D7566-21>
9. ASTM D1655-22. Standard Specification for Aviation Turbine Fuels, ASTM, 2022, 20 p. <https://doi.org/10.1520/D1655-22>
10. DEF STAN 91-091. Turbine Fuel, Kerosene Type, Jet A-1; NATO Code: F-35; Joint Service Designation: AVTUR, MODUK, 2022, 55 p., available at: https://global.ihc.com/doc_detail.cfm?document_name=DEF%20STAN%2091-091&item_s_key=00450750 (accessed: 10.10.2022).
11. Airbus Press release, Toulouse, November 29, 2021, available at: <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2021-11-this-chase-aircraft-is-tracking-100-safs-emissions-performance> (accessed: 10.10.2022).
12. Article 469 “Civil Code of the Russian Federation (Part Two)” dated 26.01.1996, No. 14-FZ (ed. from 01.07.2021, with amendments from 08.07.2021, with amendments and additions, intro. effective from 01.01.2022).
13. ASTM D 4054. Standard Practice for Determining the Quality of New Aviation Turbine Fuels and Fuel Additives, ASTM, 2022, 49 p., <https://doi.org/10.1520/D4054-22>
14. Strategy of socio-economic development of Russia with low greenhouse gas emissions until 2050: decree of the Chairman of the Government of the Russian federation no. 3052-r dated October 29, 2021, [electronic resource], available at: <http://government.ru/docs/all/137358/> (accessed: 10.10.2022). (In Russ.)

Информация об авторах

Мальцев Олег Германович, руководитель направления аэропортовой деятельности и авиатопливообеспечения, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, maltsev_oleg@bk.ru

Поплетеев Станислав Иванович, начальник отдела, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, csavia@mail.ru

Мариничев Владимир Игорьевич, директор научного центра аэропортовой деятельности и авиатопливообеспечения, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, marinichev@gosniiga.ru

Authors information

Maltsev Oleg G., Head of the Airport Activities and Aviation Fuel Supply, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, maltsev_oleg@bk.ru

Popleteev Stanislav I., Head of the Department, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, csavia@mail.ru

Marinichev Vladimir I., Director of the Scientific Center for Airport Activities and Fuel Supply, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, marinichev@gosniiga.ru

Статья поступила в редакцию 15.08.2022; одобрена после рецензирования 05.10.2022; принята к публикации 14.10.2022.

The article was submitted 15.08.2022; approved after reviewing 05.10.2022; accepted for publication 14.10.2022.

Научная статья
УДК 621.396.969

РАСЧЕТ КООРДИНАТ ИСТОЧНИКА РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ МНОГОПОЗИЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ ПАССИВНОЙ ЛОКАЦИИ НА ОСНОВЕ РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Е. Г. БОРИСОВ¹, И. Н. ШЕСТАКОВ²

¹ Научно-производственная компания «Технологии. Инвестиции. Менеджмент»,
Санкт-Петербург, Россия

² Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. В статье обоснован способ определения местоположения источника радиоизлучения с использованием измерений разностей расстояний и мощностей принятых колебаний. Проведено обобщение известных способов определения местоположения объектов на случай многопозиционной системы пассивной локации. Показано, что предложенный способ позволяет определить три пространственные координаты объектов при наличии трех радиовидимых приемных позиций. Предложенный способ позволяет решить задачу координатометрии при пропуске или недостоверности ряда измерений: как разностей расстояний, так и мощности принятых колебаний, что обуславливает его информационную устойчивость. Рассмотрено влияние интерференционного множителя Земли на точность определения местоположения. Приведен иллюстративный пример по определению местоположения объекта при различных конфигурациях пассивной системы локации.

Ключевые слова: навигация, местоположение, разностно-дальномерный, оценка мощности, метод наименьших квадратов

Для цитирования: Борисов Е. Г., Шестаков И. Н. Расчет координат источника радиоизлучения многопозиционной системой пассивной локации на основе разностно-дальномерных и энергетических определений // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 40. С. 41–51.

CALCULATION OF THE COORDINATES OF THE RADIO EMISSION SOURCE BY A MULTIPPOSITION PASSIVE LOCATION SYSTEM BASED ON DIFFERENCE-RANGING AND ENERGY DETERMINATIONS

E. G. BORISOV¹, I. N. SHESTAKOV²

¹ Scientific and Production Company “Technologies. Investments. Management”, Saint Petersburg, Russia

² The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract. The article demonstrates the feasibility of a method for determining the position of a radio emission source using measurements of the range differences and powers of the received oscillations. Known methods for determining the position of objects are generalized for the case of a multilateration passive location system. It was demonstrated that the proposed method makes it possible to determine three spatial coordinates of objects in the presence of three radio-visible receiving positions. The proposed method enables solving the problem of coordinate measurement in case of missing or unreliable measurements of both the

range differences and the power of the received oscillations, which determines its information stability. The influence of the interference factor of the Earth on the accuracy of positioning is considered. An illustrative example is given for assessing the accuracy of positioning an object with various configurations of the passive location system.

Keywords: navigation, position, range-difference, power evaluation, least square method

For citation: Borisov E. G., Shestakov I. N., Calculation of the coordinates of the radio emission source by a multiposition passive location system based on difference-ranging and energy determinations, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 40, pp. 41–51. (In Russ.)

Введение

Вариантом навигационного обеспечения воздушных судов (ВС) в районах, где размещение дорогостоящих навигационных систем экономически нецелесообразно или вызывает технические затруднения, является использование многопозиционных систем пассивной навигации (МПСН). Применение МПСН целесообразно для позиционирования ВС как в удаленных и труднодоступных районах, так и для определения местоположения ВС малой авиации и беспилотных летательных аппаратов в крупных городах, где радиолокационный и радиотехнический контроль полетов связан ограничениями, вызванными плотной городской застройкой, создающей зоны радиолокационного затенения и переотражения сигналов, а также существующими экологическими ограничениями на допустимую плотность потока мощности электромагнитного излучения

Краткий обзор публикаций по теме

Для определения координат ВС, являющегося для МПСН источником радиоизлучения (ИРИ), традиционно используются угломерный (триангуляционный) и разностно-дальномерный (гиперболический) методы позиционирования или их комбинации [1, 2]. Данные методы нашли применение в многопозиционных радионавигационных системах, работающих в интересах управления воздушным движением (УВД), и обеспечивают определение местоположения ВС по сигналам их бортовых ответчиков [3–7]. Несмотря на высочайшую степень теоретической проработки и наличие ряда изделий, реализующих указанные методы позиционирования, активно продолжаются исследования по дальнейшему совершенствованию способов определения местоположения ИРИ. В статье [8] исследован математический аппарат расширенного фильтра Калмана, реализующего рекуррентный алгоритм определения местоположения ИРИ на основе измеренных значений мощности принятых сигналов. Исследования радиально-базового метода, приведенные в [9], показали, что на основе связи определяемых параметров (амплитуда, мощность) с искомыми координатами, описываемыми дробно-рациональными функциями, можно определить координаты объекта. Работы [10, 11, 12] посвящены дальнейшему обобщению и развитию теории пассивной локации путем модификации энергетического метода определения координат ИРИ, при этом либо полагается априорно известным ряд параметров движения объекта (начальная дальность, скорость), либо производится оценка угловых координат. Статья [13] затрагивает проблематику определения координат ИРИ за счет собственного движения ВС путем оценивания мощности принимаемых колебаний. Исследования алгоритмов определения координат источника излучения по совокупности определений пеленгов и амплитуды сигналов проведены в [14].

Целью статьи является разработка способа определения местоположения ВС многопозиционной системой пассивной локации на основе совместного использования разностно-дальномерных измерений и оценок мощностей принимаемых колебаний.

Определение координат воздушного судна по измерениям разностей расстояний и мощностей принятых колебаний

Рассмотрим возможность и целесообразность применения комбинирования оценок разности расстояний и мощностей принятых колебаний для позиционирования ИРИ. На рис. 1 приведена геометрия МСПН, которая способна определять разности расстояний и проводить оценку мощности колебаний на каждой из позиций. В рассматриваемой системе определению подлежат $0,5N(N-1)$ разностей расстояний ΔR_{ij} , из которых $N-1$ являются некоррелированными, а также N мощностей принятых колебаний P_{Ri} . Разности расстояний связаны с искомыми координатами системой нелинейных уравнений:

$$\Delta R_{ij} = R_i - R_j = \sqrt{(X-x_i)^2 + (Y-y_i)^2 + (H-h_i)^2} - \sqrt{(X-x_j)^2 + (Y-y_j)^2 + (H-h_j)^2}, \quad (1)$$

где X, Y, H – прямоугольные координаты ВС;

x_i, y_i, h_i – координаты точек расположения приемных позиций ($i, j, k, \dots, N$).

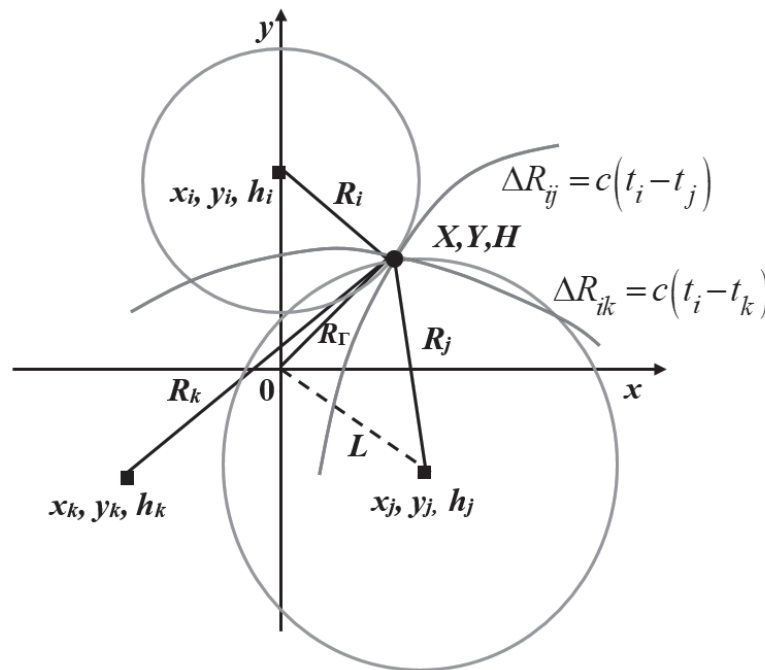


Рис. 1. Многопозиционная система пассивной навигации

Мощность прямого сигнала на выходе антенно-фидерного тракта приемного пункта вычисляется по соотношению, характеризующему распространение сигнала в свободном пространстве

$$P_{Ri} = \frac{P_{Ti} \lambda_i^2 G_{Ti} G_{Ri}}{(4\pi)^2 R_{Ri}^2} \eta_i F_{Ti}^2(\beta_{Ti}, \varepsilon_{Ti}) F_{Ri}^2(\beta_{Ri}, \varepsilon_{Ri}), \quad (2)$$

где: P_{Ti} – излучаемая мощность, λ_i – длина волны, G_{Ti} , G_{Ri} – коэффициенты усиления антенн передающей и приемной позиций, $F_{Ti}^2(\beta_{Ti}, \varepsilon_{Ti})$, $F_{Ri}^2(\beta_{Ri}, \varepsilon_{Ri})$ – ДНА антенн передающей и приемной позиций, β_{Ti} , ε_{Ti} и β_{Ri} , ε_{Ri} – углы в локальных сферических системах координат передающей и приемной позиций, η_i – коэффициент, учитывающий потери в тракте формирования и приема сигналов.

При известной мощности излучаемых колебаний и параметрах антенно-фидерных систем можно провести априорные оценки мощности P_0 на некоторой дальности R_0 , что позволит записать N уравнений вида:

$$R_i = \sqrt{(X - x_i)^2 + (Y - y_i)^2 + (H - h_i)^2} = R_0 \sqrt{\frac{P_0}{P_i}}. \quad (3)$$

В случае априорно неизвестного значения мощности колебаний запишем отношение принимаемых мощностей:

$$\sqrt{Q_{ij}} = \sqrt{P_{Ri}/P_{Rj}} = R_j/R_i. \quad (4)$$

Рассмотрим иную зависимость, связывающую дальности до ВС R_i и R_j с мощностью колебаний:

$$R_i(1 + k_{ij}) + R_j(k_{ij} - 1) = 0, \quad (5)$$

где $k_{ij} = (\sqrt{P_i} - \sqrt{P_j})/(\sqrt{P_i} + \sqrt{P_j})$.

Выражение (4) по своей сути есть окружность Аполлония – геометрическое место точек, отношение расстояний от которых до двух заданных точек находится в заданном соотношении, не равном нулю или единице [15].

Запишем системы линейных уравнений с учетом (1) и (3)–(5), учитывающие различный состав результатов первичных оценок для рассмотренных случаев:

$$\left. \begin{array}{l} R_1 - R_2 = \Delta R_{12} \\ \dots \dots \dots \\ R_1 - R_N = \Delta R_{1N} \\ R_1 = R_0 \sqrt{P_o/P_1} \\ \dots \dots \dots \\ R_N = R_0 \sqrt{P_o/P_N} \end{array} \right\}, \left. \begin{array}{l} R_1 - R_2 = \Delta R_{12} \\ \dots \dots \dots \\ R_1 - R_N = \Delta R_{1N} \\ R_1 \sqrt{Q_{12}} - R_2 = 0 \\ \dots \dots \dots \\ R_1 \sqrt{Q_{1N}} - R_N = 0 \end{array} \right\}, \left. \begin{array}{l} R_1 - R_2 = \Delta R_{12} \\ \dots \dots \dots \\ R_1 - R_N = \Delta R_{1N} \\ R_1(1 + k_{12}) + R_2(k_{12} - 1) = 0 \\ \dots \dots \dots \\ R_1(1 + k_{1N}) + R_N(k_{1N} - 1) = 0 \end{array} \right\}. \quad (6)$$

Любую из систем уравнений (6) можно представить матричным уравнением:

$$AZ_R = B, \quad (7)$$

решение которого методом наименьших квадратов (МНК) представим как

$$Z_R = (A^T A)^{-1} A^T B. \quad (8)$$

В (7) и (8) введены следующие матрицы: $Z_R^T = [R_1 \ R_2 \ \dots \ R_N]$ – матрица искомых дальностей; соответствующие (6) матрицы свободных коэффициентов

$$A = \left\| \begin{array}{cccc} 1 & -1 & & \\ 1 & & -1 & \\ \dots & \dots & & \dots \\ 1 & & & -1 \\ 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 1 \end{array} \right\|, A = \left\| \begin{array}{ccc} 1 & -1 & \\ 1 & & -1 \\ \dots & \dots & \dots \\ \sqrt{Q_{12}} & -1 & \\ \sqrt{Q_{13}} & & -1 \\ & & \ddots \\ \sqrt{Q_{1N}} & & 1 \end{array} \right\|, A = \left\| \begin{array}{ccc} 1 & -1 & \\ 1 & & -1 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 + k_{12} & k_{12} - 1 & \\ 1 + k_{13} & & k_{13} - 1 \\ & & \ddots \\ 1 + k_{1N} & & k_{1N} - 1 \end{array} \right\|, \quad (9)$$

соответствующие (6) матрицы измеряемых параметров

$$B^T = \|\Delta R_{12}, \Delta R_{13}, \dots, \Delta R_{1N}, R_0 \sqrt{P_o/P_1}, R_0 \sqrt{P_o/P_2}, \dots, R_0 \sqrt{P_o/P_N}\|,$$

$$B^T = \|\Delta R_{12}, \Delta R_{13}, \dots, \Delta R_{1N}, 0 \ 0 \ 0\|. \quad (10)$$

В реальных условиях при проведении оценки разностей расстояний и мощностей принятых колебаний (их отношений или иных преобразований) возможны как пропуски отдельных результатов оценки, так и их отбраковка ввиду наличия аномальных ошибок. Учесть это можно введя диагональную матрицу размерностью $\Gamma = \text{diag}[\gamma_1, \gamma_i, \dots, \gamma_N], i = \overline{1, n}$, учитывающую наличие или отсутствие соответствующих оценок ($\gamma = 1$ – i -я оценка используется, $\gamma = 0$ – не используется), тогда (8) примет вид [16]:

$$Z_R = (A^T \Gamma A)^{-1} A^T \Gamma B.$$

Определение наклонных дальностей позволит оценить прямоугольные координаты ВС, используя МНК

$$Z_{MP} = (A_{MP}^T A_{MP})^{-1} A_{MP}^T Z_R, \quad (11)$$

где Z_{MP} – матрица искоемых координат $Z_{MP}^T = [R_o^2 \ X \ Y \ H]$, $L_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + h_i^2}$ – расстояние от начала координат до точек расположения приемных позиций, R_o – наклонная дальность до ВС относительно начала системы координат;

$$A_{MP} = \begin{bmatrix} 1 & -2x_1 & -2y_1 & -2h_1 \\ 1 & -2x_2 & -2y_2 & -2h_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & -2x_N & -2y_N & -2h_N \end{bmatrix}, Z_R = \begin{bmatrix} R_1^2 - L_1^2 \\ R_2^2 - L_2^2 \\ \dots \\ R_N^2 - L_N^2 \end{bmatrix}.$$

Формулы (9)–(11) позволяют очень просто использовать все возможные результаты оценки разностей расстояний, отношения принятых мощностей (4) или их нормированные к сумме разности (5) количеством $0,5N(N-1)$ или N величин, описываемых формулой (3). Несмотря на то, что ряд оценок коррелированы и не приносят выигрыша в точности определяемых координат, они существенно повышают устойчивость решения задачи при пропуске ряда оценок, или при аномальных ошибках, что является существенным преимуществом предлагаемого подхода. В качестве примера приведем вид соответствующих матриц для трехпозиционной системы

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ \sqrt{Q_{12}} & -1 & 0 \\ \sqrt{Q_{13}} & 0 & -1 \\ 0 & \sqrt{Q_{23}} & -1 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1+k_{12} & k_{12}-1 & 0 \\ 1+k_{13} & 0 & k_{13}-1 \\ 0 & 1+k_{23} & k_{23}-1 \end{bmatrix},$$

$$B^T = \|\Delta R_{12}, \Delta R_{13}, \Delta R_{23}, R_0 \sqrt{P_o/P_1}, R_0 \sqrt{P_o/P_2}, R_0 \sqrt{P_o/P_3}\|,$$

$$B^T = \|\Delta R_{12}, \Delta R_{13}, \Delta R_{23}, 0 \ 0 \ 0\|.$$

При определении значений двух разностей расстояний и двух отношений мощностей сигналов получим следующие выражения для наклонных дальностей:

$$R_1 = \frac{\Delta R_{12}(1 - \sqrt{Q_{12}}) + \Delta R_{13}(1 - \sqrt{Q_{13}})}{Q_{12} + Q_{13} - 2(\sqrt{Q_{12}} + \sqrt{Q_{13}} - 1)},$$

$$R_2 = \frac{\Delta R_{13}(1 + \sqrt{Q_{12}} - \sqrt{Q_{13}} - \sqrt{Q_{12}}\sqrt{Q_{13}}) - \Delta R_{12}(1 - 2(\sqrt{Q_{12}} + \sqrt{Q_{13}} - Q_{12}) + Q_{13})}{2(Q_{12} + Q_{13} - 2(\sqrt{Q_{12}} + \sqrt{Q_{13}} - 1))},$$

$$R_3 = \frac{\Delta R_{12}(1 - \sqrt{Q_{12}} + \sqrt{Q_{13}} - \sqrt{Q_{12}}\sqrt{Q_{13}}) - \Delta R_{13}(1 - 2(\sqrt{Q_{12}} + \sqrt{Q_{13}} - Q_{13}) + Q_{12})}{2(Q_{12} + Q_{13} - 2(\sqrt{Q_{12}} + \sqrt{Q_{13}} - 1))}.$$

При наличии только одного результата оценки разности расстояний ΔR_{12} и двух значений отношений мощности сигналов Q_{12} и Q_{23} соответствующие дальности равны

$$R_1 = \Delta R_{12}(\sqrt{Q_{12}} + 1)/(1 - Q_{12}), R_2 = \Delta R_{12}(Q_{12} + \sqrt{Q_{12}})/(1 - Q_{12}), R_3 = \Delta R_{12}\sqrt{Q_{13}}(1 + \sqrt{Q_{12}})/(1 - Q_{12}).$$

Если присутствуют оценки результатов двух разностей расстояний ΔR_{12} , ΔR_{13} и Q_{12} то получим:

$$R_1 = \Delta R_{13}(\sqrt{Q_{13}} + 1)/(1 - Q_{13}), R_2 = \Delta R_{13}(\sqrt{Q_{13}} + 1)/(1 - Q_{13}) - R_{12}, R_3 = \Delta R_{13}(Q_{13} + \sqrt{Q_{13}})/(1 - Q_{13}).$$

Данные формулы показывают возможность косвенного измерения всех трех дальностей при пропуске ряда значений результатов контроля. При отношениях мощностей, равных единице, решения не существует, что следует из специфики окружностей Аполлония.

При этом следует учесть, что при проведении дальнейших исследований для косвенного измерения должны быть исследованы и аттестованы его метрологические характеристики с использованием разработанных в ГосНИИ ГА применительно для авиационной деятельности методических подходов [17–20] и организационных основ [21]. Аттестация необходима для установления допускаемых значений суммарной погрешности косвенного измерения и входящих в нее составляющих.

При трех приемных позициях высоту полета ВС можно определить как $H = \sqrt{R_o^2 - (X^2 + Y^2)}$, либо используя найденные прямоугольные координаты как начальное приближение для решения задачи определения местоположения численными методами.

На рис. 2 приведены средние квадратические ошибки (СКО) определения местоположения ИРИ в трехпозиционной МПСН, полученные путем имитационно-статистического моделирования при различных горизонтальных дальностях $R_{Г}$ от начала координат. СКО местоположения ИРИ определялась по зависимости $\sigma_{MP} = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2}$, где: σ_X , σ_Y – СКО определения прямоугольных координат. СКО определения местоположения на рис. 2 обозначено цифрами: 1 и 2 – при использовании отношений мощностей сигналов, определяемых формулами (4) и (5); 3 – при использовании в решении формулы (3).

На рис. 3 СКО определения высоты обозначены следующими цифрами: на рис. 3 а) 1, 2, 3 – при использовании формул (3)–(5); на рис. 3 б): 1 – при использовании формулы (3), 2, 3 – при использовании формул (4), (5) соответственно.

На оценку мощности принятого сигнала существенно влияют условия распространения радиоволн. Интерференционный множитель (множитель влияния Земли) приводит к осцилляции сигналов на раскрые приемной антенны, что приводит к отклонению мощностей сигналов от

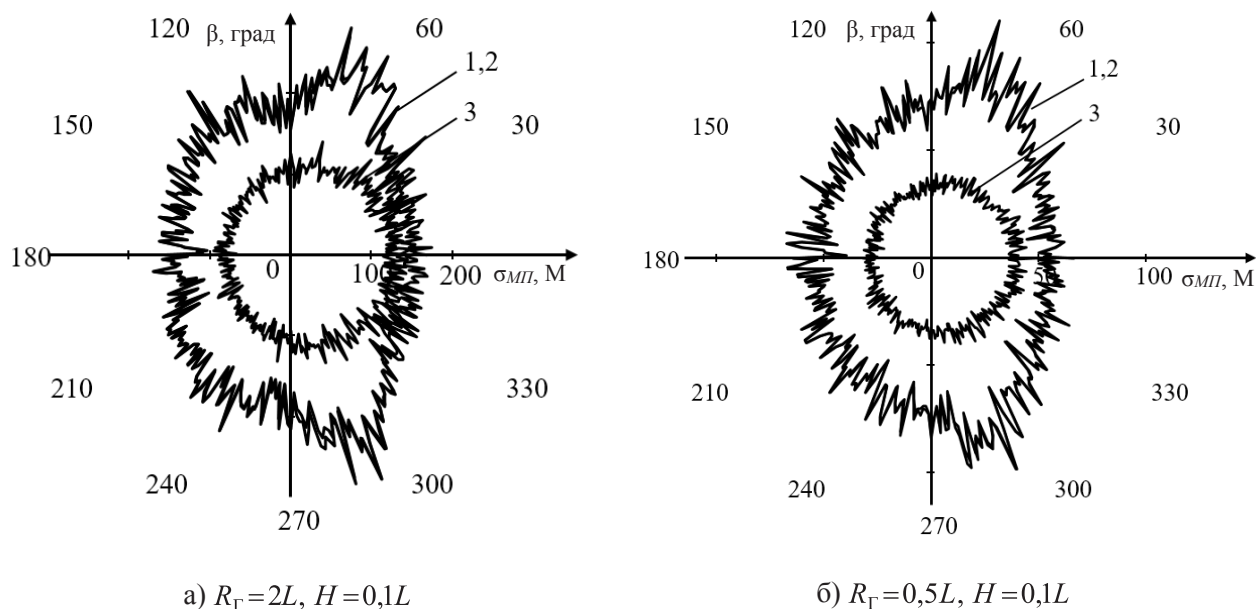


Рис. 2. СКО определения местоположения ИРИ

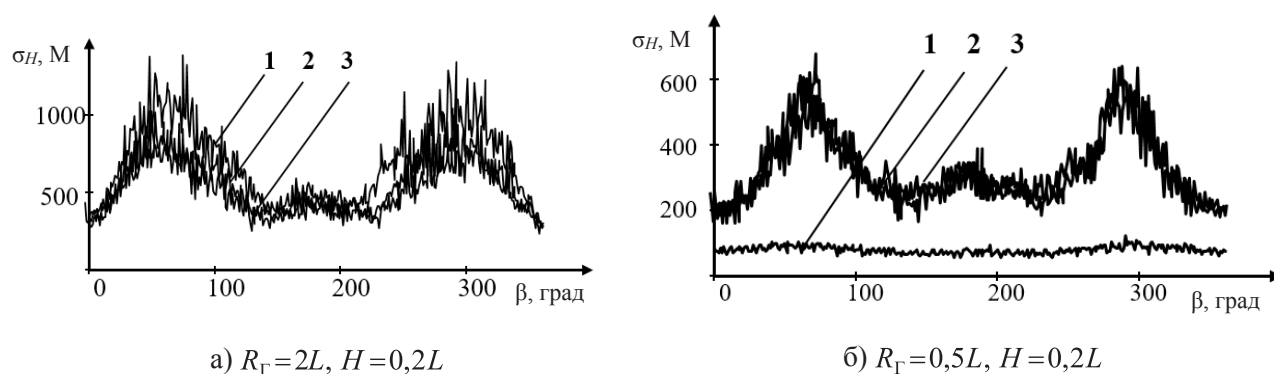


Рис. 3. СКО определения высоты ИРИ

описываемых формулой (2), а это в свою очередь приводит к смещению оценок (3)–(5). Интерференционный множитель Земли определяется формулой $|\Phi_i| = \sqrt{1 + |\rho|^2 + 2|\rho|\cos(2\pi\Delta r/\lambda + \varphi)}$, где $|\rho|$ – модуль коэффициента отражения; φ – фаза коэффициента отражения, учитывающая изменение фазы сигнала при отражении; Δr – разность расстояний: $\Delta r = \sqrt{R_{\Gamma}^2 + (H - h_i)^2} - \sqrt{R_{\Gamma}^2 + (H + h_i)^2}$.

На рис. 4 приведены координаты ИРИ при различных условиях их оценки. Цифрами на рис. 4 обозначено: 1 – истинные координаты ИРИ; 2 и 3 – координаты ИРИ, полученные с использованием формул (4), (5); 4 – с использованием формулы (3). Анализ данных рисунков показывает, что с увеличением частоты существенно возрастает ошибка определения координат вследствие интерференции радиоволн и достигает единиц и десятков километров. На рисунке 4 г) высота фазовых центров антенн приемных позиций уменьшена в пять раз по сравнению с другими примерами. Приемлемая точность определения координат достигается при нахождении целей под малыми углами места и локации ИРИ, излучающих на низкой частоте.

Дальнейшие исследования целесообразно направить на способы высокоточного оценивания мощности колебаний, отбраковки аномальных результатов, определения тех параметров, внесение которых в решение даст существенные ошибки. Использование для приема сигналов разнесенных по вертикали антенн [22, 23] с последующим расчетом средних арифметических

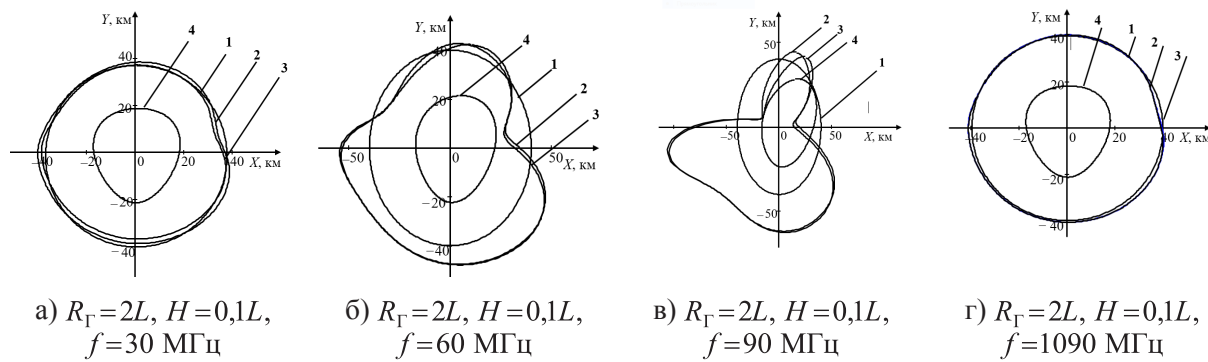


Рис. 4. СКО определения координат ИРИ при различных условиях измерений

результатов или выбором по какому-либо критерию достоверного значения позволит снизить ошибку, вызванную интерференцией радиоволн.

Заключение

Получены выражения для определения наклонных дальностей до ИРИ и его прямоугольных координат по результатам оценки разностей расстояний и мощности принятых колебаний. Показана возможность определения всех прямоугольных координат ИРИ в трехпозиционной системе пассивной локации. Предложенный способ позволяет определять координаты ИРИ при пропуске ряда значений оценок разности расстояний и мощности сигналов. Определение местоположения наиболее достоверно при малых углах места ИРИ.

Дальнейшим развитием предложенного авторами статьи способа может являться исследование применимости разнесенных по высоте антенн с последующим осреднением мощности колебаний, применением методов отбраковки аномальных результатов, вызванных многолучевым распространением радиоволн, выбором времени накопления сигналов. Размещение ряда приемных позиций на беспилотных летательных аппаратах позволит разделить прямой и переотраженный сигналы по времени и добиться повышения точности принимаемого решения.

Список источников

1. Черняк В. С. Многопозиционная радиолокация. Москва: Радио и связь, 1993. 416 с.
2. Кондратьев В. С., Котов А. Ф., Марков Л. Н. Многопозиционные радиотехнические системы. Москва: Радио и связь, 1986. 264 с.
3. Mantilla-Gaviria I. A., Leonardi M., Galati G. and Balbastre-Tejedor J. V., Localization algorithms for multilateration (MLAT) systems in airport surface surveillance, *Signal, Image and Video Processing*, 2015, vol. 9, no. 7, pp. 1549–1558.
4. Leonardi M., Mathias A., Galati G., *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2009, 1(3), pp. 223–229. <https://doi.org/10.1017/S1759078709000245>
5. Прохоров А. В., Столяров Г. В., Бондарь Д. С. Анализ состояния и оценка возможности реализации средств многопозиционных систем наблюдения для аэродромных АС УВД // Научный вестник МГТУ ГА. 2013. № 193. С. 63–69.
6. Elgamoudi A., Benzerrouk H., Elango G.A., Landry R. Jr., *Applied Sciences*, 2021, 11, 6079. <https://doi.org/10.3390/app11136079>
7. Кондратьев В. С., Кондрашов Я. В., Фиалкина Т. С. Концепции применения принципа многопозиционности в радиосистемах обеспечения навигационно-посадочных операций воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2011. № 164. С. 86–92.

8. Товкач И. О., Жук С. Я. Рекуррентный алгоритм пассивной локации в сенсорной сети на основе измерения мощности принимаемого сигнала // Телекомунікації, радіолокація, радіонавігація та електроакустика. Вісник Національного технічного університету України «КПІ». Серія Радіотехніка. Радіоапаратобудування. 2016. № 66. С. 46–55.
9. Сытенский В. Д. Пассивная локация на основе амплитудных измерений // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2011. Вып. 1. С. 69–76.
10. Булычев Ю. Г., Ивакина С. С., Мозоль А. А., Насенков И. Г. Анализ модификации энергетического метода пассивной дальнометрии // Автометрия. 2016. Т. 52. № 1. С. 37–44.
11. Булычев Ю. Г., Насенков И. Г., Ячменев А. В. Амплитудно-гиперболический метод пассивной локации источника излучения // Автометрия. 2018. Т. 54. № 4. С. 43–50.
12. Булычев Ю. Г., Мозоль А. А., Кондрашов А. Г., Ячменев А. В., Раду П. Ю., Браславцев А. С. Квазиоптимальный метод многопозиционной пассивной координатометрии с учетом интерференции // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 2. С. 1–17. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/feb19/2/text.pdf> (дата обращения: 24.10.2022).
13. Евдокимов Ю. Ф., Медведев В. П. Амплитудная система определения местоположения источников излучения с использованием метода наименьших квадратов и исследование ее точности // Телекоммуникации. 2003. № 11. С. 34–37.
14. Уфаев В. А., Афанасьев В. И., Разиньков С. П. Оценка координат источника радиоизлучения на основе измерений амплитуды электромагнитного поля // Радиотехника. 2003. № 10. С. 71–73.
15. Аргунов Б. И., Балк М. Б. Геометрические построения на плоскости: Пособие для студентов педагогических вузов. Москва: Учпедгиз, 1957. 267 с.
16. Борисов Е. Г. Совместная обработка измерений в дальномерно-доплеровской многопозиционной радиолокационной системе // Научный вестник МГТУ ГА. 2020. Том 23. № 2. С. 8–19. <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2020-23-2-8-19>
17. Богоявленский А. А. О результатах исследования точностных характеристик косвенных методов контроля параметров авиадвигателей // Диагностика, информатика, метрология (ДИМ-95): тез. докл. междунар. науч.-техн. конф. Санкт-Петербург: С-Петерб. электротехн. ун-т, 1995. С. 197.
18. Богоявленский А. А. Методология и практика обеспечения единства измерений при эксплуатации наземных автоматизированных систем контроля бортового оборудования воздушных судов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2021. № 37. С. 31–41.
19. Богоявленский А. А., Боков А. Е. Метрологическая аттестация методики измерения поля температур газов за турбиной при испытаниях двигателей РУ-19А-300 после ремонта // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2014. № 4(315). С. 86–93.
20. Богоявленский А. А. К вопросу о достоверности оценки коэффициентов аэродинамического подобия боксов испытательных стендов мотороиспытательных станций авиационных ГТД // Авиакосмическое приборостроение. 2016. № 11. С. 52–56.
21. Богоявленский А. А., Ермолаева О. Л. Об организации и проведении работ по обеспечению единства измерений на воздушном транспорте // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2012. № 2(313). С. 24–29.
22. Леонов А. И., Фомичев К. И. Моноимпульсная радиолокация. Москва: Радио и связь, 1984. 312 с.
23. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений. Изд. 2-е, переработанное, дополненное. Москва: Советское радио, 1970. 728 с.

References

1. Chernyak V. S., *Mnogopozitsionnaya radiolokatsiya [Multiposition radar]*, Moscow, Radio i svyaz` Publ., 1993, 416 p. (In Russ.)
2. Kondratiev V. S., Kotov A. F., Markov L. N., *Mnogopozitsionnye radiotekhnicheskie sistemy [Multiposition radio systems]*, Moscow, Radio i svyaz` Publ., 1986, 264 p. (In Russ.)

3. Mantilla-Gaviria I. A., Leonardi M., Galati G. and Balbastre-Tejedor J. V., Localization algorithms for multilateration (MLAT) systems in airport surface surveillance, *Signal, Image and Video Processing*, 2015, vol. 9, no. 7, pp. 1549–1558.
4. Leonardi M., Mathias A., Galati G., *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2009, 1(3), pp. 223–229. <https://doi.org/10.1017/S1759078709000245>
5. Prokhorov A. V., Stolyarov G. V., Bondar D. S., The analysis of the condition and estimation of possibility of realization of means of multilateration systems for automated systems of air traffic management for airports, *Scientific Bulletin of MSTU CA*, 2013, no. 193, pp. 63–69. (In Russ.)
6. Elgamoudi A., Benzerrouk H., Elango G.A., Landry R. Jr., *Applied Sciences*, 2021, 11, 6079. <https://doi.org/10.3390/app11136079>
7. Kondratiev V. S., Kondrashov Ya. V., Fialkina T. S., Concepts of application the principle multipositionality in maintenance radio systems navigating-landing operations of aircrafts, *Scientific Bulletin of MSTU CA*, 2011, no. 164, pp. 86–92. (In Russ.)
8. Tovkach I. O., Zhuk S. Ya., Rekurrentnyj algoritm passivnoj lokatsii v sensornoj seti na osnove izmereniya moshchnosti prinimaemogo signala, *Telekommunikatsii, radiolokatsiya, radionavigatsiya ta elektroakustika, Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu Ukraini, Seriya Radiotekhnika. Radioapparatobuduvannya*, 2016, no. 66, pp. 46–55. (In Russ.)
9. Sytenkij V. D., Passivnaya lokatsiya na osnove amplitudnykh izmerenij, *Izvestiya vuzov Rossii, Radioelektronika*, 2011, issue 1, pp. 69–76. (In Russ.)
10. Bulychev Yu. G., Ivakina S. S., Mozol' A. A., Nasenkov I. G., *Optoelectron.Instrument.Proc.*, 2016, vol. 52, no. 1, pp. 30–36. <https://doi.org/10.3103/S8756699016010052>
11. Bulychev Yu. G., Nasenkov I. G., Yachmenev A. V., *Optoelectron.Instrument.Proc.*, 2018, vol. 54, no. 4, pp. 355–360. <https://doi.org/10.3103/S8756699018040064>
12. Bulychev Yu. G., Mozol' A. A., Kondrashov A. G., Yachmenev A. V., Radu P. Yu., Braslavtsev A. S., Quasi-optimal method of multiposition passive coordinate measurement with account of interference, *Journal of Radio Electronics* [online journal], 2019, no. 2, pp. 1–17. (In Russ.) <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2019.2.2>
13. Evdokimov Yu. F., Medvedev V. P., Amplitudnaya sistema opredeleniya mestopolozheniya istochnikov izlucheniya s ispol'zovaniem metoda naimen'shikh kvadratov i issledovanie ee tochnosti, *Telekommunikatsii*, 2003, no. 11, pp. 34–37. (In Russ.)
14. Ufaev V. A., Afanas'ev V. I., Razinkov S. P., Otsenka koordinat istochnika radioizlucheniya na osnove izmerenij amplitudy ehlektromagnitnogo polya, *Radiotekhnika*, 2003, no. 10, pp. 71–73. (In Russ.)
15. Argunov B. I., Balk M. B., *Geometricheskie postroeniya na ploskosti: Posobie dlya studentov pedagogicheskikh vuzov [Geometrical constructions on the plane: Manual for students of pedagogical universities]*, Moscow, Uchpedgiz Publ., 1957, 267 p. (In Russ.)
16. Borisov E. G., Joint processing of measurements in a rangefinder-doppler multistatic radar system, *Civil Aviation High Technologies*, 2020, vol. 23, no. 2, pp. 8–19. (In Russ.) <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2020-23-2-8-19>
17. Bogoyavlenskiy A. A., O rezul'tatakh issledovaniya tochnostnykh kharakteristik kosvennykh metodov kontrolya parametrov aviadvigatelej, *Diagnostika, informatika, metrologiya, Tezisy dokladov mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii*, Saint Petersburg, Saint Petersburg Electrotechnical University, 1995, p. 197. (In Russ.)
18. Bogoyavlenskiy A. A., Methodology and practice of ensuring the uniformity of measurements in the operation of ground-based automated verification systems of aircraft on-board, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2021, no. 37, pp. 31–41. (In Russ.)
19. Bogoyavlenskiy A. A., Bockov A. E., Metrological attestation of methods of measuring fields of temperature of gases at the turbine when testing the engines RU-19A-300 after repair, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2014, no. 4, pp. 86–93. (In Russ.)
20. Bogoyavlenskiy A. A., K voprosu o dostovernosti otsenki koehffitsientov aehrodinamicheskogo podobiya boksov ispytatel'nykh stendov motoroispytatel'nykh stantsij aviatsionnykh GTD, *Aviakosmicheskoe priborostroenie*, 2016, no. 11, pp. 52–56. (In Russ.)

21. Bogoyavlenskiy A. A., Ermolaeva O. L., On the organization and conduct of work to ensure the uniformity of measurements in air transport, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2012, no. 2(313), pp. 24–29. (In Russ.)
22. Leonov A. I., Fomichev K. I., *Monoimpul'snaya radiolokatsiya [Monopulse radar]*, Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1984, 312 p. (In Russ.)
23. Fink L. M., *Teoriya peredachi diskretnykh soobshchenij [Theory of transmission of discrete messages]*, Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1970, 728 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Борисов Евгений Геннадьевич, доктор технических наук, доцент, начальник научно-исследовательского центра, Научно-производственная компания «Технологии. Инвестиции. Менеджмент», Санкт-Петербург, Россия, info@nprk-tim.ru

Шестаков Иван Николаевич, доктор технических наук, доцент, ученый секретарь, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, shestakovin@gosniiga.ru

Authors information

Borisov Evgeniy G., Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Head of Research Center, Scientific and Production Company “Technologies. Investments. Management”, Saint Petersburg, Russia, info@nprk-tim.ru

Shestakov Ivan N., Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Scientific Secretary, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, shestakovin@gosniiga.ru

Статья поступила в редакцию 02.09.2022; одобрена после рецензирования 17.10.2022; принята к публикации 25.10.2022.
The article was submitted 02.09.2022; approved after reviewing 17.10.2022; accepted for publication 25.10.2022.

Научная статья
УДК 519.711:629.735.07

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СКОРОПОДЪЕМНОСТИ САМОЛЕТОВ АН-26 ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ НАРУЖНОГО ВОЗДУХА НИЖЕ СТАНДАРТНОЙ АТМОСФЕРЫ

Г. Е. МАСЛЕННИКОВА^{1,2}, С. В. ДМИТРИЕВА², Р. Р. ТАЖЕТДИНОВ²

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

² *Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия*

Аннотация. В статье описаны результаты моделирования характеристик набора высоты самолетов Ан-26 в условиях температур наружного воздуха ниже стандартной атмосферы (СА). В эксплуатационной документации самолета отсутствуют данные о фактических параметрах набора высоты для диапазона температур ниже СА, в связи с чем оценка характеристик этого типа воздушных судов (ВС) для процедуры сертификации экземпляра ВС не может быть обоснованно достоверной без создания модели типового изменения характеристик в условиях температур наружного воздуха ниже СА. Моделирование выполнено по результатам обработки данных 81 набора высоты 46 экземпляров Ан-26, находящихся в эксплуатации. Моделируются типовые значения скороподъемности, так как именно этот параметр прямо пропорционален тяговооруженности самолета. Используемая структура модели согласуется с физическими связями скороподъемности с независимыми переменными – взлетной массой, температурой, высотой. Полученные значения коэффициентов модели отличаются большей степенью устойчивости, описывают исходный массив экспериментальных данных со стандартной ошибкой, существенно меньшей, чем погрешность определения величины скороподъемности по данным МСРП-12. Полученная модель может быть рекомендована для расчета полета при предполетной подготовке, а также для сравнения характеристик экземпляра ВС с типовыми значениями в условиях температур наружного воздуха ниже СА.

Ключевые слова: стандартная атмосфера, скороподъемность, тяга, лобовое сопротивление, взлетный вес, статистические характеристики, моделирование, t-статистики коэффициентов модели

Для цитирования: Масленникова Г. Е., Дмитриева С. В., Тажетдинов Р. Р. Математическая модель скороподъемности самолетов Ан-26 при температурах наружного воздуха ниже стандартной атмосферы // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 40. С. 52–59.

AIRCRAFT AN-26 CLIMB RATE MODEL AT TEMPERATURES BELOW STANDARD AIR TEMPERATURES

G. E. MASLENNIKOVA^{1,2}, S. V. DMITRIEVA², R. R. TAZHETDINOV²

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

² *The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia*

Abstract. The article describes the results of modeling the climb characteristics of An-26 aircraft in air temperatures below the standard atmosphere. In the operational documentation of the aircraft there is no data on the actual parameters of climb for the temperature range below the standard atmosphere, and therefore the

assessment of the characteristics of this type of aircraft for the certification procedure of the aircraft instance cannot be reasonably reliable without creating a model of a typical change in characteristics in air temperatures below the standard atmosphere. The simulation was carried out based on the results of processing data from 81 climb of 46 An-26 aircraft in operation. Typical values of climb rate are simulated, since it is this parameter that is directly proportional to the thrust-armed aircraft. The used structure of the model is consistent with the physical connections of the climb rate with independent variables - takeoff weight, temperature, altitude. The obtained values of the model coefficients are distinguished by a high degree of stability, describe the initial array of experimental data with a standard deviation significantly less than the error in determining the rate of climb according to the MSRP-12 data. The obtained model can be recommended for flight calculation during pre-flight preparation, as well as for comparison of characteristics of aircraft with typical values at ambient air temperatures below standard air temperatures.

Keywords: standard atmosphere, climb rate, thrust, drag, take-off weight, statistical characteristics, modeling, t-statistics of model coefficients

For citation: Maslennikova G. E., Dmitrieva S. V., Tazhetdinov R. R., Aircraft An-26 climb rate model at temperatures below standard air temperatures, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 40, pp. 52–59. (In Russ.)

Введение

Документом, регламентирующим поддержание летной годности и безопасности полетов, являются Федеральные авиационные правила (ФАП-519) [1], где в приложении № 2 в частности указано:

«5. Летные характеристики ВС по данным средств объективного контроля должны соответствовать характеристикам, указанным в руководстве по летной эксплуатации ВС.

6. ВС должно быть оборудовано в соответствии с эксплуатационной документацией и обеспечено эксплуатационной документацией для полетов в заявленных условиях навигации».

То есть соответствие летных характеристик ВС характеристикам, указанным в руководстве по летной эксплуатации (РЛЭ), является одним из требований, предъявляемых к летной годности ВС. При этом подразумевается, что соответствие должно устанавливаться не качественной, а количественной оценкой, получение которой в ряде случаев, особенно для не сертифицированной авиационной техники, разработанной в 70-х и 80-х годах прошлого века, является непростой задачей. Как правило, для такой техники в соответствующих разделах РЛЭ вопреки п. 6 современных ФАП не приведены типовые (расчетные) характеристики ВС в условиях температур наружного воздуха ниже СА, так как в то время считалось, что раз тяговые характеристики при пониженной температуре лучше, чем в условиях СА, значит и приводить их в эксплуатационной документации (ЭД) необязательно. По этому принципу построены данные РЛЭ самолетов Ан-24 и Ан-26 [2, 3].

Получение количественных оценок соответствия для всего диапазона фактических условий эксплуатации требует знания типовых характеристик во всем диапазоне температур наружного воздуха. При этом использование методик приведения, ориентированных исключительно на изменение плотности воздуха, не всегда позволяет получить объективную оценку, так как линейность зависимости характеристик от изменения условий нарушается при наличии автоматики, ограничивающей мощность двигателей. Эти ограничения хорошо демонстрируют таблицы нормируемых часовых расходов топлива для различных внешних условий [4] для двигателей АИ-24ВТ, которыми оборудованы самолеты Ан-26. Из табл. 1, где $V_{\text{пр.испр}}$ – приборная скорость полета по указателю скорости с учетом инструментальной поправки, $t_{\text{пр.испр}}$ – температура наружного воздуха по указателю температуры с учетом инструментальной поправки, видно, что как в условиях положительных температур наружного воздуха ниже линии I-I, так

и в условиях отрицательных температур выше линии II-II присутствует автоматическое ограничение мощности путем ограничения часового расхода топлива. При этом линейность зависимости часовых расходов топлива (а следовательно и мощности двигателей) от температуры, наблюдаемая при небольших отклонениях температуры наружного воздуха от СА, нарушается.

Таблица 1

Нормы расхода топлива, [кг/ч], самолета Ан-26 на максимальном режиме работы двигателей на высоте $H = 5000$ м [4]

$t_{\text{пр.испр}},$ °С	$V_{\text{пр.испр}},$ км/ч															
	200	220	240	260	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460	480	500
–18 и ниже	473	476	478	481	484	487	490	494	497	501	505	509	513	518	522	527
–16	473	476	478	481	484	484	486	488	491	496	501	506	512	518	522	527
–14	467	470	472	474	475	477	479	481	484	488	493	499	505	512	519	527
–12	460	463	465	467	468	470	472	474	477	481	486	492	498	505	512	519
–10	453	455	457	459	461	463	464	467	470	474	479	484	491	498	505	512
–8	446	448	450	452	453	455	457	460	463	467	472	478	484	490	497	504
–6	439	441	443	445	446	448	451	453	456	460	465	471	477	483	490	497
–4	432	434	436	438	440	442	444	446	449	454	459	464	470	476	483	490
–2	425	427	429	431	433	435	437	439	442	446	451	457	463	469	476	483
0	418	421	423	425	426	428	430	433	436	440	445	450	456	462	468	475
+2	411	414	416	418	420	422	424	426	429	433	438	443	449	455	461	468
+4	404	407	409	411	413	415	418	420	423	437	432	427	442	448	454	461
+6	398	401	403	405	407	409	411	413	416	420	425	430	435	441	447	454
+8	392	394	396	398	400	402	404	407	409	413	418	423	428	434	440	447
+10	385	388	390	392	394	396	398	400	403	407	411	416	421	427	434	441
+12	379	382	384	385	387	390	392	394	396	400	404	409	414	420	427	434
+14	373	375	377	379	381	383	385	387	390	393	398	403	408	414	420	427
+16	367	369	371	373	375	377	379	382	385	388	392	396	401	407	414	421
+18	365	367	370	372	374	377	379	382	385	388	391	394	398	402	407	414
+20	365	367	370	372	374	377	379	382	385	388	391	394	398	402	406	410
+22	365	367	370	372	374	377	379	382	385	388	391	394	398	402	406	410

Это создает определенные трудности для разработки методики оценивания, нечувствительной к изменению внешних условий. Данные по характеристикам набора высоты в условиях положительного отличия температуры от СА в РЛЭ приведены и используются в методике оценивания [5], однако данные аэродинамического расчета в области отрицательного отличия температур наружного воздуха от СА в РЛЭ отсутствуют. Это обуславливает необходимость разработки математической модели типовых характеристик набора высоты самолета Ан-26 в условиях температур наружного воздуха ниже СА для обеспечения возможности оценки характеристик во всех заявленных условиях эксплуатации в соответствии с требованиями ФАП-519.

Исходные материалы для моделирования скороподъемности Ан-26

Для разработки математической модели использовались статистические данные по результатам оценки характеристик набора высоты самолетов Ан-26, полученные при

выполнении облетов по специально разработанной программе [6] в 85 полетах 41 экземпляра самолетов Ан-26. В магнитном самописце режимов полета МСРП-12-96, которым оборудованы самолеты типа Ан-26, преобразование электрического сигнала основано на записи калибровочных значений минимального и максимального напряжения. Величины напряжений варьируются в широком диапазоне при изменениях режима работы двигателей, температуры и высоты. Вследствие этого непрерывный аналоговый сигнал с прибора ДВБП-13 (ДВБП-15), регистрирующего барометрическую высоту, при преобразовании в импульсную форму содержит сильно зашумленную информацию. Получение значения скороподъемности V_y путем непосредственного дифференцирования записи барометрической высоты естественно увеличивает уровень шума (рис. 1). Для уменьшения уровня зашумленности значение скороподъемности V_y определялось путем дифференцирования барограммы набора, построенной на основе записи барометрической высоты и сглаженной полиномом второй степени (рис. 1, 2).

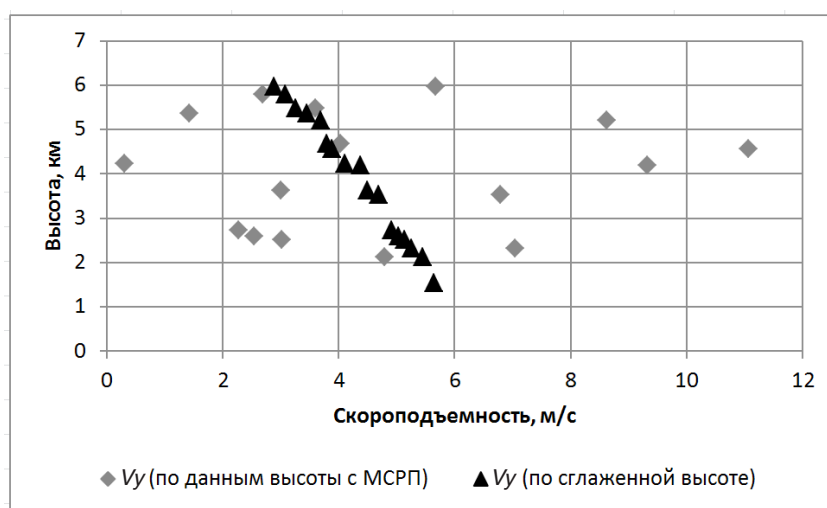


Рис. 1. Скороподъемность в наборе высоты

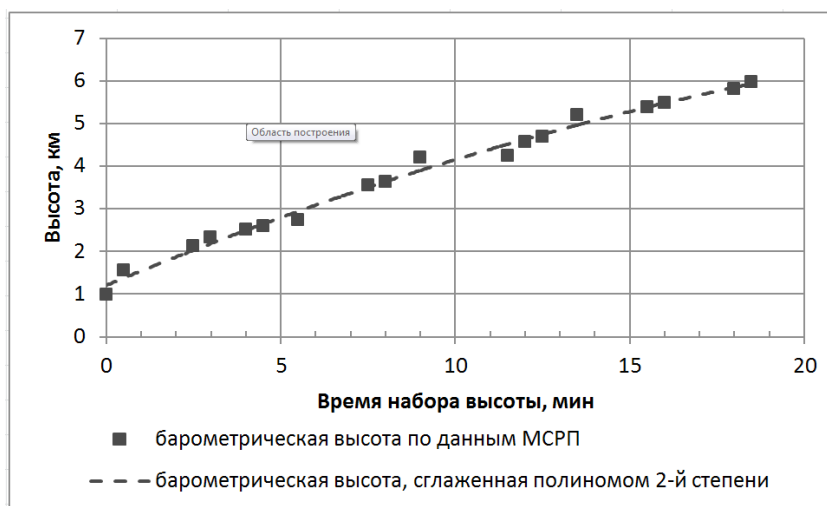


Рис. 2. Аппроксимация барограммы набора высоты полиномом второй степени для получения значения V_y

Такой подход позволил существенно сократить стандартное отклонение фактической скороподъемности от смоделированных данных (см. рис. 1). Анализируемый массив состоял из

1013 точек. Полеты выполнены при средних температурах наружного воздуха в процессе выполнения набора высоты от $CA+10^\circ$ до $CA-29^\circ$, в диапазоне высот от $H=0,8$ км до $H=6,2$ км, при взлетных массах от 19,4 до 24,6 т.

Структура модели скороподъемности в наборе высоты Ан-26

Принятыми показателями оценивания характеристик набора высоты [7] являются скороподъемность V_y , время набора и расход топлива в наборе высоты. Однако из трех перечисленных показателей два (время и расход топлива) являются интегральными, и, следовательно, величина их зависит не только от условий выполнения набора, но и от времени, в течение которого он выполнялся. А так как для любой интегральной величины свойственно накопление ошибок при увеличении времени интегрирования, то суммарная ошибка оценивания может увеличиваться по мере увеличения диапазона высот, в котором выполнен набор. В то же время скороподъемность самолета, которая в полете определяется как

$$V_y = \frac{\Delta H}{\Delta t},$$

где ΔH – изменение высоты полета [м]; Δt – время изменения высоты на величину ΔH [с], пропорциональна величине избыточной тяги, и при полете с постоянной скоростью и допущении о малом значении угла наклона траектории определяется в скоростной системе координат как

$$V_y = \frac{P-Q}{G} V,$$

где P – суммарная тяга двигателей; Q – лобовое сопротивление планера; G – вес самолета, V – истинная скорость полета.

Таким образом, при заданной скорости полета скороподъемность зависит только от фактических характеристик тяговооруженности и не связана с продолжительностью выполнения режима и существенно лучше подходит для построения модели типовой характеристики по массиву экспериментальных данных.

В дозвуковом диапазоне скоростей лобовое сопротивление планера при постоянной скорости полета можно считать величиной постоянной, таким образом, при выборе структуры искомой модели целесообразно отталкиваться только от зависимости тяги от условий полета (высота, температура, полетная масса).

Нелинейность зависимости тяги силовой установки от высоты полета, как правило, описывается полиномом второй степени, а наиболее простая (и соответственно наиболее устойчивая) структура модели зависимости скороподъемности от параметров полета должна содержать следующие независимые переменные:

- квадрат высоты полета – H^2 [км];
- полетная масса M [т];
- отличие фактической температуры наружного воздуха от условий CA ΔT [°C].

Результаты моделирования скороподъемности в наборе высоты Ан-26

При помощи стандартного пакета прикладных программ анализа данных [8] по исследуемому массиву, содержащему 1013 экспериментальных точек, получена следующая модель скороподъемности самолета Ан-26 для оценки соответствия типовым основным летным характеристикам:

$$V_y = 20,04 - 0,1423H^2 - 0,5946M - 0,0373\Delta T. \quad (1)$$

Статистические характеристики полученной модели приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Регрессионная статистика модели (1)

Множественный R	0,94
R-квадрат	0,88
Нормированный R-квадрат	0,88
Стандартная ошибка	0,64
Наблюдения	1013

Таблица 3

Статистические характеристики коэффициентов модели

Характеристика	Коэффициенты	Стандартная ошибка	t-статистика	P-Значение
Y-пересечение	20,04	0,39	51,62	$2,2 \cdot 10^{-285}$
Переменная H^2	-0,14	0,00	-71,22	0
Переменная M	-0,59	0,02	-33,30	$1,1 \cdot 10^{-164}$
Переменная Δt	-0,04	0,00	-18,67	$4,6 \cdot 10^{-67}$

Из данных, приведенных в табл. 2 и 3, следует, что 94 % изменений типовых значений скороподъемности при изменениях высоты, температуры и полетной массы описывается полученной моделью (1) с величиной стандартной ошибки оценки 0,64 м/с.

При этом вероятные диапазоны изменения величины полученных коэффициентов в десятки раз меньше величины самих коэффициентов (t-статистика), а стандартная ошибка (0,64 м/с) существенно меньше погрешности определения величины V_y по данным записи МСРП-12 (см. рис. 1). Таким образом, полученную модель, на основании того принципа, что только внешние критерии, основанные на новой информации, позволяют найти истинную модель объекта, скрытую в зашумленных данных [9], можно считать истинной моделью скороподъемности самолета Ан-26 в условиях температур наружного воздуха ниже СА.

Типовое время набора высоты в температурных условиях ниже СА получается путем суммирования значений типового времени на каждом участке ΔH при наборе высоты с типовой скороподъемностью V_y в этом диапазоне высот.

Оценки времени набора высоты самолетов Ан-26, выполненные по относительному показателю, полученному на основе модели (1) в комплексе с моделью скороподъемности, построенной на основе данных РЛЭ в условиях положительных отличий температуры от СА, не имеют значимых коэффициентов корреляции с изменениями температуры. Таким образом, оценки, основанные на использовании данных РЛЭ и разработанной модели (1) для диапазона отрицательных отличий температуры от СА, позволяют оценивать характеристики набора высоты вне зависимости от температурных условий наружного воздуха при выполнении контрольных облетов.

Заключение

На основе массива данных, образованного по результатам оценки основных летных характеристик ВС в эксплуатации, авторами получена математическая модель типовых характеристик набора высоты самолетов Ан-26, которая позволяет выявлять отклонения от типовых значений скороподъемности в температурных условиях ниже СА независимо от полетной массы, температуры и высоты набора.

Список источников

1. Федеральные авиационные правила «Требования к летной годности гражданских воздушных судов. Форма и порядок оформления сертификата летной годности гражданского воздушного судна. Порядок приостановления действия и аннулирования сертификата летной годности гражданского воздушного судна» утверждены приказом Минтранса РФ от 27.11.2020 № 519. С изменениями и дополнениями от 13 июля, 22 ноября 2021 г. 22 с.
2. Руководство по летной эксплуатации самолета Ан-24 (Ан-24РВ). Москва: Воздушный транспорт, 1995. 538 с.
3. Руководство по летной эксплуатации самолета Ан-26. Москва: Воздушный транспорт, 1992. 506 с.
4. Денисюк В. Н. Авиационный турбовинтовой двигатель Аи-24ВТ. Руководство по эксплуатации и техническому обслуживанию (ред.3). Ростов-на-Дону: ЗАО АНТЦ «Технолог», 2005. 414 с.
5. Арепьев К. А. Моделирование типовых характеристик воздушных судов на базе данных РЛЭ и летных испытаний // Сборник научных трудов ГосНИИ ГА. 2010. № 311. С. 139–144.
6. Масленникова Г. Е. Контроль основных летных характеристик в процедуре поддержания летной годности // Сборник научных трудов ГосНИИ ГА. 2008. № 310. С. 104–109.
7. Арепьев К. А., Дмитриева С. В., Озол И. А. Общие принципы оценки летно-технических характеристик воздушных судов // Сборник научных трудов ГосНИИ ГА. 2008. № 310. С. 139–143.
8. Макарова Н. В., Трофимец В. Я. Статистика в Excel. Москва: Финансы и статистика, 2002. 368 с.
9. Стрижов В. В., Крымова Е. А. Выбор моделей в линейном регрессионном анализе // Информационные технологии. 2011. № 10. С. 21–26.

References

1. Federal Aviation Regulations “Trebovaniya k letnoj godnosti grazhdanskih vozdushnyh sudov. Forma i poryadok oformleniya sertifikata letnoj godnosti grazhdanskogo vozdushnogo sudna. Poryadok priostanovleniya dejstviya i annullirovaniya sertifikata letnoj godnosti grazhdanskogo vozdushnogo sudna” as amended by orders of the Ministry of Transport of the Russian Federation dated 27.11.2020 no. 519, with amendments and additions of July 13, November 22, 2021, 22 p. (In Russ.)
2. An-24 (An-24RV) Flight Manual, Moscow, Vozdushnyj transport Publ., 1995, 538 p. (In Russ.)
3. An-26 Flight Manual, Moscow, Vozdushnyj transport Publ., 1992, 506 p. (In Russ.)
4. Denisyuk V. N., Aviacionnyj turbovintovoj dvigatel' Ai-24VT. Rukovodstvo po ekspluatácii i tekhnicheskomu obsluzhivaniyu (red. 3), Rostov-on-Don, Technolog Publ., 2005, 414 p. (In Russ.)
5. Arepyev K. A., Modelling of typical characteristics of aircraft on database of MFO and flight tests, *Collection of scientific works of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2010, no. 311, pp. 139–144. (In Russ.)
6. Maslennikova G. E., Control of the main flight characteristics in the procedure of maintenance of the flight validity, *Collection of scientific works of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2008, no. 310, pp. 104–109. (In Russ.)
7. Arepyev K. A., Dmitrieva S. V., Ozol I. A., General principles for assessing the flight and technical characteristics of aircraft, *Collection of scientific works of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2008, no. 310, pp. 139–143. (In Russ.)
8. Makarova N. V., Trofimets V. Y., *Statistika v Excel [Statistics in Excel]*, Moscow, Finansy i statistika Publ., 2002, 368 p. (In Russ.)
9. Strizhov V. V., Kryмова E. A., Vybor modelej v linejnom regressionnom analize, *Informacionnye tekhnologii*, 2011, no. 10, pp. 21–26. (In Russ.)

Информация об авторах

Масленникова Галина Евгеньевна, доктор технических наук, профессор кафедры, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет); начальник отдела, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, maslennikova@gosniiga.ru

Дмитриева Светлана Васильевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, dmitrievasv@gosniiga.ru

Тажетдинов Радим Рустамович, инженер, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, tazhetdinovrr@gosniiga.ru

Authors information

Maslennikova Galina E., Doctor of Sciences (Engineering), Professor of Moscow Aviation Institute (National Research University); Head of the Department, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, maslennikova@gosniiga.ru

Dmitrieva Svetlana V., Candidate of Sciences (Engineering), Senior Researcher, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, dmitrievasv@gosniiga.ru

Tazhetdinov Radim R., Engineer, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, tazhetdinovrr@gosniiga.ru

Статья поступила в редакцию 22.09.2022; одобрена после рецензирования 14.10.2022; принята к публикации 24.10.2022.

The article was submitted 22.09.2022; approved after reviewing 14.10.2022; accepted for publication 24.10.2022.

Обзорная статья
УДК 629.735.05.017.1

ОБОБЩЕНИЕ ОПЫТА ЭКСПЛУАТАЦИИ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ САМОЛЕТОВ ИЛ-76ТД(Т) ЗА ПЕРИОД 2014–2019 ГГ.

А. Л. РЯБИНИН, В. В. ГРИГОРИН-РЯБОВ, Т. А. КАРПОВА

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. В статье рассмотрены основные расчетные показатели при обобщении опыта эксплуатации бортового оборудования самолетов Ил-76ТД(Т). Данные расчеты могут учитываться для обеспечения безопасности полетов и минимизации суммарных расходов на эксплуатацию бортового оборудования в составе воздушных судов с учетом затрат на всем жизненном цикле. Анализ приведенных показателей выполнен с целью определения тенденций изменения параметра суммарного потока отказов каждого типа изделия и выявления отказов и повреждений, обусловленных как конструктивно-производственными недостатками, так и старением и износом элементов и материалов. Это позволяет принять своевременные меры по обеспечению безопасности полетов и экономичности эксплуатации авиационной техники. Целью обобщения опыта эксплуатации бортового оборудования является выявление новых видов отказов, которые могут привести к снижению отказобезопасности изделий и безопасности полетов воздушного судна, увеличения потока отказов и суммарных расходов на эксплуатацию. Появление новых видов отказов приводит к снижению регулярности полетов и повышению затрат на техническое обслуживание и ремонт авиационной техники. Результаты обобщения опыта эксплуатации должны использоваться для разработки и реализации решений по управлению надежностью изделий.

Ключевые слова: бортовое оборудование, функциональная система, агрегаты и комплектующие изделия, параметр суммарного потока отказов, интенсивность отказов, ресурс, срок службы

Для цитирования: Рябинин А. Л., Григорин-Рябов В. В., Карпова Т. А. Обобщение опыта эксплуатации бортового оборудования самолетов Ил-76ТД(Т) за период 2014–2019 гг. // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 40. С. 60–67.

GENERALIZATION OF THE AIRBORNE EQUIPMENT OPERATION EXPERIENCE OF THE IL-76TD(T) AIRCRAFT FOR THE PERIOD BETWEEN 2014–2019

A. L. RYABININ, V. V. GRIGORIN-RYABOV, T. A. KARPOVA

The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract. The paper deals with the main calculated indicators when generalizing the Il-76TD(T) aircraft airborne equipment operation experience. These calculations can be taken into account to ensure flight safety and minimize the total cost of operating aircraft airborne equipment, considering the costs throughout the entire life cycle. The indicators are analyzed in order to determine the change trends in the parameter of total failure flow for each product type and to identify failures and damage caused both by design and production defects and by deterioration and wear of components and materials. This makes it possible to take timely measures to ensure flight safety and operating economy for aviation equipment (AE). During the condition-

based “run-to-failure” operation of the product or with due account of the available resources, it is necessary to monitor both the occurrence of new types of failures and the occurrence of two or more simultaneous failures in the system. The purpose of generalizing the experience in operating the airborne equipment is to identify new types of failures, which can lead to a decrease in the fail-safe performance of products and aircraft flight safety, an increase in the failure flow and total costs of aircraft operation increase due to reduced flight regularity and an increase in the cost of aviation equipment maintenance and repair costs. The results of the generalized experience should be used for the development and implementation of solutions for product reliability management.

Keywords: airborne equipment, functional system, units and components, parameter of the total failure flow, failure rate, resource, service life

For citation: Ryabinin A. L., Grigorin-Ryabov V. V., Karpova T. A., Generalization of the airborne equipment operation experience of the Il-76TD(T) aircraft for the period between 2014–2019, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 40, pp. 60–67. (In Russ.)

Введение

Основной задачей для разработчиков и изготовителей авиационной техники (АТ), а также для эксплуатантов воздушных судов является обеспечение безопасности полетов. Одним из возможных путей предотвращения отказов АТ в полете и избежания аварийных и катастрофических ситуаций является анализ опыта эксплуатации авиационного оборудования.

Оценка надежности и безопасности эксплуатации пилотажно-навигационного и радиоэлектронного оборудования самолетов Ил-76ТД(Т) проводится на основании полученных материалов (сведения об отказах и неисправностях функциональных систем 022, 023, 031, 034, 110 парка самолетов Ил-76ТД(Т), эксплуатирующихся в гражданской авиации (ГА) Российской Федерации в объеме карточек учета неисправностей АТ на основании данных, полученных от Государственного центра «Безопасность полетов на воздушном транспорте»). Оцениваются наиболее характерные отказы и неисправности, их причины, а также показатели надежности.

Критерии оценки отказов бортового оборудования функциональных систем

В соответствии с требованиями норм летной годности самолетов транспортной категории [1] желательно, чтобы любое отказное состояние (функциональный отказ), приводящее к усложнению условий полета, не могло быть отнесено к событиям повторяющимся, т. е. с вероятностью возникновения более 10^{-3} на час полета (или на один полет). Усложнение условий полета (УУП) – особая ситуация, характеризующаяся незначительным увеличением психофизиологической нагрузки на экипаж или незначительным ухудшением аэродинамических характеристик, влияющих на устойчивость и управляемость воздушного судна (ВС). УУП не приводит к необходимости немедленного или предусмотренного заранее изменения плана полета и не препятствует его благополучному завершению, за исключением случаев, указанных в Руководстве по летной эксплуатации [2–4].

Целями анализа обобщения опыта эксплуатации бортового оборудования являются:

- выявление новых видов отказов, которые могут привести к снижению отказобезопасности изделий и безопасности полетов ВС;
- выявление увеличения потока отказов и суммарных расходов на эксплуатацию ВС и как следствие снижения регулярности полетов и повышения затрат на техническое обслуживание и ремонт самолетов Ил-76ТД(Т).

Для оценки характеристик надежности изделий АТ, относящихся к классу восстанавливаемых, используется параметр суммарного потока отказов $\omega_0(t)$, который характеризует смешанный

поток отказов и повреждений изделий с разной наработкой, получающийся при эксплуатации с заменой отказавших изделий исправными, в том числе новыми, отремонтированными и восстановленными путем устранения отказов. Этот показатель непосредственно определяет поток заявок на выполнение работ по техническому обслуживанию и ремонту (ТОиР) рассматриваемого изделия. Параметр суммарного потока отказов ω_0 используется наряду со средней наработкой на отказ и повреждение T_c . Последний постоянно задается в техническом задании (ТЗ) на разработку изделий [5–7].

Методика расчета показателей надежности

Анализ отказов проводится по уровню надежности функциональных систем (параметру суммарного потока отказов) на основании информации об отказах и неисправностях агрегатов и комплектующих изделий (АиКИ), поступающих из эксплуатирующих предприятий [8–9].

В качестве основного параметра, характеризующего состояние системы, принимается статистическая оценка среднего числа отказов и неисправностей ее элементов в течение налета парка за рассматриваемый период:

$$\omega_0 = N_{\Sigma} / T_{\Sigma}, \quad (1)$$

где N_{Σ} – суммарное число отказов и неисправностей всех АиКИ, входящих в определенную функциональную систему самолета, которые были выявлены в полете и при всех видах ТО парка самолетов эксплуатирующего предприятия за выбранный в качестве контрольного календарный период; T_{Σ} – суммарный налет парка самолетов за этот период.

Обобщение опыта эксплуатации бортового оборудования проводится на основании сведений об отказах и неисправностях АиКИ и налете самолетов, полученных из эксплуатирующих предприятий [10–11].

Оценка уровня надежности изделий проводится по параметру суммарного потока отказов [12–13]. В представленных ниже табл. 1–5 отражены значения распределения суммарного потока отказов в период с 2014 по 2019 годы, а на диаграммах (рис. 1–5) показано изменение суммарного потока отказов $\omega_0(t)$ для агрегатов, имеющих наибольшее число отказов в системе.

Таблица 1

Значения параметра суммарного потока отказов изделий для оборудования автоматического управления полетом (система 022)

Наименование	Шифр	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Агрегат управления	АУ(1259В3)	0,000158	0,0000487	0	0,0000862	0,0002089	0,0003836
Блок связи с датчиками траектории	БСДТ(1477Б)	0,000158	0	0,000344	0	0,0002089	0
Пульт управления	6С2.390.074 сер. 2	0,000395	0,000292	0,000344	0,0001725	0,0008358	0,0002558
Блок усилительный	БУ	0,000158	0	0	0,0000862	0,0001045	0,0001279
Командно-пилотажный прибор	КПП-75С	0,000158	0,000487	0,0000859	0,0000862	0	0
Блок фильтров	БС	0	0,0000973	0,000258	0	0	0,0002558

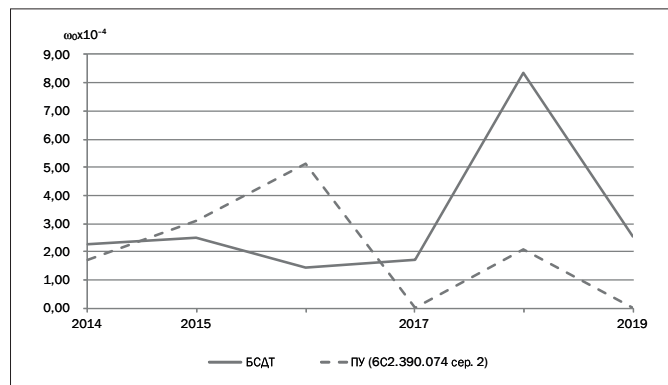


Рис. 1. Диаграмма распределения параметра суммарного потока отказов изделий для оборудования автоматического управления полетом (по годам)

Таблица 2

Значения параметра суммарного потока отказов изделий для связного оборудования (система 023)

Наименование	Шифр	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Рама	Б1-ЯрП	0,000237	0,000292	0,000515	0,0002587	0,0003134	0,0002558
Блок	Б4-ЯрП	0,000355	0,000195	0,000687	0,0004312	0,0002089	0,0003836
Приемопередатчик «Баклан-20»	ПП	0,0000395	0,000146	0,000344	0	0,0002089	0,0006394
Самолетное переговорное устройство	СПУ-8	0,000158	0,000876	0,000687	0,0001725	0,0004179	0,001023
Магнитофон	Марс-БМ	0,000158	0,000292	0,000172	0,0001725	0	0,0002558
Гарнитура	ГСШ-А-18	0,0000631	0,0000195	0,000137	0,0000345	0,0000836	0,0000512
Радиостанция	МИКРОН	0,000118	0,0000973	0,0000344	0,0002587	0,0001045	0,0001279

В таблице приведены значения $\omega_0(t)$ для оборудования с наибольшим количеством отказов в системе.

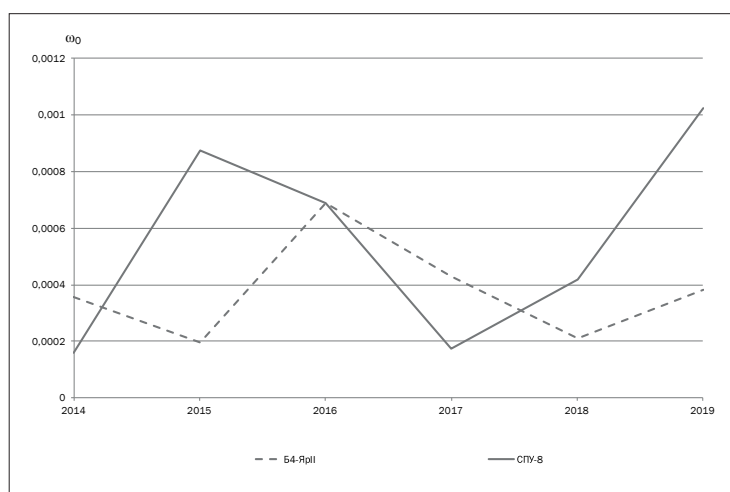


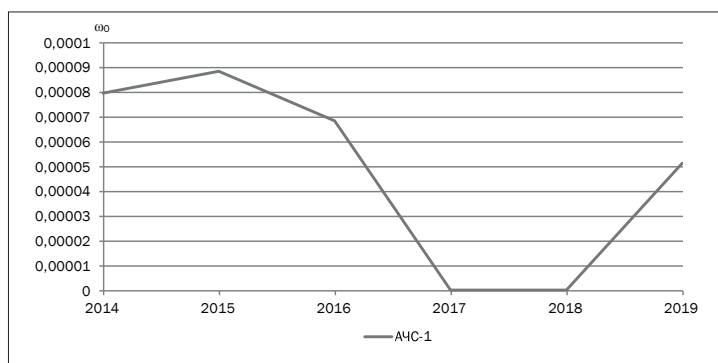
Рис. 2. Диаграмма распределения параметра суммарного потока отказов изделий для связного оборудования

Суммарный поток отказов для автономных приборов (система 031) рассчитывается для авиационных часов. Соответствующая диаграмма представлена на рис. 3.

Таблица 3

Значения параметра суммарного потока отказов изделий для автономных приборов (система 031)

Наименование	Шифр	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Часы	АЧС-1	0,0000798	0,0000884	0,0000687	0	0	0,0000512

**Рис. 3.** Диаграмма распределения параметра суммарного потока отказов автономных приборов**Таблица 4**

Значения параметра суммарного потока отказов изделий для пилотажно-навигационного оборудования (система 034)

Наименование	Шифр	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Центральная гироскопическая вертикаль	ЦГВ-10П	0,0000789	0,0000649	0,0000573	0,000115	0,0001393	0,000341
Датчик критических углов	ДКУ-26р	0	0	0,000429	0,0000862	0	0,0001279
Блок сравнения гироскопических вертикалей	БСГ-2П	0,000431	0	0,000344	0	0,0002089	0,0002558
Высотомер	ВБЭ-2А	0,000355	0,0000973	0	0,0003449	0,0001045	0,0002558
Гироскопический агрегат	ГА-3	0,000118	0	0,000288	0,0000862	0,0004179	0
Электрический указатель поворота	ЭУП-53К	0,000316	0,000243	0,000601	0,0005174	0,0003134	0,0005115

Для оборудования с наибольшими расхождениями $\omega_0(t)$ по годам построена диаграмма (рис. 4.)

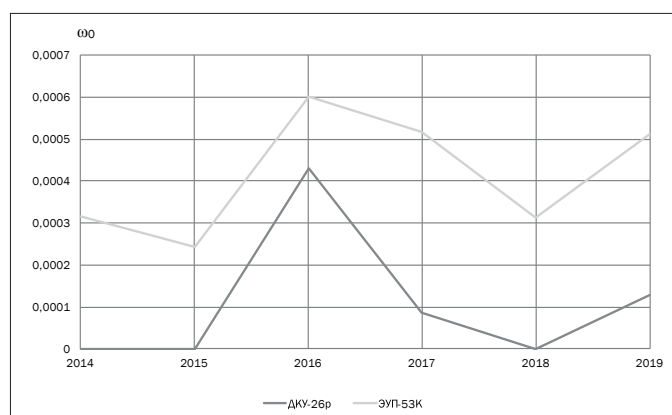
**Рис. 4.** Диаграмма распределения параметра суммарного потока отказов пилотажно-навигационного оборудования (система 034)

Таблица 5

Значения параметра суммарного потока отказов радиоаппаратуры самолетовождения
(система 110)

Наименование	Шифр	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Радиовысотомер	РВ-5	0,0009747	0,000584	0,001	0,0002587	0,0002089	0,0002558
Автоматический радиокompас	АРК-15М	0,000434	0,000195	0	0,0003449	0,0002089	0,0005115
Радиомаяки радиотехнических систем ближней навигации	РСБН-7с	0,000237	0,000389	0	0,0006899	0,00099	0,00097
Самолетный дальномер	СДК-67	0,000158	0,0000487	0,000687	0	0,0004179	0

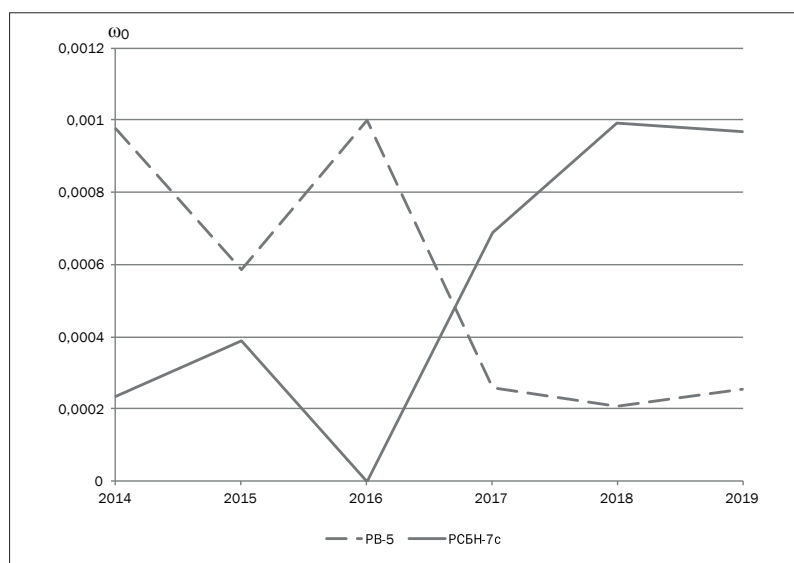


Рис. 5. Диаграмма распределения параметра суммарного потока отказов радиоаппаратуры самолетовождения (система 110)

Как видно из представленных диаграмм рис. 1–5, параметр суммарного потока отказов $\omega_0(t)$ остается на заданном уровне и не превышает вероятность возникновения более 10^{-3} .

При выявлении неслучайного снижения уровня надежности функциональной системы должен проводиться всесторонний углубленный анализ причин этого снижения, на основе которого необходимо разрабатывать мероприятия по обеспечению безопасной и эффективной эксплуатации самолетов.

Заключение

Проведенный анализ по обобщению опыта эксплуатации агрегатов и комплектующих изделий бортового оборудования самолетов типа Ил-76ТД(Т) показал, что анализ отказов функциональных систем бортового оборудования позволяет своевременно выявить отклонения от нормальной эксплуатации и принять меры при увеличении потока отказов. Это позволяет избежать существенного увеличения эксплуатационных расходов из-за постоянных задержек рейсов и срывов полетных заданий, замены отказавших изделий. Несмотря на старение изделий, их надежность остается на заданном уровне и позволяет продолжать их эксплуатацию дальше.

Список источников

1. Авиационные правила. Часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. Издание 3. Москва. Авиаиздат, 2008. 274 с.
2. Смирнов Н. Н., Ицкович А. А. Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Транспорт, 1987. 272 с.
3. Смирнов Н. Н., Андронов А. М., Владимиров Н. И., Лемин Ю. И. Эксплуатационная надежность и режимы технического обслуживания самолетов. Москва: Транспорт, 1974. 304 с.
4. Барзилович Е. Ю., Савенков М. В. Статистические методы оценки состояния авиационной техники. Москва: Транспорт, 1987. 237 с.
5. ОСТ 1 02776-2001. Эксплуатация техническая авиационной техники по состоянию. Основные положения. Москва: НИИСУ, 2001. 5 с.
6. ОСТ 54 30044-85. Система технического обслуживания и ремонта авиационной техники. Основные положения. Москва: МГА, 1986. 7 с.
7. Воробьев В. Г., Зыль В. П., Кузнецов С. В. Основы теории технической эксплуатации пилотажно-навигационного оборудования. Москва: Транспорт, 1999. 335 с.
8. Бюллетень № 76-2169-БЭ-Г. Информирование авиационных предприятий, эксплуатантов, организаций по техническому обслуживанию и ремонту авиационной техники о ресурсах и сроках службы самолетов Ил-76ТД, внесенных в Государственный реестр гражданских воздушных судов Российской Федерации. Москва. 2016. 5 с.
9. Бюллетень № 76-2176-БЭ-Г. Информирование авиационных предприятий, эксплуатантов, организаций по техническому обслуживанию и ремонту авиационной техники о ресурсах и сроках службы самолетов Ил-76Т, внесенных в Государственный реестр гражданских воздушных судов Российской Федерации. Москва. 2016. 5 с.
10. Обобщение опыта эксплуатации пилотажно-навигационного и радиоэлектронного оборудования самолетов типа Ил-76ТД(Т) за период 2017–2019: Отчет Филиала «НИИ Аэронавигации» ФГУП ГосНИИ ГА. Москва. 2020. 27 с.
11. Обобщение опыта эксплуатации пилотажно-навигационного и радиоэлектронного оборудования самолетов типа Ил-76ТД(Т) за период 2014–2016 гг.: Отчет Филиала «НИИ Аэронавигации» ФГУП ГосНИИ ГА. Москва. 2017. 28 с.
12. Анализ отказобезопасности изделий, входящих в систему индикации и контроля пространственного положения самолетов типа Ил-76. Москва. 2004. 13 с.
13. Анализ функциональной отказобезопасности систем, входящих в состав пилотажно-навигационного оборудования самолетов типа Ил-76. Москва. 2005. 11 с.

References

1. Avaiatsionnye pravila, chast 25. Normy letnoj godnosti samoletov transportnoj kategorii, ed. 3, Moscow, Aviaizdat Publ., 2008, 274 p. (In Russ.)
2. Smirnov N. N., Itskovich A. A., *Obsluzhivanie i remont aviatsionnoj tekhniki po sostoyaniyu [Maintenance and repair of aviation equipment based on condition]*, 2nd edition, revised and supplemented, Moscow, Transport Publ., 1987, 272 p. (In Russ.)
3. Smirnov N. N., Andronov A. M., Vladimirov N. I., Lemin Yu. I., *Ekspluatatsionnaya nadezhnost' i rezhimy tekhnicheskogo obsluzhivaniya samoletov [Operational reliability and maintenance modes of aircraft]*, Moscow, Transport Publ., 1974, 304 p. (In Russ.)
4. Barzilovich E. Yu., Savenkov M. V., *Statisticheskie metody otsenki sostoyaniya aviatsionnoj tekhniki [Statistical methods for assessing the state of aviation equipment]*, Moscow, Transport Publ., 1987, 237 p. (In Russ.)
5. OST 1 02776-2001. Ehkspluatatsiya tekhnicheskaya aviatsionnoj tekhniki po sostoyaniyu. Osnovnye polozheniya, Moscow, NIISU Publ., 2001, 5 p. (In Russ.)

6. OST 54 30044-85. Sistema tekhnicheskogo obsluzhivaniya I remonta aviatsionnoj tekhniki. Osnovnye polozheniya, Moscow, MGA Publ., 1986, 7 p. (In Russ.)
7. Vorobyev V. G., Zyl V. P., Kuznetsov S. V., *Osnovy teorii tekhnicheskoy ehkspluatatsii pilotazhno-navigatsionnogo oborudovaniya [Theory fundamentals of flight-control-navigation equipment technical operation]*, Moscow, Transport Publ., 1999, 335 p. (In Russ.)
8. Byulleten' No. 76-2169-BE-G. Informirovanie aviatsionnykh predpriyatij, ehkspluatantov, organizatsij po tekhnicheskomy obsluzhivaniyu i remontu aviatsionnoj tekhniki o resursakh i srokakh sluzhby samoletov Il-76TD, vnesennykh v Gosudarstvennyj reestr grazhdanskikh vozдушnykh sudov Rossijskoj Federatsii, Moscow, 2016, 5 p. (In Russ.)
9. Byulleten' No. 76-2176-BE-G. Informirovanie aviatsionnykh predpriyatij, ehkspluatantov, organizatsij po tekhnicheskomy obsluzhivaniyu i remontu aviatsionnoj tekhniki o resursakh i srokakh sluzhby samoletov Il-76T, vnesennykh v Gosudarstvennyj reestr grazhdanskikh vozдушnykh sudov Rossijskoj Federatsii, Moscow, 2016, 5 p. (In Russ.)
10. Obobshchenie opyta ehkspluatatsii pilotazhno-navigatsionnogo i radioehlektronnogo oborudovaniya samoletov tipa Il-76TD(T) za period 2017–2019: Otchet Filiala “NII Aehronavigatsii” FGUP GosNII GA, Moscow, 2020, 27 p. (In Russ.)
11. Obobshchenie opyta ehkspluatatsii pilotazhno-navigatsionnogo i radioehlektronnogo oborudovaniya samoletov tipa Il-76TD(T) za period 2014–2016: Otchet Filiala “NII Aehronavigatsii” FGUP GosNII GA, Moscow, 2017, 28 p. (In Russ.)
12. Analiz otkazobezопасnosti izdelij, vkhodyashchikh v sistemu indikatsii i kontrolya prostranstvennogo polozheniya samoletov tipa Il-76, Moscow, 2004, 13 p. (In Russ.)
13. Analiz funktsional'noj otkazobezопасnosti system, vkhodyashchikh v sostav pilotazhno-navigatsionnogo oborudovaniya samoletov tipa Il-76, Moscow, 2005, 11 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Рябинин Александр Львович, кандидат технических наук, заместитель начальника отдела, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, ralecs@gosniiga.ru

Григорин-Рябов Виктор Владимирович, старший научный сотрудник, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, vgrigorin@gosniiga.ru

Карпова Татьяна Александровна, старший научный сотрудник, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, tkarpova@gosniiga.ru

Authors information

Ryabinin Alexander L., Candidate of Sciences (Engineering), Deputy Head of Department, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, ralecs@gosniiga.ru

Grigirin-Ryabov Victor V., Senior Researcher, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, vgrigorin@gosniiga.ru

Karpova Tatyana A., Senior Researcher, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, tkarpova@gosniiga.ru

*Статья поступила в редакцию 28.07.2022; одобрена после рецензирования 20.10.2022; принята к публикации 31.10.2022.
The article was submitted 28.07.2022; approved after reviewing 20.10.2022; accepted for publication 31.10.2022.*

Научная статья
УДК 629.735.082:656.71

К ВОПРОСУ ВЫБОРА АЭРОПОРТОВ ДЛЯ ПИЛОТНОГО СОЗДАНИЯ В НИХ СИСТЕМ ЗАПРАВКИ СРЕДНЕМАГИСТРАЛЬНЫХ САМОЛЕТОВ ЖИДКИМ ВОДОРОДОМ

И. А. САМОЙЛОВ, И. В. ЛЕСНИЧИЙ, В. И. САМОЙЛОВ, Д. А. КИПЧАРСКИЙ

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. В статье рассмотрены некоторые аспекты проблемы внедрения в гражданскую авиацию водорода в качестве авиационного топлива для коммерческих самолетов. Предложен подход к выбору аэропортов для пилотного создания в них систем заправки пассажирских самолетов жидким водородом и приведены результаты его апробации применительно к проекту регулярной эксплуатации перспективного среднемагистрального пассажирского водородного самолета класса вместимости 200–250 мест. Сделаны выводы, что пилотная эксплуатация характеризуется незначительной суточной потребностью в водороде, что предоставляет достаточно широкие возможности по выбору состава аэродромного заправочного комплекса и месту его размещения в аэропортах при обеспечении известных требований пожаровзрывобезопасности. При этом выбор аэродромов ограничивается сетью авиалиний, где эксплуатация перспективного водородного самолета будет достаточно эффективной. Пилотная сеть аэродромов с водородными заправочными комплексами должна обеспечивать рациональную маршрутизацию полетов парка водородных самолетов с учетом потребности в запасных аэродромах. Отмечено, что до реализации пилотного проекта создания систем заправки гражданских самолетов водородом должна быть принята соответствующая отраслевая нормативная база, устанавливающая требования к таким объектам инфраструктуры.

Ключевые слова: гражданская авиация, жидкий водород, водородный самолет, водородный заправочный комплекс, аэродром, авиалиния, пилотная эксплуатация

Для цитирования: Самойлов И. А., Лесничий И. В., Самойлов В. И., Кипчарский Д. А. К вопросу выбора аэропортов для пилотного создания в них систем заправки среднемагистральных самолетов жидким водородом // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 40. С. 68–80.

TO THE ISSUE OF SELECTING AIRPORTS FOR THE PILOT CREATION OF LIQUID HYDROGEN FUELING SYSTEMS IN THEM FOR MEDIUM-HAUL AIRCRAFT

I. A. SAMOYLOV, I. V. LESNICHIIY, V. I. SAMOYLOV, D. A. KIPCHARSKIY

The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract. The article considers some aspects of the problem of introducing hydrogen into civil aviation as an aviation fuel for commercial aircraft. An approach to the selection of airports for the pilot creation of systems for refueling passenger aircraft with liquid hydrogen is proposed and the results of its testing in relation to the project of regular operation of a promising medium-haul passenger hydrogen aircraft with a capacity of 200–250 seats are presented. It is concluded that the pilot operation is characterized by an insignificant daily need

for hydrogen, which provides quite ample opportunities for choosing the composition of the airfield refueling complex and its location at airports while ensuring the well-known fire and explosion safety requirements. The choice of airfields is limited to a network of airlines, where the operation of a promising hydrogen aircraft will be quite effective. In addition, the pilot network of airfields with hydrogen refueling complexes should ensure rational routing of flights of the fleet of hydrogen aircraft, taking into account the need for alternate airfields. The article notes that prior to the implementation of a pilot project for the creation of systems for refueling civil aircraft with hydrogen, an appropriate industry regulatory framework should be adopted that establishes requirements for such infrastructure facilities.

Keywords: civil aviation, liquid hydrogen, hydrogen aircraft, hydrogen refueling complex, airfield, airline, pilot operation

For citation: Samoylov I. A., Lesnichiy I. V., Samoylov V. I., Kipcharskiy D. A., To the issue of selecting airports for the pilot creation of liquid hydrogen fueling systems in them for medium-haul aircraft, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 40, pp. 68–80. (In Russ.)

Введение

Авиация имеет достаточно продолжительную историю своего развития, в рамках которой были реализованы и испытаны воздушные суда (ВС) самых различных конструктивных схем, в том числе были опробованы и различные виды топлив, и различные силовые установки (источники энергии). Например, еще на заре авиации (в XIX веке) в воздух поднимались дирижабли с электрическими двигателями. Однако только поршневые и газотурбинные двигатели, использующие в качестве топлива продукты переработки нефти (керосин, бензин и дизельное топливо), получили на многие годы массовое применение в гражданской авиации (ГА). Они по совокупности технических и экономических характеристик оказались наиболее эффективными для гражданского авиастроения, для которого помимо общих для авиации жестких ограничений по массе, объему и аэродинамическому совершенству конструкции характерны еще и особые требования к безопасности полетов и себестоимости авиаперевозок.

Тем не менее, интерес авиастроителей к альтернативным топливам и источникам энергии никогда не угасает, так как научно-технический прогресс и развитие технологий все время открывают новые возможности не только в этой части, но и в области создания новых конструкций ВС. Ярким примером является массовое распространение в последние годы сверхлегких беспилотных ВС с электрическими двигателями, источником энергии которых являются современные аккумуляторные батареи на основе лития.

Мощным стимулом расширения в XXI веке исследований в области альтернативных топлив и источников энергии для пассажирских самолетов стала активизация борьбы мирового сообщества с антропогенными выбросами парниковых газов, к которой активно подключилась и международная ГА под эгидой ИКАО. Несмотря на то, что степень влияния антропогенных выбросов парниковых газов на глобальное изменение климата планеты остается под вопросом, и что на мировую ГА приходится всего лишь около 2 % таких выбросов [1], ИКАО под давлением, прежде всего, европейских стран заняла достаточно жесткую позицию в отношении снижения выбросов парниковых газов, поставив в качестве цели ее углеродно-нейтральное развитие, начиная с 2020 года [2].

Для мировой ГА характерна тенденция роста абсолютных показателей выбросов парниковых газов, так как темпы повышения топливной эффективности авиаперевозок в среднем примерно на 3 процентных пункта отстают от темпов роста объемов авиаперевозок. Поэтому при сохранении темпов роста объемов авиаперевозок реальное обеспечение углеродно-нейтрального развития может быть обеспечено только за счет перевода ГА на использование альтернативных видов топлива (или источников энергии), обеспечивающих кардинально меньшие объемы

выбросов парниковых газов в сравнении с традиционным нефтяным авиационным топливом [3]. По оценкам экспертов, для достижения цели ИКАО доля таких видов топлива в топливном балансе международной ГА в 2050 году должна будет составлять свыше 45 %. При этом в последние годы выдвинута гипотеза о необходимости достижения к 2050 году нулевого баланса между объемами выбросов и объемами поглощений CO₂ (то есть, достижения нулевой нетто-эмиссии), что потребует практически полного отказа от использования ископаемых видов топлива [4, 5].

В этих условиях одним из наиболее привлекательных с экологической точки зрения видов топлива является водород, сжигание которого приводит лишь к образованию воды. Однако, сам процесс получения водорода в промышленных объемах сегодня не является «экологически чистым», так как требует значительных затрат энергии и может формировать различные вредные отходы в зависимости от перерабатываемого сырья. Кроме того, как и различные виды биотоплива, обеспечивающие снижение выбросов CO₂, водород значительно дороже традиционного авиакеросина.

Сегодня большинство водорода производится из природного газа. Данная технология относительно дешева и проста, но приводит к выделению CO₂ (такой водород получил название «серого»). Считается, что экологически чистый водород (так называемый, «зеленый» водород) может быть получен методом электролиза воды при использовании возобновляемых источников электроэнергии (ветра, солнца, рек). Также рассматриваются технологии получения водорода из природного газа с последующим сбором и хранением выделяемого при этом углерода («голубой» водород). Россия предлагает осуществлять электролиз воды за счет энергии атомных электростанций («желтый» водород). В конце августа 2020 года агентство S&P Global Platts оценило приведенные затраты на производство «зеленого» водорода в €3,43 за 1 кг, а «голубого» – в €1,31 за 1 кг, при этом затраты на производство «серого» водорода оценивались им в €1,24 за 1 кг, включая плату за выбросы CO₂. Следует отметить, что на тот момент стоимость авиационного керосина в США составляла примерно \$0,4 за 1 кг. «Зеленый» водород не только кардинально дороже, но и объемы его производства будут существенно ограничены возможностями «зеленой» электроэнергетики.

Тем не менее, водородная тематика пока остается одним из популярных направлений авиационных исследовательских программ во всем мире.

Технико-экономические аспекты использования водорода в гражданской авиации

Водород, как источник энергии, может использоваться в авиации или непосредственно в качестве топлива газотурбинных и поршневых авиадвигателей, или в качестве топлива электрических силовых установок на основе водородных топливных элементов.

В основе принципа работы водородного топливного элемента лежит электрохимическая реакция, в результате которой вырабатываются электроэнергия и тепло, а единственным продуктом реакции является вода. Веществами, которые вступают в электрохимическую реакцию являются водород, который подается в топливный элемент из топливного бака, и кислород, который поступает в топливный элемент из атмосферы. Водородный топливный элемент рассматривается как весьма перспективный источник энергии, так как обладает большим КПД по сравнению с традиционными авиадвигателями, но его продвижению в авиацию препятствовали низкие удельные характеристики (уровень вырабатываемой электрической энергии в расчете на единицу массы и единицу объема элемента) и слишком высокая стоимость (как самого элемента, так и водорода). Хотя в последние годы некоторые производители заявляют о достижении ими удельной мощности более 1 кВт на кг массы топливного элемента, что уже сопоставимо, по крайней мере, с поршневыми авиадвигателями.

Помимо цены, основным недостатком водорода (как и других видов газового топлива) является низкая объемная концентрация энергии, что не позволяет его использовать в ГА в естественном

состоянии. Для размещения на воздушном судне потребного запаса такого топлива его необходимо или сильно сжать, или привести в криогенное жидкое состояние, что требует создания особой топливной системы на борту воздушного судна, конструктивно отличной от традиционной для авиакеросина. При этом даже в жидком состоянии потребный объем водорода должен быть примерно в 4 раза больше, чем авиакеросина, исходя из теплоты сгорания (таблица). Дополнительные проблемы связаны с узким температурным диапазоном жидкого состояния водорода (около 6 °С), быстрым нарастанием давления насыщенных паров при повышении температуры [6], высокой проницаемостью водорода и его растворимостью в металлах, взрывоопасностью смеси водорода с воздухом в случае утечек и др.

Основные технические характеристики водорода при нормальном атмосферном давлении*

Параметр	Водород	Авиакеросин	Метан	Природный газ
Температура плавления, °С	–259,3	–40...–60	–182,5	
Температура кипения, °С	–252,9	150...250	–162	–157...–166
Температура, при которой давление насыщенных паров достигает 1 МПа, °С	–242		–124	
Плотность газа ($T=0$ °С), кг/м ³	0,09		0,717	0,71...0,74
Плотность жидкости при температуре кипения, кг/м ³	70,8	775...820**	415...424	420...470
Теплота сгорания массовая, МДж/кг	120,9	42,9...43,1	49,9	41...50
Теплота сгорания объемная (для жидкого топлива), ТДж/м ³	8,56	33,2...35,4	20,7...21,2	18,2...21,2
Температура вспышки, °С		28...38	–188	
Температура самовоспламенения	500...570	210...220	537	580...800
Взрывоопасная концентрация в воздухе, %	4...75	1,5...8,0	4,4...17	4,4...17
Категории взрывоопасности газа, пара (по ГОСТ 30852.11-2002)	ПС	ПА	ПА	ПА

Примечание: * – таблица разработана авторами на основе различных источников;

** – при температуре +20 °С.

Использование сжатого или сжиженного водорода в качестве топлива требует создания соответствующей специальной аэродромной инфраструктуры, обеспечивающей хранение больших запасов водородного топлива, его транспортировку к местам заправки ВС, их заправку, а также слив топлива и проведение технического обслуживания водородных ВС. При этом, как и для топливной системы самолета, необходимо решение того же комплекса проблем, хотя в наземных условиях возможности по их решению шире.

Нельзя сказать, что проблемы использования водорода в ГА являются технически нерешаемыми [3, 7, 14, 15]. Сегодня водород достаточно широко применяется в различных отраслях экономики (мировое потребление составляет порядка 75 млн т в год), в связи с чем давно созданы и эксплуатируются различные системы получения, хранения, транспортировки как газообразного, так и жидкого водорода. И в авиации еще в восьмидесятые годы прошлого столетия был создан экспериментальный самолет Ту-155, использовавший в качестве топлива сжиженный водород, а также аэродромный комплекс, обеспечивавший его эксплуатацию (первый полет Ту-155 состоялся в 1988 году). Однако пока не решена проблема обеспечения экономической эффективности водородных гражданских самолетов, на которую негативно влияют не только

усложнение конструкции самолета, но икратно бóльшая стоимость водорода по сравнению с авиакеросином, а также потребность в значительных инвестициях в создание наземной аэропортовой инфраструктуры.

Тем не менее, исследования в области использования криогенного топлива в гражданской авиации продолжаются, и, возможно, принципиально новые технологические и конструкторские решения позволят достичь высокого уровня эффективности и надежности водородных ВС. Это поставит вопрос создания аэропортовой водородной инфраструктуры, в том числе определения приоритетов для пилотных проектов в этой области.

Предлагаемый подход к выбору аэропортов для пилотного создания в них систем заправки пассажирских самолетов жидким водородом

Капиталоемкость проекта создания водородной аэродромной инфраструктуры, как и проекта создания самого водородного самолета, определяют необходимость обоснованного подхода к выбору параметров пилотных проектов в этой области.

Поскольку водородный самолет будет новым продуктом для рынка регулярных перевозок, его пилотная эксплуатация должна будет наглядно продемонстрировать рынку потенциальную эффективность водородной коммерческой авиации. В этой связи пилотная сеть авиалиний должна быть приближена к оптимальной для эксплуатации водородного самолета, исходя из его функциональных характеристик, и по возможности должна минимизировать влияние на его эксплуатацию внешних негативных рыночных факторов. При этом, учитывая общую рискованность проекта, целесообразна минимизация объема первоначальных инвестиций в водородную аэродромную инфраструктуру.

При выборе потенциальных авиалиний целесообразно ориентироваться на маршруты близкой к оптимальной протяженности, соответствующие ожидаемым условиям эксплуатации водородного самолета, с устойчивым спросом на авиaperевозки, формирующим пассажиропотоки, достаточные для регулярной эксплуатации водородного самолета рассматриваемой размерности. В совокупности сеть выбранных авиалиний и их конфигурация должны обеспечивать рациональную маршрутизацию полетов пилотного парка водородных самолетов, высокую загрузку рейсов и высокую интенсивность эксплуатации самолетов с минимальным непроизводственным налетом.

При этом, с точки зрения наземной инфраструктуры, приоритетными для создания водородного заправочного комплекса следует считать те аэродромы, на которых может быть обеспечено выполнение всех предъявляемых к такому комплексу требований (технических, эксплуатационных, требований безопасности) и на которых создание и эксплуатация водородного комплекса потребуют минимальных затрат.

В общем случае решение этой задачи оптимизации требует детального анализа множества факторов в условиях достаточно точно сформулированных требований. На начальной стадии проекта предлагается использовать упрощенный подход, предполагающий:

- Определение перечня авиалиний, потенциально пригодных для регулярной эксплуатации водородного самолета, исходя из их протяженности, величины и стабильности пассажиропотоков, параметров взлетно-посадочных полос (ВПП).

- Выбор из перечня потенциально пригодных авиалиний наиболее оптимальных, опираясь на следующие критерии:

- протяженность маршрута близка к максимальной дальности полета самолета с полной пассажирской загрузкой (но не превышает ее) – это позволит максимально реализовать преимущества энергоемкого водородного топлива, повысить годовой налет самолета;

- высокая потребная частота выполнения рейсов (порядка 7 парных рейсов в неделю) – это позволит эксплуатировать на авиалинии водородный самолет параллельно с традиционными

самолетами, что упростит оптимизацию расписания рейсов парка водородных самолетов, а также позволит осуществлять их резервирование за счет традиционных самолетов;

- наличие «парных» авиалиний – когда аэродромы одной авиалинии расположены относительно рядом с аэродромами другой авиалинии так, что эти аэродромы могут служить друг для друга запасными – это исключает необходимость строительства водородных заправочных комплексов на аэродромах, не задействованных в обслуживании перевозок (исключительно в целях обеспечения наличия запасных аэродромов);

- наличие среди «парных» авиалиний таких, где между 4-мя их образующими аэропортами существуют пассажиропотоки более чем по двум направлениям, то есть возможна маршрутизация полетов водородных самолетов между этими четырьмя аэропортами по принципу «конверта», по крайней мере, частичная – это упрощает управление пилотным парком водородных самолетов и достижение его эффективной загрузки.

- Выбор из «парных» оптимальных авиалиний тех, аэродромы которых потенциально позволяют построить водородный заправочный комплекс без лишних затрат, опираясь на ряд частных критериев:

- наличие на аэродроме или в его непосредственной близости достаточной свободной территории для строительства водородного заправочного комплекса (с учетом предъявляемых требований по безопасным расстояниям размещения его объектов) – это формально позволяет построить комплекс без серьезной реорганизации приаэродромных территорий (без освобождения уже занятых земель);

- близость этой свободной территории к ВПП (с учетом предъявляемых требований по безопасным расстояниям размещения водородных объектов) – это может иметь комплексный положительный эффект (за счет сокращения протяженности водородных транспортных магистралей, за счет сокращения протяженности требуемых рулежных дорожек к комплексу и продолжительности руления водородного самолета, за счет компактного расположения всех объектов комплекса);

- доступность источников энергопитания в объеме, требуемом водородным заправочным комплексом;

- наличие и близость к будущему водородному заправочному комплексу транспортной инфраструктуры, способной обеспечить доставку водорода в аэропорт;

- достаточность аэропортовой инфраструктуры для обслуживания соответствующего пассажиропотока – вблизи некоторых городов может быть несколько гражданских аэродромов разной пропускной способности и технической оснащенности;

- климатические условия в регионе расположения аэродрома в части температур наружного воздуха и уровня солнечной радиации – жаркая погода потенциально будет увеличивать энергетические потребности водородного комплекса и, вероятно, потери водорода.

- Окончательный выбор наиболее подходящих для реализации пилотного проекта пар аэродромов по совокупности перечисленных выше критериев.

Обеспечение заправки самолета водородом может быть реализовано различными способами, которые будут определять разные потребности в электроэнергии, транспортной инфраструктуре, потребных площадях для размещения комплекса. При этом двумя принципиальными аспектами, определяющими состав аэродромного водородного комплекса, являются место производства газообразного водорода и место его первоначального сжижения.

Концепция непосредственной реализации на аэродромном комплексе полного цикла – производство водорода, его очистка, сжижение, орто-пара-конверсия, хранение и заправка им ВС – обеспечивает максимальную независимость аэродромного комплекса, не требует внешней транспортной инфраструктуры и логистики доставки водорода в аэропорт. Однако, это наиболее капиталоемкий вариант с наибольшими потребностями в энергетическом обеспечении и в свободных площадях на приаэродромной территории, а также с дополнительными рисками

обеспечения приемлемой себестоимости водорода (особенно в условиях пилотного проекта с небольшими объемами его потребления).

Оптимальный вариант состава аэродромного водородного заправочного комплекса должен определяться с учетом условий конкретного аэропорта и его потребностей в водороде.

Предполагается, что пилотный проект эксплуатации водородных самолетов не будет предусматривать внедрение в эксплуатацию сразу большого парка водородных самолетов, так как это повышает капиталоемкость и финансовую рискованность проекта. Поэтому выбор четырех аэродромов (двух пар для организации «конвертной» маршрутизации) может быть достаточным для пилотного создания в них систем заправки самолетов водородом.

Хотя пилотный проект не предполагает значительных объемов перевозок парком водородных самолетов, крупные аэропорты будут потенциально более предпочтительными для реализации пилотного проекта, так как они обладают развитой инфраструктурой и большой пропускной способностью.

Предлагаемый подход исходит из того, что водородные самолеты (и водородные заправочные комплексы) будут в полной мере обеспечивать нормируемый уровень безопасности, что позволит эксплуатировать их в ГА без дополнительных ограничений.

Предложения по аэропортам для пилотного создания в них систем заправки среднемагистральных самолетов жидким водородом

На основе предложенных критериев был проведен анализ российской сети внутренних воздушных перевозок и аэропортов, и сформулированы предварительные предложения по аэродромам с целью пилотного создания в них водородных заправочных комплексов для обеспечения эксплуатации среднемагистральных пассажирских самолетов класса 200–250 мест.

Для формирования предложений была принята следующая концепция эксплуатации парка водородных среднемагистральных самолетов:

- водородные самолеты осуществляют регулярные пассажирские перевозки;
- водородные самолеты эксплуатируются на протяженных авиалиниях порядка трех и более тыс. км, каждая из которых может обеспечить производственный налет самолета около 3 тыс. ч в год и более при выполнении им одного парного рейса в сутки;
- в пилотном проекте задействованы две пары относительно близко расположенных аэродромов, пригодных для их взаимного использования в качестве запасных и, в то же время, формирующих 4 достаточно протяженные авиалинии для организации частичной «конвертной» маршрутизации полетов;
- водородные самолеты создаются по концепции перспективного самолета, обеспечивающей реализацию высоких годовых налетов, всепогодную эксплуатацию, что позволяет обслужить 4 авиалинии рассматриваемой протяженности парком из четырех самолетов;
- резервирование водородных самолетов осуществляется парком традиционных самолетов.

С учетом прогнозировавшегося ГосНИИ ГА роста спроса на авиаперевозки было определено, что более пятидесяти существующих сегодня внутренних авиалиний потенциально пригодны для эксплуатации в перспективе среднемагистральных самолетов рассматриваемой размерности. Из них около 30 авиалиний имеют протяженность порядка трех и более тыс. км, в числе которых 18 авиалиний обеспечивают возможность выполнения, как минимум, одного парного рейса в неделю и имеют ВПП длиной более 2600 м, что обеспечит эксплуатацию перспективного водородного самолета без ограничений. При этом в качестве пар городов, потенциально пригодных для реализации пилотного проекта по принципу «конвертной» маршрутизации, были выбраны следующие (рисунок):

- Москва/Санкт-Петербург – Новосибирск/Красноярск (протяженность 2,9–3,9 тыс. км);
- Сочи/Краснодар – Новосибирск/Красноярск (протяженность 3,4–4,1 тыс. км);

- Москва/Санкт-Петербург – Чита/Улан-Удэ (протяженность 4,7–5,1 тыс. км).

Последняя группа авиалиний более рискованная, так как при наличии потенциала роста пока имеет недостаточные пассажиропотоки.

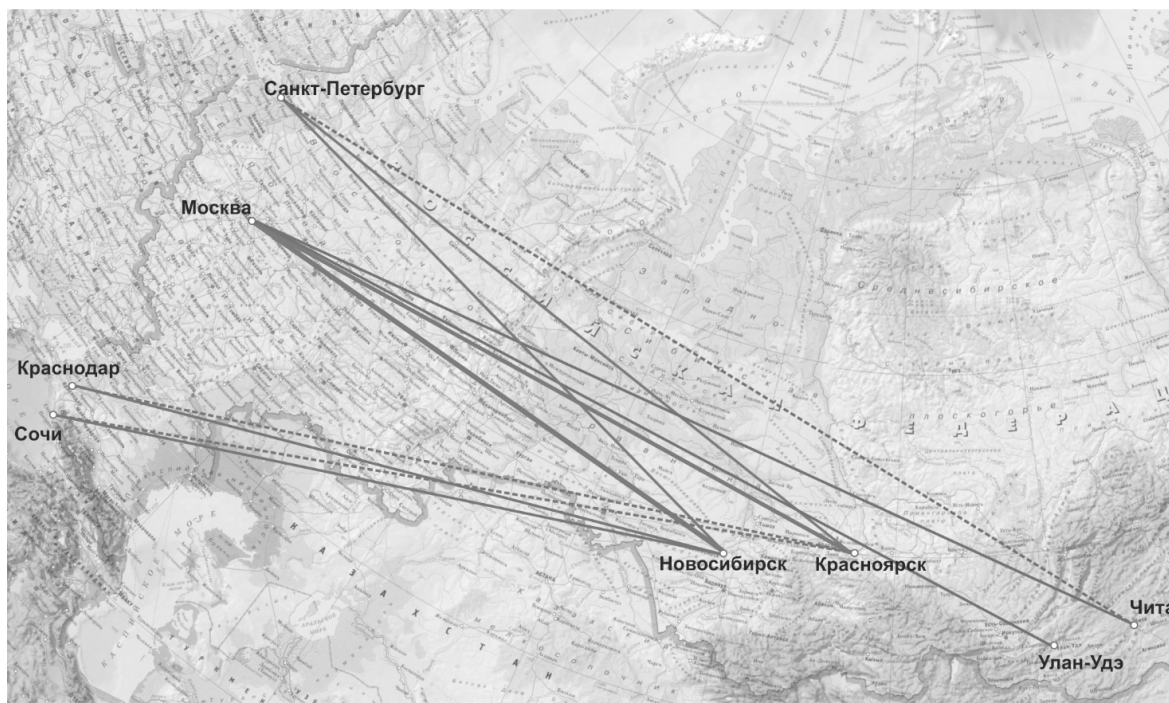


Схема авиалиний, перспективных для опытной эксплуатации среднемагистральных пассажирских самолетов на жидком водороде

При принятой концепции пилотной эксплуатации парка водородных самолетов из каждого аэропорта в сутки будет осуществляться 2 вылета водородных самолетов. Опираясь на оценки потребной массы водородного топлива для самолетов А-321, опубликованные в ISO/PAS 15594:2004 [8], суточный расход водорода аэропортов рассматриваемых авиалиний может составить 14–19 т. Приняв для расчетов, что для парирования нештатных ситуаций аэропорт должен обеспечивать хранение водорода, потребного для выполнения запланированных на 4 суток полетов (то есть, для 8 полетов), а также дополнительно приняв коэффициент запаса 1,2, суммарная емкость хранилища жидкого водорода для каждого аэропорта из рассматриваемых пар городов была оценена следующим образом:

- 0,94–1,09 тыс. м³ для каждого аэропорта авиалиний «Москва/Санкт-Петербург – Новосибирск/Красноярск»;
- 1,00–1,14 тыс. м³ для каждого аэропорта авиалиний «Новосибирск/Красноярск – Сочи/Краснодар»;
- 1,24–1,31 тыс. м³ для каждого аэропорта авиалиний «Москва/Санкт-Петербург – Чита/Улан-Удэ».

Для пилотного проекта при таких малых объемах потребления наиболее рациональной концепцией аэродромного заправочного комплекса представляется следующая:

- производство и сжижение водорода осуществляется сторонними крупными производителями (что обеспечит относительно низкую стоимость водорода при гарантированном уровне его качества [9]);
- в аэропорт водород доставляется в жидком виде железнодорожным транспортом – цистернами типа ЖВЦ100М2 (железнодорожный транспорт представляется более дешевым, безопасным и надежным по срокам поставки, чем автомобильный);

- в аэропорту хранение жидкого водорода осуществляется в двух стационарных криогенных резервуарах (емкостью примерно 500–550 м³ каждый для авиалиний «Москва/Санкт-Петербург – Новосибирск/Красноярск» и «Новосибирск/Красноярск – Сочи/Краснодар», или примерно 620–660 м³ каждый для авиалиний «Москва/Санкт-Петербург – Чита/Улан-Удэ»);

- аэродромный комплекс оснащается системой управления испарением водорода – системой, обеспечивающей сбор испарившегося водорода и его охлаждение (обратное сжижение);

- место заправки самолета располагается в непосредственной близости к хранилищу водорода для минимизации затрат на транспортировку жидкого водорода.

Стационарное хранилище жидкого водорода по сравнению с мобильными емкостями может снизить потери водорода, предоставляет возможность реализации более эффективных мер обеспечения безопасности и надежности работы комплекса, а также минимизации последствий чрезвычайных ситуаций. Два резервуара вместо одного в условиях регулярной эксплуатации позволят повысить стабильность функционирования водородного комплекса за счет дублирования его систем, возможности технологически развязать процедуры наполнения хранилища водородом и заправки ВС. Кроме того, использование емкостей меньшего объема снижает требования пожаровзрывобезопасности по минимальным безопасным расстояниям (из-за уменьшения вероятного объема разлившегося водорода).

В сфере ГА пока отсутствует нормативная база, регулирующая вопросы безопасности, связанные с использованием водорода в качестве авиационного топлива. Но, опираясь на некоторые внеотраслевые требования и стандарты, разработанные применительно к производству водорода [10–12], его хранению и использованию, были сделаны следующие оценки.

Для обеспечения потребностей пилотного проекта в аэропортах для хранения жидкого водорода будет необходимо установить по два сферических резервуара диаметром 10–11 м каждый. В соответствии со сводом правил Роскосмоса СП 162.1330610.2014 между резервуарами должно быть расстояние не менее их диаметра, расстояние от резервуаров до ограждения территории – 10 м, расстояния от резервуаров до площадок наполнения-слива водорода должны составлять 20–30 м. Таким образом, на площадке размером 100х100 м можно обеспечить размещение комплекса, включающего не только емкости хранения водорода, но и ожигательный комплекс системы управления испарением водорода, а также емкости для хранения необходимых специальных жидкостей и газов (воды, гелия, азота) [13]. Площадка заправки самолета может составлять порядка 50х50 м, исходя из габаритов самолета рассматриваемого класса (например, габариты Boeing 757-200 составляют 47,3х38,1 м, Airbus 321 – 44,5х35,8 м).

В соответствии с СП 162.1330610.2014, исходя из емкости резервуаров хранилища водорода, водородный комплекс может быть размещен в удалении от других объектов аэропорта примерно на 200 м и в удалении от жилых построек примерно на 550 м. В итоге принимаем, что размещение пилотного водородного заправочного комплекса требует наличия на приаэродромной территории свободной площадки размерами примерно 500х500 м, центр которой (резервуары с водородом) удален от аэровокзала и жилых домов примерно на 600 м.

Города, потенциально выбранные для реализации пилотной эксплуатации водородных самолетов, имеют по одному гражданскому аэродрому классов А, Б или В, за исключением Москвы, в районе которой таких аэродромов семь (Домодедово, Шереметьево, Внуково, Кубинка, Остафьево, Раменское, Чкаловский). Анализ аэропортов по предложенным частным критериям показал:

- Свободные территории для строительства водородного заправочного комплекса с соблюдением безопасных расстояний и с возможностью прокладки к комплексу рулежной дорожки имеются во всех аэропортах, кроме Сочи и Внуково (Москва). Потенциально затруднительным представляется размещение комплекса в аэропорту Шереметьево (Москва).

- Во всех аэропортах решена проблема доставки традиционного авиатоплива наземным транспортом. В непосредственной близости всех аэропортов имеются железнодорожные пути.

Проблемным можно считать аэропорт Улан-Удэ, который расположен на другом берегу реки от железной дороги в удалении примерно 7 км.

- Все рассматриваемые аэропорты расположены вблизи крупных городов и региональных центров, что позволяет предполагать, что в любом из них задача энергоснабжения водородного комплекса может быть успешно решена.

- Московские аэропорты Кубинка, Остафьево и Чкаловский не вовлечены в систему регулярных пассажирских авиаперевозок, не имеют инфраструктуры для обслуживания больших пассажиропотоков, не имеют развитой логистики доставки пассажиров в аэропорт. Кроме того, в аэропортах Кубинка и Остафьево ВПП имеют длину менее 2600 м.

Среди московских аэропортов аэродром Раменское (Жуковский) имеет дополнительное преимущество, так как размещение на нем водородного заправочного комплекса позволит не только осуществить пилотную эксплуатацию водородного самолета, но и провести его сертификационные испытания на традиционной испытательной базе ЛИИ им. М. М. Громова.

Таким образом, исходя из совокупности результатов проведенного анализа, для пилотного создания систем заправки самолетов водородом предлагается рассматривать аэропорты Жуковский (Раменское), Санкт-Петербург (Пулково), Красноярск (Емельяново), Новосибирск (Толмачево). Создание систем заправки самолетов водородом в этих аэропортах позволит организовать пилотную эксплуатацию парка из 4–5 водородных пассажирских самолетов вместимостью порядка 220 мест по 4 характерным для них направлениям авиаперевозок протяженностью 3–4 тыс. км: «Москва – Новосибирск», «Москва – Красноярск», «Санкт Петербург – Новосибирск», «Санкт Петербург – Красноярск». Начать реализацию пилотного проекта целесообразно с создания водородной заправки в аэропорту Жуковский (Раменское) с целью обеспечения проведения сертификационных летных испытаний перспективного водородного самолета.

Заключение

В рамках общего мирового тренда борьбы с глобальным потеплением в последнее десятилетие нарастало давление на ГА по вопросу снижения ею выбросов парниковых газов. Это активизировало проведение исследований и проектных работ, направленных на внедрение в ГА в качестве авиационного топлива водорода как потенциально наиболее экологически чистого топлива.

Основными недостатками водорода как авиационного топлива являются его высокая стоимость (кратно превосходящая стоимость авиакеросина) и низкая объемная концентрация энергии, требующая его хранения в топливных баках или в сильно сжатом, или в криогенном сжиженном состоянии, что приводит к усложнению и снижению эффективности конструкции самолета. В мире ведется поиск новых технических решений с целью создания к 2035 году водородных магистральных самолетов.

Капиталоемкость проекта создания водородного пассажирского самолета и соответствующей аэродромной инфраструктуры (хранения водорода и заправки им самолетов) определяют необходимость обоснованного подхода к выбору параметров пилотных проектов в этой области. Авиалинии, выбранные для пилотной эксплуатации водородных самолетов, должны обеспечить высокую эффективность их эксплуатации (рациональную загрузку рейсов, высокий годовой налет, оптимальную расстановку парка). Аэродромы, на которые эти авиалинии опираются, должны быть способны обеспечить безопасное размещение и строительство водородных заправочных комплексов с минимальными затратами на реорганизацию приаэродромных территорий, строительство дополнительной транспортной инфраструктуры, объектов энергообеспечения. Исходя из этого, для организации пилотной эксплуатации парка из 4–5 водородных самолетов класса вместимости 200–250 мест рекомендована сеть из 4-х авиалиний протяженностью 3–4 тыс. км между Москвой и Санкт-Петербургом, с одной

стороны, и Новосибирском и Красноярском – с другой, опирающаяся на аэродромы Толмачево, Емельяново, Пулково, Раменское (Жуковский). При этом аэропорты Новосибирска и Красноярска будут выполнять роль запасных друг для друга, а аэропорты Санкт-Петербурга и Москвы, соответственно, друг для друга.

Начать реализацию пилотного создания систем заправки самолетов водородом целесообразно с аэропорта Жуковский (Раменское) с целью обеспечения проведения сертификационных летных испытаний перспективного водородного самолета на традиционной испытательной базе ЛИИ им. М. М. Громова.

Для реализации пилотного проекта создания систем заправки самолетов водородом необходимы разработка и принятие отраслевой нормативной базы, устанавливающей правила строительства и эксплуатации водородных объектов на гражданских аэродромах.

Список источников

1. Баркер Т., И. Башмаков, Л. Бернстайн, Ж. Е. Богнер, П. Р. Бош, Р. Даве, О. Р. Дэвидсон, Б. С. Фишер, С. Гупта, К. Халснес, Г. Я. Хей, С. Канн Рибейро, С. Кобаяси, М. Д. Левайн, Д. Л. Мартино, О. Масера, Б. Метц, Л. А. Мейер, Г.-Я. Набуурс, А. Наджам, Н. Накиченович, Х.-Х. Рогнер, Д. Рой, Д. Сатайе, Р. Шок, П. Шукла, Р. Э. Х. Симс, П. Смит, Д. А. Тирпак, Д. Урге-Форзац, Д. Чжоу. «Техническое резюме», в докладе «Изменение климата, 2007 г.: смягчение последствий. Материал Рабочей группы III к Четвертому докладу Межправительственной группы экспертов по изменению климата об оценках» [Б. Метц, О. Р. Дэвидсон, П. Р. Бош, Р. Даве, Л. А. Мейер (ред.)] / Cambridge University Press, Cambridge, 2007. 80 с.
2. ИКАО Doc 10140. Действующие резолюции Ассамблеи (по состоянию на 4 октября 2019 года). ИКАО. 2020. 396 с.
3. ICAO 2019 Environmental Report. Aviation and Environment, ICAO, 2019, 376 p.
4. ИКАО. Комитет по охране окружающей среды от воздействия авиации. Доклад об осуществлении долгосрочной желательной цели (LTAG) по сокращению эмиссии CO₂ для международной авиации. ИКАО. 2022. 25 с.
5. Elisabeth van der Sman, Bram Peerlings, Johan Kos, Rogier Lieshout, Thijs Boonekamp. Destination 2050. A Route To Net Zero European Aviation, NLR-CR-2020-510, Royal Netherlands Aerospace Centre, SEO Amsterdam Economics, 2021, 193 p.
6. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Москва: Наука, 1972. 721 с.
7. Комплексные исследования перспектив использования альтернативных видов топлива и источников энергии в интересах воздушного транспорта: Отчет о научно-исследовательской работе. Москва: ФГУП ГосНИИ ГА, 2014. 216 с.
8. ISO/PAS 15594:2004. Airport hydrogen fuelling facility operations, ISO, 2004, 24 p.
9. ГОСТ Р 56248-2014. Водород жидкий. Технические условия. Москва: Стандартинформ, 2015. 23 с.
10. СП 162.1330610.2014. Свод правил. Требования безопасности при производстве, хранении, транспортировании и использовании жидкого водорода. Москва: Федеральное космическое агентство (Роскосмос), 2014. 178 с.
11. EIGA Doc 06/02. Safety in Storage, Handling and Distribution of Liquid Hydrogen, European Industrial Gases Association, 2002, 23 p.
12. EIGA Doc 06/19. Safety in Storage, Handling and Distribution of Liquid Hydrogen. European Industrial Gases Association AISBL, 2019, 23 p.
13. NASA Report No. CR-2700. LH2 Airport Requirements Study, Prepared by Lockheed-California Company, NASA, 1976, 205 p.
14. Постоев С. К., Стреляев В. С. Криогенно-топливный авиационный комплекс как основа применения жидкого водорода в гражданской авиации // Сборник научных трудов ГосНИИ ГА. 2010. № 311. С. 115–118.

15. Постоев С. К., Резников М. Е. Подготовка кадров криогенной авиации и наземного комплекса криогенного топливообеспечения // Сборник научных трудов ГосНИИ ГА. 2010. № 311. С. 161–164.

References

1. T. Barker, I. Bashmakov, L. Bernstein, J. E. Bogner, P. R. Bosch, R. Dave, O. R. Davidson, B. S. Fischer, S. Gupta, K. Halsnes, G. Ya. Hay, S. Cann Ribeiro, S. Kobayashi, M. D. Levine, D. L. Martineau, O. Masera, B. Metz, L. A. Meyer, G.-Ya. Nabuurs, A. Najam, N. Nakichenovich, H.-H. Rogner, D. Roy, D. Sataye, R. Schock, P. Shukla, R. E. H. Sims, P. Smith, D. A. Tirpak, D. Urge-Forsatz, D. Zhou, Technical Summary, in *Climate Change 2007: Mitigation. Working Group III Submission to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, ed. by B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer, Cambridge University Press, Cambridge, 2007, 80 p.
2. ICAO Doc 10140, Assembly Resolutions in force (as of 4 October 2019), ICAO, 2020, 346 p.
3. ICAO 2019 Environmental Report. Aviation and Environment, ICAO, 2019, 376 p.
4. ICAO Aviation Environmental Protection Committee, A Long Term Aspirational Target (LTAG) Feasibility Report on Reducing CO₂ Emissions for International Aviation, ICAO, 2022, 25 p.
5. Elisabeth van der Sman, Bram Peerlings, Johan Kos, Rogier Lieshout, Thijs Boonekamp, Destination 2050. A Route To Net Zero European Aviation, NLR-CR-2020-510, Royal Netherlands Aerospace Centre, SEO Amsterdam Economics, 2021, 193 p.
6. Vargaftik N. B., *Spravochnik po teplofizicheskim svoystvam gazov i zhidkostej [Handbook on thermophysical properties of gases and liquids]*, Moscow, Nauka Publ., 1972, 721 p. (In Russ.)
7. Comprehensive studies of the prospects for the use of alternative fuels and energy sources in the interests of air transport, Report on research work, Moscow, GosNII GA Publ., 2014, 216 p. (In Russ.)
8. ISO/PAS 15594:2004. Airport hydrogen fuelling facility operations, ISO, 2004. 24 p.
9. GOST R 56248-2014. Hydrogen is liquid. Specifications, Moscow, Standartinform Publ., 2015, 23 p. (In Russ.)
10. SP 162.1330610.2014. Svod pravil. Trebovaniya bezopasnosti pri proizvodstve, khranении, transportirovani i ispol'zovanii zhidkogo vodoroda, Moscow, Roscosmos Publ., 2014, 178 p. (In Russ.)
11. EIGA Doc 06/02. Safety in Storage, Handling and Distribution of Liquid Hydrogen, European Industrial Gases Association, 2002, 23 p.
12. EIGA Doc 06/19. Safety in Storage, Handling and Distribution of Liquid Hydrogen. European Industrial Gases Association AISBL, 2019, 23 p.
13. NASA Report No. CR-2700. LH2 Airport Requirements Study, Prepared by Lockheed-California Company, NASA, 1976, 205 p.
14. Postoev S. K., Strelyaev V. S., Cryogenic-fuel aviation complex as the basis for the application of liquid hydrogen in civil aviation, *Collection of scientific works of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2010, no. 311, pp. 115–118. (In Russ.)
15. Postoev S. K., Reznikov M. E., Training of personnel for cryogenic aviation and ground complex of cryogenic fuel supply, *Collection of scientific works of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2010, no. 311, pp. 161–164. (In Russ.)

Информация об авторах

Самойлов Игорь Анатольевич, кандидат технических наук, начальник отдела, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, aviamarket@gosniiga.ru

Лесничий Игорь Владимирович, кандидат экономических наук, заместитель начальника отдела, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, aviamarket@gosniiga.ru

Самойлов Владислав Игоревич, кандидат экономических наук, старший научный сотрудник, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, aviamarket@gosniiga.ru

Кипчарский Дмитрий Анатольевич, старший научный сотрудник, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, aviamarket@gosniiga.ru

Authors information

Samoylov Igor A., Candidate of Sciences (Engineering), Head of Department, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, aviamarket@gosniiga.ru

Lesnichiy Igor V., Candidate of Sciences (Economics), Deputy Head of Department, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, aviamarket@gosniiga.ru

Samoylov Vladislav I., Candidate of Sciences (Economics), Senior Research Fellow, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, aviamarket@gosniiga.ru

Kipcharskiy Dmitriy A., Senior Research Fellow, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, aviamarket@gosniiga.ru

Статья поступила в редакцию 27.07.2022; одобрена после рецензирования 06.09.2022; принята к публикации 14.09.2022.

The article was submitted 27.07.2022; approved after reviewing 06.09.2022; accepted for publication 14.09.2022.

Научная статья

УДК 351.814.2:621.396.933

БЕЗОПАСНОСТЬ ПОЛЕТОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ КОНЦЕПЦИИ PBN

Д. В. АРУТЮНЯН¹, О. Г. ФЕОКТИСТОВА²

¹ Концерн ВКО «Алмаз – Антей», Москва, Россия

² Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. Мировая гражданская авиация в настоящее время развивается в соответствии с концепцией ИКАО CNS/ATM. Для реализации концепции необходимо обеспечение выполнения полетов по правилам PBN, что потребует отдельного рассмотрения влияния процедур PBN на уровень безопасности полетов. Концепция PBN, сохранив четыре типа воздушного пространства при полетах воздушных судов (ВС) с учетом принципов RNP, расширила число учитываемых характеристик от одной до шести. В статье проанализированы все эти характеристики с точки зрения возможностей их количественного выражения и с точки зрения возможности проведения анализа влияния изменения значений этих характеристик во время выполнения полета на безопасность полетов (БП). В качестве основной рекомендации предлагается проведение соответствующих научно-практических исследований по нахождению взаимосвязей между изменениями значений характеристик, составляющих основу PBN, и показателями, характеризующими БП, в роли которых предлагается взять вероятность возникновения опасного фактора и фактора риска.

Ключевые слова: ИКАО, концепция PBN, навигация, комплексные показатели, характеристики для каждого типа, безопасность полетов, точность

Для цитирования: Арутюнян Д. В., Феоктистова О. Г. Безопасность полетов при реализации концепции PBN // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 40. С. 81–87.

FLIGHT SAFETY WHEN IMPLEMENTING THE CONCEPT OF PBN

D. V. ARUTYUNYAN¹, O. G. FEOKTISTOVA²

¹ "Almaz – Antey" Air and Space Defence Corporation, Moscow, Russia

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

Abstract. Global civil aviation is currently developing according to the concept of ICAO CNS/ATM. The implementation of the concept is the widespread introduction of flight operations according to PBN, which requires special consideration of the PBN impact on flight operating safety in flight operations. PBN concept has increased the number of considered characteristics from one up to six, retaining four types of airspace with aircraft flights, on the principle of RNP. In this article, all the characteristics are analyzed in terms of their quantification and in terms of analyzing the possibility of impact changes in values of those characteristics on flight safety during the flight. As a fundamental recommendation, it is proposed to hold scientific and practical researches on finding relation between characteristics value changes which form the basis of PBN, and indicators characterizing Flight Safety, which are proposed to be considered as the probability of hazard or risk factor.

Keywords: ICAO, PBN concept, navigation, complex indicators, characteristics of each type, flight safety, accuracy

For citation: Arutyunyan D. V., Feoktistova O. G., Flight safety when implementing the concept of PBN, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 40, pp. 81–87. (In Russ.)

Введение

На основании принципов ИКАО основным инструментом для практического применения концепции CNS/ATM служит реализация Глобального аэронавигационного плана и Глобального плана обеспечения БП [1–6], которые разрабатываются для модернизации действующей системы ОрВД. Из чего следует целесообразность применения новых рычагов воздействия по оптимизации, повышению уровня безопасности полетов (БП) и эффективности с расчетом экономической составляющей [7]. Важнейшим элементом в решении данной задачи является применение при международных полетах ВС навигационного оборудования, основанного на характеристиках PBN, путем внедрения современных спецификаций RNAV, RNP для всевозможных фаз полета ВС, что значительно отразится на критериях уровня БП.

Постановка задачи

Задачей исследования является выявление опасных факторов и рисков, влияющих на уровень БП, при внедрении концепции PBN на территории Российской Федерации. В документах ИКАО сформулирована задача по внедрению новых технологий для увеличения эффективности работы аэропортов, включая возможности службы ОрВД квалифицированно обеспечивать требуемую пропускную способность.

Реализации концепции PBN

Началом реализации концепции явилось принятие в 1994 году Руководства по требуемым навигационным характеристикам (RNP), которое было представлено в формате документа ИКАО (Doc 9613-AN/937). В этом документе Специальным комитетом по будущим аэронавигационным системам (FAHS) было установлено, что метод, который использовался в прошлом, обеспечивал необходимые навигационные возможности и опирался на определенный вид и перечень оборудования. Предложенный подход вносил ограничения по оптимальному использованию данного оборудования. С возникновением и внедрением спутниковых радионавигационных систем (СРНС) возникла сложная задача выбора соответствующего оборудования [8]. Именно тогда FAHS разработал новую концепцию требуемых навигационных характеристик, отметив принципиальное различие между понятиями «возможности» и «характеристики». Понятие RNP – это параметр, являющийся показателем бокового отклонения, с помощью которого точно фиксируются координаты, в соответствии с уровнем удержания от заданной или выбранной линии. При доработке концепции RNP сделаны выводы о необходимости ориентироваться на показатели точности для соблюдения требуемых навигационных характеристик в рамках заданного воздушного пространства [9, 10].

В 2014 году при участии Арутюняна Д. В. разработан программный комплекс, получивший свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014617664, примененный на этапе дальнейшего исследования параметров БП в рамках концепции PBN.

В данной статье авторами выделено четыре типа RNP: 1; 4; 12,6 и 20, определяющие значения их точности и представленные в таблице.

Параметры точности по типам RNP

Типы RNP	Точность, км	Точность, морских миль
RNP1	$\pm 1,85$	$\pm 1,0$
RNP4	$\pm 7,4$	$\pm 4,0$
RNP12,6	$\pm 23,3$	$\pm 12,6$
RNP20	± 37	± 20

При этом в концепции RNP учитывалась только одна характеристика (но наиболее важная) – точность. Концепция PBN, сохранив четыре типа ВП (воздушного пространства) для осуществления навигации, расширила число характеристик до шести, а именно:

1. Точность.
2. Готовность.
3. Непрерывность.
4. Целостность.
5. Функциональные возможности.
6. Эксплуатационные требования.

Данные характеристики составляют смысл концепции PBN. Необходимо учитывать, что значения этих характеристик в числовом выражении, соответственно, будут различаться для каждого типа RNP [11–12].

В соответствии с концепцией PBN для каждого типа RNP понятие «точность» будет иметь свое значение, которое характеризуется суммарной погрешностью системы (TSE), которая рассчитывается по формуле, как корень квадратный из сумм квадратов погрешностей навигационной системы (NSE), техники пилотирования (FTE и определения местоположения (PDE):

$$TSE = \sqrt{NSE^2 + FTE^2 + PDE^2}. \quad (1)$$

При учете погрешностей NSE и FTE имеется ограничение в использовании навигационной инфраструктуры VOR/DME, заключающееся в низкой точности угломерного оборудования (не более $\pm 3^\circ$). При этом средняя эксплуатационная точность VOR/DME составляет $\pm 5^\circ$. Поэтому, если учесть указанные погрешности (см. формулу (1)), VOR/DME позволит реализовать требования RNAV на расстояниях не более 110–115 км от места его установки.

В формуле (1) в навигационных определениях точность конкретного параметра характеризуется его погрешностью Δ , что можно представить, как разность между фактическим значением $X_{изм}$ и истинным значением $X_{и}$:

$$\Delta = |X_{изм} - X_{и}|. \quad (2)$$

На практике для нахождения погрешности измерений пользуются понятием действительного значения величины $X_{д}$, которому всегда приписывается определенное значение, поэтому формулу (2) представим в виде:

$$\Delta = |X_{изм} - X_{д}|.$$

Навигационные определения в ГА в настоящее время осуществляются с помощью Спутниковой радионавигационной системы (СРНС), где ошибка характеризуется средней

квадратической погрешностью σ_x , которая в радиотехнических системах рассчитывается следующим соотношением:

$$\sigma_x = m/P(N_0),$$

где m – размерный коэффициент, $P(N_0)$ – отношение сигнал/шум, действующее в соответствующей радиосистеме.

Вторая характеристика концепции «Готовность» – это свойство системы реализовывать заданные функции по конкретным инициациям (т. е. по требованиям). В качестве количественной меры данного свойства выступает коэффициент K_Γ , т. е. отношение фактического временного интервала работы системы от введения сигнала инициации, самого поступления требования, до прекращения выполнения установленной операции t_Φ к запланированному временному интервалу работы системы для выполнения заданных операций t_Π , т. е.:

$$K_\Gamma = t_\Phi / t_\Pi. \quad (3)$$

В документах ИКАО, связанных с вопросами реализации PBN, в одних случаях говорится о понятии «готовность», а в других – об «эксплуатационной готовности», хотя речь идет об одном и том же показателе [13–15]. Но понятие «эксплуатационная готовность» выражается тремя основными комплексными показателями, это коэффициент эксплуатационной готовности $K_{ЭГ}$, коэффициент оперативной готовности $K_{ОГ}$, коэффициент технического использования $K_{ТИ}$. Все эти коэффициенты предназначены для оценки процессов технической эксплуатации, связанных с появлением отказов и выполнением соответствующих восстановительных работ, что не связано с проведением навигационных измерений. Поэтому в дальнейшем под термином «готовность» следует понимать соотношение в формуле (3).

Третья характеристика «непрерывность» – это свойство системы воплощать в реальном масштабе временного интервала заблаговременно все функции с учетом неспланированных прерываний в течение всего периода работы. В качестве количественной меры непрерывности K_H выступает вероятность отсутствия прерываний за указанное время работы. Непрерывность можно оценивать, как отношение суммарного запланированного времени работы t_Π к общему (заданному) времени функционирования t_Φ , в виде:

$$K_H = t_\Pi / t_\Phi.$$

Четвертая характеристика «целостность» – это свойство системы определять и устранять найденные ошибки нескольких разновидностей:

1. «Пропуск ошибки» или «ложная тревога» возникает, если ложное оповещение классифицируется системой, как верное решение, что является ошибкой первого рода $P_{\text{ош1}}$.
2. «Пропуск сигнала» возникает, если правильное действие принимается за ошибочное. Данные ошибки являются ошибками второго рода $P_{\text{ош2}}$.

Следовательно, количественная мера целостности – это возможность возникновения ошибок, т. е. $P_{\text{ош1}}$ и $P_{\text{ош2}}$, возможность их сочетания, например, $kP_{\text{ош1}} + nP_{\text{ош2}}$, где k и n – заданные коэффициенты по документам ИКАО [16].

Примеры возникновения ошибок из практики:

1. Постоянная индикация местоположения ВС относительно линии пути.
2. Индикация расстояния и полета до активной точки.
3. Индикация путевой скорости и времени до активной точки.
4. Функция хранения навигационных данных.
5. Индикация отказа системы RNAV (Area Navigation – зональная навигация).

Эксплуатационные требования – это стандартные уведомления, которые применяются к различным системам в процессе технической эксплуатации. В данных условиях эти требования, прежде всего, относятся к вопросам надежности функционирования оборудования и определяются типовыми показателями надежности, таким как: вероятность отказа P_0 , среднее время наработки до отказа T_0 .

Все приведенные в статье характеристики определяют понятие PBN и непосредственно связаны с уровнем БП [16]. Несоответствие фактических значений охарактеризованных параметров указанным в статье нормативным требованиям, которые установлены для каждого RNP, и есть предпосылки к возникновению авиационного инцидента или авиационного происшествия и к возникновению потенциально-конфликтной или конфликтной ситуации [10, 12–13].

Заключение

В настоящее время БП оценивают по уровню значений таких понятий как: опасный фактор (ОФ) и фактор риска (ФР). Уход любого фактического значения за пределы допускаемых значений характеристик, или потеря хотя бы одной из функциональных возможностей и есть предпосылка к снижению уровня БП.

Таким образом, необходимо провести соответствующий цикл исследований для получения функционально-аналитических зависимостей типа $P_{\text{ОФ}} = f(\sigma_x)$, $P_{\text{ОФ}} = f(K_{\Gamma})$, $P_{\text{ФР}} = f(K_{\text{Н}})$, $P_{\text{ФР}} = f(P_{\text{ош1}})$, $P_{\text{ФР}} = f(P_{\text{ош2}})$.

В рамках полученных зависимостей следует определить предельные значения σ_x , K_{Γ} , $P_{\text{ош1}}$, $P_{\text{ош2}}$, $K_{\text{Н}}$ и т. д., которые могут вызвать появление опасного фактора. Например, из-за ухудшения значений σ_x может возникнуть угроза опасного сближения двух ВС и т. д. Целесообразно для существующего анализа предварительно проранжировать степень влияния той или иной характеристики на БП.

При реализации концепции PBN в Российской Федерации необходимо проведение научных исследований, в которых следует найти соответствующие функциональные связи между заданными характеристиками, т. е. σ_x , K_{Γ} , $P_{\text{ош1}}$, $P_{\text{ош2}}$, $K_{\text{Н}}$, P_0 , T_0 и показателями БП, к которым относятся ОФ и ФР, выраженные в виде соответствующих вероятностей возникновения. При определенном значении σ_x , K_{Γ} или других показателей значение вероятности возникновения ОФ $P_{\text{ОФ}}$ может стать недопустимо высоким, переходящим в вероятность возникновения ФР $P_{\text{ФР}}$, что уже может послужить угрозой с точки зрения БП.

Для достижения цели исследования в статье были определены методы выявления опасных факторов и факторов риска для БП при реализации концепции PBN в Российской Федерации. Была определена взаимосвязь между показателями качества функционирования соответствующих систем и показателями, определяющими навигацию, основанную на характеристиках PBN.

Научная новизна полученных результатов заключается в определении опасных факторов и факторов риска при обеспечении нормативных значений характеристики PBN «точность», а также условий формирования опасных факторов и факторов риска при обеспечении требуемых значений характеристик PBN «целостность» и «готовность».

Список источников

1. ИКАО. Doc 9750-AN/963. Глобальный аэронавигационный план на 2016–2030 гг. 5-е изд. Монреаль: ИКАО, 2016. 137 с.
2. ИКАО. Doc 9992-AN/494. Руководство по использованию навигации, основанной на характеристиках (PBN), при построении воздушного пространства. Монреаль: ИКАО, 2013. 54 с.
3. ИКАО. Doc 9613-AN/937. Руководство по навигации, основанной на характеристиках (PBN). 4-е изд. Монреаль: ИКАО, 2013. 444 с.

4. ИКАО. Doc. 9859-AN/460. Руководство по управлению безопасности полетов (РУБП). 3-е изд. Монреаль: ИКАО, 2013. 300 с.
5. ИКАО. Doc 9997-AN/498. Руководство по эксплуатационному утверждению навигации, основанной на характеристиках (PBN). 2-е изд. Монреаль: ИКАО, 2015. 176 с.
6. План внедрения навигации, основанной на характеристиках (PBN) в воздушном пространстве РФ. М.: Росавиация. 2014. 27 с.
7. Рудельсон Л. Е., Смородский С. Н., Степаненко А. С. Стратегия контроля целостности данных в концепции управления общесистемной информацией // Научный вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20. № 4. С. 114–126.
8. Кулаков М. В., Чехов И. А. Анализ технологии взаимодействия органов ОВД на рубежах приема-передачи управления // Научный вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21. № 5. С. 23–33.
9. Кузнецов С. В., Марасанов Л. О., Перегудов Г. Е. Научно-практические аспекты производства полетов с использованием RVSM, PBN, CATII и CATIII, EDTO/ETOPS, TCAS, EGPWS и EFB // Научный вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20. № 1. С. 177–185.
10. Pratap Misra, Per Enge, *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*, Ganga, Jamuna Press, 2006, 569 p.
11. Стулов А. В., Кириков Ю. Н., Карасев К. В. Проблемы внедрения и использования спутниковых навигационных технологий в гражданской авиации России // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2020. № 30. С. 158–165.
12. Чехов И. А. Пути развития систем навигации в рамках внедрения концепции CNS/ATM // Научный вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20. № 4. С. 98–106.
13. Кушельман В. Я., Стулов А. В. Реализация концепции PRN ИКАО в гражданской авиации России // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2015. № 7 (318). С. 74–80.
14. Шаров В. Д., Елисеев Б. П., Воробьев В. В. Анализ недостатков в описании процедур управления риском безопасности полетов в документах ИКАО // Научный вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22. № 3. С. 49–60.
15. Воробьев В. В., Власова А. В. Роль радиоэлектронного оборудования в управлении безопасности полетов при реализации глобального аэронавигационного плана ИКАО // Научный вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20. № 4. С. 156–161.
16. Шапкин В. С., Демин С. С., Никитин А. В., Демин Д. С., Ковтушенко Д. В. К вопросу о применении рискоориентированного подхода в задаче обеспечения безопасности полетов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2017. № 16(327). С. 61–69.

References

1. ICAO. Doc 9750-AN/963, 2016–2030 Global Air Navigation Plan, 5th edition, Montreal, ICAO, 2016, 137 p.
2. ICAO. Doc 9992-AN/494, Manual On The Use of Performance Based Navigation (PBN) in Airspace Design, Montreal, ICAO, 2013, 54 p.
3. ICAO. Doc 9613-AN/937, Performance-based Navigation (PBN) Manual, 4th edition, Montreal, ICAO, 2013, 398 p.
4. ICAO. Doc 9859-AN/460, Safety Management Manual (SMM), 3d edition, Montreal, ICAO, 2013, 254 p.
5. ICAO. Doc. 9997-AN/498. Performance-Based Navigation (PBN) Operational Approval Manual, 2nd edition, Montreal, ICAO, 2015, 150 p.
6. *Plan vnedreniya navigatsii, osnovannoj na kharakteristikakh (RBN) v vozdushnom prostranstve RF*, Moscow, Rosaviatsiya Publ., 2014, 27 p. (In Russ.)
7. Rudel'son L. E., Smorodskiy S. N., Stepanenko A. S., Strategy of Data Integrity Control For System Wide Information Management Concept, *Civil Aviation High Technologies*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 114–126. (In Russ.)

8. Kulakov M. V., Chekhov I. A., Analysis of the coordination technology between ATC at the boundaries of control exchange, *Civil Aviation High Technologies*, 2018, vol. 21, no. 5, pp. 23–33. (In Russ.)
9. Kuznetsov S. V., Marasanov L. O., Peregudov G. E., Scientific and practical aspects of flight operations with RVSM, PBN, CATII, CATIII, EDTO/ETOPS, TCAS, EGPWS, EFB, *Civil Aviation High Technologies*, 2017, vol. 20, no. 1, pp. 177–185. (In Russ.)
10. Pratap Misra, Per Enge, *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance*, Ganga, Jamuna Press, 2006, 569 p.
11. Stulov A. V., Kirikov Yu. N., Karasev K. V., Problems of introduction and use of satellite navigation technologies in Russian Civil Aviation, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2020, no. 30, pp. 158–165. (In Russ.)
12. Chekhov I. A., Ways of navigation systems development within the implementation of the CNS/ATM Concept, *Civil Aviation High Technologies*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 98–106. (In Russ.)
13. Kushelman V. Ya., Stulov A. V., Implementation of the Concept PRN ICAO in Civil aviation in Russia, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2015, no. 7(318), pp 74–80. (In Russ.)
14. Sharov V. D., Eliseev B. P., Vorobyov V. V., Analysis of deficiencies in the procedures for the risk management of safety in the ICAO Documents, *Civil Aviation High Technologies*, 2019, vol. 22, no.3, pp. 49–60. (In Russ.)
15. Vorobyev V. V., Vlasova A. V., The role of navigational aids in flight safety management within ICAO Global Air Navigation Plan, *Civil Aviation High Technologies*, 2017, vol. 20, no. 4, pp. 156–161. (In Russ.)
16. Shapkin V. S., Demin S. S., Nikitin A. V., Demin D. S., Kovtushenko D. V., On the issue of applying a risk-based approach in the task of ensuring flight safety, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2017, no. 16(327), pp. 61–69. (In Russ.)

Информация об авторах

Арутюнян Давид Ваграмович, заместитель директора Департамента, Концерн ВКО «Алмаз – Антей», Москва, Россия, dave2@mail.ru

Феоктистова Оксана Геннадьевна, доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия, oksana-feoktistova@yandex.ru

Authors information

Arutyunyan David V., Deputy Director of Department, “Almaz – Antey” Air and Space Defence Corporation, Moscow, Russia, dave2@mail.ru

Feoktistova Oksana G., Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia, oksana-feoktistova@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 03.06.2022; одобрена после рецензирования 30.08.2022; принята к публикации 09.09.2022.

The article was submitted 03.06.2022; approved after reviewing 30.08.2022; accepted for publication 09.09.2022.

Научная статья
УДК 351.814.2

СИСТЕМА МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЛИКА КОМПЛЕКСА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЫЖИВАЕМОСТИ ГРАЖДАНСКИХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

А. В. КАН^{1,2}, М. А. СТЕПАНСКИЙ¹, Н. Б. ТОПОРОВ^{1,2}, А. П. ШАЛКАУСКАС^{1,2}, В. С. ШАПКИН²

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

²Национальный исследовательский центр «Институт им. Н. Е. Жуковского», Москва, Россия

Аннотация. Статья посвящена актуальному в настоящее время вопросу обеспечения безопасности воздушных судов в условиях террористических угроз. Рассмотрен новый подход к обеспечению безопасности за счет использования малых разведывательных беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Приведена общая постановка задачи нахождения рационального облика комплекса средств обеспечения выживания (КСОВ) воздушных судов (ВС) гражданской авиации (ГА), описана методика проведения исследований с использованием комплекса математического моделирования, рассмотрен модельный аппарат, позволяющий оценивать эффективность КСОВ и формировать требования как к КСОВ ВС ГА, так и к самому ВС. Рассмотренный в статье модельно-методический аппарат может применяться в дальнейших исследованиях, в частности, при синтезе облика рассматриваемой системы разведывательных БЛА и комплекса обороны ВС в целом. На основе анализа полученных результатов подобных исследований будет сформирован перечень требований к реальному прототипу КСОВ ВС ГА.

Ключевые слова: воздушные суда, выживаемость, моделирование, террористические угрозы, технический облик, комплекс обороны воздушного судна, беспилотные летательные аппараты

Для цитирования: Кан А. В., Степанский М. А., Топоров Н. Б., Шалкаускас А. П., Шапкин В. С. Система моделей формирования облика комплекса обеспечения выживаемости гражданских воздушных судов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 40. С. 88–99.

SYSTEM OF MODELS FOR FORMING THE APPEARANCE OF A COMPLEX FOR ENSURING THE VIABILITY OF CIVIL AIRCRAFT

A. V. KAN^{1,2}, M. A. STEPANSKIY¹, N. B. TOPOROV^{1,2}, A. P. SHALKAUSKAS¹, V. S. SHAPKIN²

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

²National Research Center “N. E. Zhukovsky Institute”, Moscow, Russia

Abstract. The article is devoted to the current issue of ensuring the safety of aircraft in the context of terrorist threats. A new approach to security through the use of small reconnaissance unmanned aerial vehicles (UAVs) has been considered. The general formulation of the problem of finding the rational appearance of the complex of means of ensuring the survival of aircraft of civil aviation (CA) was given, the method of conducting research using the complex of mathematical modeling was described, the model apparatus was considered, to assess the effectiveness of the Survival Management Suite (SMC) and to establish requirements both for the

aircraft survival system and for the aircraft itself. The model-methodical apparatus considered in the article, can be used in further research, in particular, in the synthesis of the appearance of the system of reconnaissance UAVs and the CA defence complex in general. On the basis of the analysis of the results of such studies, a list of requirements to the real prototype of SMC will be drawn up.

Keywords: aircraft, survival, modeling, terrorist threat, technical appearance, aircraft defense complex, unmanned aerial vehicles

For citation: Kan A. V., Stepanskiy M. A., Toporov N. B., Shalkauskas A. P., Shapkin V. S., System of models for forming the appearance of a complex for ensuring the viability of civil aircraft, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 40, pp. 88–99. (In Russ.)

Введение

Начиная с двадцатых годов 20-го века и до его окончания развитие научных и практических работ в области выживаемости воздушных судов (ВС) гражданской авиации (ГА) затрагивало только два, хотя и очень значимых направления: эксплуатационная надежность и выживаемость пассажиров и экипажа в условиях аварий (жесткая посадка, пожар и пр.).

Однако в конце 20-го века и в настоящее время в связи с ростом террористических угроз, а также технологической революцией, выразившейся в данном случае в существенно более высокой распространенности и доступности средств и систем маловысотной противовоздушной обороны (ПВО), существенно возросла опасность непосредственного поражения ВС ГА мало-высотной ПВО.

Угроза поражения ВС ГА ствольными системами ПВО (от стрелкового оружия до систем малокалиберной зенитной артиллерии) и зенитными управляемыми ракетами переносных комплексов актуальна как для маловысотных ВС ГА (вертолеты всех типов, самолеты местных и региональных воздушных линий), так и для магистральной авиации, в первую очередь, в районе аэродромов. Возрастает также риск для магистральных самолетов на эшелонах в связи с растущей доступностью зенитно-ракетных комплексов более высоких классов и истребительной авиации.

Все это сделало проблему обеспечения выживаемости летательных аппаратов в условиях организованного противодействия актуальной не только для боевой авиации, как это было ранее, но и для гражданской.

Так, например, структуры ООН предъявляют в настоящее время требования по оснащению гражданских вертолетов, выполняющих по контрактам задачи ООН, средствами повышения боевой живучести и системами противодействия управляемым ракетам с инфракрасными головками самонаведения.

Таким образом, вопрос об определении рациональной структуры комплекса средств обеспечения выживаемости (КСОВ) встает в настоящее время не только перед разработчиками боевых машин, но перед всей ГА.

Общая постановка задачи

Задача нахождения рационального облика КСОВ ВС ГА в целом аналогична такой же задаче в боевой авиации, но различается принятыми критериями.

Если в военной авиации основным показателем является выполнение целевой задачи, то критерий для ГА можно сформулировать как затраты на обеспечение заданного уровня выживаемости. Указанные критерии хотя и близки, но не идентичны.

Задача формирования облика ВС как авиационного комплекса (АК) заключается в определении рационального по принятому критерию эффективности набора характеристик ВС при условии, что этот АК способен выполнить всю совокупность поставленных перед ним задач $\{S\}$ [1].

Структура модели синтеза ВС k -го типа определяется следующими факторами:

- целевой задачей или совокупностью целевых задач ВС S_k ;
- множеством допустимых значений обликовых характеристик ВС X_{ak} ;
- множеством допустимых значений обликовых характеристик средств, противодействующих ВС или (и) являющихся его объектами воздействия Y_{ak} ;
- множеством допустимых способов действий (стратегий) ВС X_{ck} ;
- множеством допустимых способов действий противника Y_{ck} ;
- множеством условий выполнения ВС целевых задач Z_k ;
- относительной желательностью для оперирующей стороны того или иного результата операции (выполнения целевых задач).

Последнее обстоятельство раскрывается в модели путем введения критерия оптимальности W . Когда такой критерий введен, задача гарантированного синтеза ВС k -го типа сводится к нахождению такого вектора его обликовых параметров x_{ak}^0 , что

$$\bar{W}_{S_k}(x_{ak}^0) = \int \dots \int_{(z_{1k})} \inf_{\substack{x_{ak} \in X_{ak} \\ x_{ck} \in X_{ck}}} \sup_{\substack{y_{ak} \in Y_{ak} \\ y_{ck} \in Y_{ck} \\ z_{2k} \in Z_{2k}}} W_{S_k}(x_{ak}, y_{ak}, x_{ck}, y_{ck}, z_{1k}, z_{2k}) dF(z_{1k}),$$

если оперирующая сторона может получить и использовать при выборе X_{ak} информацию о реализации z_{1k} .

В противном случае

$$\bar{W}_{S_k}(x_{ak}^0) = \inf_{\substack{x_{ak} \in X_{ak} \\ x_{ck} \in X_{ck}}} \sup_{\substack{y_{ak} \in Y_{ak} \\ y_{ck} \in Y_{ck} \\ z_{2k} \in Z_{2k}}} \int \dots \int_{(z_{1k})} W_{S_k}(x_{ak}, y_{ak}, x_{ck}, y_{ck}, z_{1k}, z_{2k}) dF(z_{1k}),$$

где: z_{1k} – вектор, включающий компоненты вектора Z_k , для которых известна функция распределения F ;

z_{2k} – вектор, включающий компоненты вектора Z_k , о которых известно только, что $z_{2k} \in Z_{2k}$;

$\bar{W}_{S_k}(x_{ak}^0)$ – математическое ожидание значения критерия W_{S_k} , в качестве которого принят показатель потребных затрат ВС данного типа, необходимый для выполнения задач $\{S\}$.

Применительно к поставленной задаче проводится синтез только одной компоненты ВС, а именно – КСОВ.

Тогда для оптимизации облика КСОВ ВС ГА целесообразно использовать критерий класса «стоимость – эффективность», общий вид которого с учетом решения задачи в гарантированной постановке преобразуется в следующий:

$$\langle x_{ak}^{КСОВ} \rangle = \arg \min_{\substack{x_{ak} \in X_{ak} \\ x_{ck} \in X_{ck}}} \max_{\substack{y_{ak} \in Y_{ak} \\ y_{ck} \in Y_{ck} \\ z_{2k} \in Z_{2k}}} \int \dots \int_{(z_{1k})} W_{S_k}(x_{ak}, y_{ak}, x_{ck}, y_{ck}, z_{1k}, z_{2k}) dF(z_{1k}),$$

где: критерий W_{S_k} интерпретируется как затраты на выполнение объема работ $S_k(C_{S_k})$;

$x_{ak}^{КСОВ}$ – вектор технических характеристик КСОВ ВС ГА.

В силу сложности и многофакторности задачи получить аналитическое решение для принятого критерия эффективности крайне затруднительно. Вследствие этого исследования с целью обоснования состава и характеристик КСОВ ВС ГА проводятся с применением комплекса математического моделирования, как и другие исследования по формированию облика сложных организационно-технических авиационных систем и их элементов.

Методика проведения исследований

Рассмотрим методический подход к решению задачи формирования КСОВ ВС ГА с использованием комплекса математического моделирования [2].

Для получения корректных данных об эффективности того или иного средства защиты ВС условно разделим все рассматриваемые ВС на две группы. В качестве признака, по которому будем производить разделение, возьмем высотность полета.

К первой группе отнесем ВС как самолетного, так и вертолетного типа, осуществляющие полет на относительно малой высоте, что характерно при выполнении спасательных, строительных и прочих авиационных работ. Такие ВС уязвимы для атак с применением ствольных систем (начиная от стрелкового оружия и заканчивая полноценными зенитно-ствольными комплексами) и переносных зенитно-ракетных комплексов.

Ко второй группе рассматриваемых ВС отнесем пассажирские и транспортные самолеты, осуществляющие полет в основном на высотах больше 5 км. На крейсерских режимах подобные самолеты не попадают в возможную зону поражения стрелкового оружия, однако все еще уязвимы для него на режимах взлета и посадки.

При этом мы предполагаем, что ВС обеих групп не имеют возможности выполнять высокоскоростной полет на малых (до 500 м) и сверхмалых (50–100 м) высотах, и для этих ВС не проводятся конструктивные мероприятия по снижению демаскирующих признаков в основных диапазонах функционирования систем обнаружения и наведения зенитных средств (инфракрасный, радиолокационный и видимый диапазоны).

КСОВ ВС ГА может строиться по принципу оснащения каждого ВС средствами повышения боевой живучести и активной информационной обороны (как это делается для боевых ВС, вынужденных функционировать в зоне противодействия противника), на основе систем обнаружения средств ПВО, по информации от которых на борту (или на земле при наличии функционирующих средств коммуникации) формируются предложения по способам парирования возникшей угрозы.

Оба варианта построения имеют свои сильные и слабые стороны, обсуждение которых выходит за рамки настоящей работы.

Однако следует учитывать, что если методическая основа и модельный аппарат, позволяющие формировать КСОВ первого типа, достаточно подробно проработаны [3–5], то формирование КСОВ второго типа требует дополнительных исследований как в методическом, так и в практическом планах.

Так, например, одним из вариантов защиты является оснащение обороняемого ВС специализированным БЛА воздушного старта, который может быть запущен с самого ВС и осуществит разведку местности предполагаемого маршрута ВС, используя различные средства обнаружения угроз, а именно: телевизионные, инфракрасные и т. д. в сочетании с получившей широкое развитие в настоящее время системой распознавания образов. После осуществления разведки данный БЛА должен осуществить связь с бортом ВС, на котором по результатам полученных данных будет решаться задача выбора вариантов дальнейших действий, а именно: продолжение маршрута, отправка запроса поддержки наземными или воздушными силами, изменение маршрута или полный отказ от продолжения полета с последующим возвратом на аэродром базирования [6, 7].

В рамках такого подхода требуется создать модельный аппарат, позволяющий оценивать эффективность КСОВ и формировать требования как к КСОВ ВС ГА, так и к самому ВС.

Постановка задачи

Для того, чтобы определить рациональный облик КСОВ ВС ГА на основе разведывательных БЛА, необходимо разработать модельно-методический аппарат, при помощи которого может быть проведена оценка эффективности организации обороны ВС ГА.

Эффективность применения КСОВ предлагается оценивать в сравнении с традиционным способом преодоления соответствующей зоны (без применения разрабатываемого комплекса), основываясь на следующих показателях:

- вероятность поражения ВС на маршруте;
- удлинение маршрута;
- стоимость решения задачи.

Вероятность поражения ВС на маршруте рассчитывается исходя из времени пребывания ВС в зоне действия угрозы, удаления ВС от угрозы, характеристик и режима полета ВС.

Для расчета вероятности поражения ВС при наличии КСОВ и при его отсутствии рассматриваются два варианта. Первый учитывает пролет по маршруту, созданному на основании данных, полученных при полете БЛА, входящего в КСОВ, а второй – по наикратчайшему способу преодоления ВС зоны потенциального расположения угроз.

В качестве параметра, определяющего вероятность поражения ВС, было выбрано время нахождения в зоне поражения угрозы:

$$P_{\text{поражения}} = 1 - \exp(-t \ln(K_u)),$$

где: $K_u = 0,1 \dots 0,3$ – коэффициент противодействия – зависит от рубежа нахождения в зоне поражения угрозы;

t – время нахождения, мин.

Во время преодоления потенциальной зоны действия угроз в случае обнаружения угрозы происходит построение маршрута ВС, огибающего данную зону. Подобный маневр увеличит длину маршрута и, как следствие, стоимость расходных материалов, затраченных на выполнение полетного плана.

К затратам на проведение операции также необходимо добавить затраты на использование разведывательных БЛА. Помимо стоимости самих БЛА необходимо учитывать снижение массы коммерческой нагрузки, которую рассматриваемое ВС способно нести, в связи с размещением БЛА на борту ВС.

$$C_{\text{БЛА}}^{\Sigma} = n_{\text{БЛА}} C_{\text{БЛА}} + \Delta C_{\text{пн}} (n_{\text{БЛА}} m_{\text{БЛА}} + m_{\text{пк}}) / m_{\text{пн}},$$

где: $C_{\text{БЛА}}^{\Sigma}$ – суммарные затраты на применение разведывательных БЛА;

$n_{\text{БЛА}}$ – количество использованных разведывательных БЛА;

$m_{\text{БЛА}}$ – масса одного использованного разведывательного БЛА;

$m_{\text{пк}}$ – масса системы хранения и выброса БЛА на борту;

$C_{\text{БЛА}}$ – стоимость одного разведывательного БЛА;

$m_{\text{пн}}$ – максимальная масса полезной нагрузки ВС;

$\Delta C_{\text{пн}}$ – стоимость единицы полезной нагрузки.

Обобщая приведенные показатели, сформулируем показатель эффективности преодоления потенциально опасной зоны (стоимость операции):

$$C_{\text{ОП}} = C_{\text{ВС}} P_{\text{поражения}} + C_{\text{вылета}} + C_{\text{БЛА}}^{\Sigma},$$

где: $C_{\text{ВС}}$ – стоимость ВС;

$C_{\text{вылета}}$ – затраты на рейс ВС, включающие стоимость ГСМ и прочие прямые и косвенные расходы за время вылета.

Разработанный для оценки эффективности системы обороны АК ГА комплекс моделей, структурная схема которого приведена на рис. 1, обеспечивает:

- имитационное моделирование и оценку эффективности выполнения ВС задачи перевозки в условиях организованного противодействия;

- формирование и выбор рациональных тактик действий ВС и сил поддержки при преодолении потенциально опасной зоны;

- сравнительный анализ вариантов выполнения задачи с помощью различных вариантов оснащения ВС средствами обнаружения и предотвращения угроз.

Подход, примененный при моделировании, предполагает пошаговый анализ угроз в потенциально опасной зоне, производимый путем разбиения этой зоны на секторы, их последовательное рассмотрение с целью выявления угроз и построение оптимального маршрута внутри рассматриваемых секторов.

Основными моделями комплекса являются система моделей формирования и оптимизации траектории полета ВС и группа моделей, позволяющих оценить эффективность функционирования БЛА как элемента комплекса средств обеспечения выживания ВС.



Рис. 1. Структурная схема комплекса моделей

Модель формирования и оптимизации траектории полета ВС

Эта модель предназначена для выбора рационального маршрута преодоления зон ответственности средств наземной ПВО. Для нахождения рационального маршрута используются два основных критерия:

- время нахождения ВС в зоне действия угроз;
- отклонение от изначального маршрута.

Для построения оптимальной траектории полета ВС в данной работе используются методы теории графов. Для решения задачи с применением теории графов в первую очередь необходима дискретизация области возможных траекторий полета ВС. Представим рассматриваемый сектор местности с информацией об имеющихся в нем угрозах в виде матрицы размерности $n \times n$. Элементами матрицы будут являться показатели интенсивности угроз в каждом квадрате. Иными словами, составляется матрица опасности для каждого рассматриваемого сектора.

Интенсивность воздействия угрозы получим путем условного деления зоны поражения потенциальных угроз по уровню опасности на несколько внутренних зон. Каждой из полученных зон присвоим коэффициент интенсивности воздействия угрозы.

Представим полученную матрицу в виде графа для дальнейшего поиска оптимального маршрута и решим задачу, применив алгоритм Дейкстры [8].

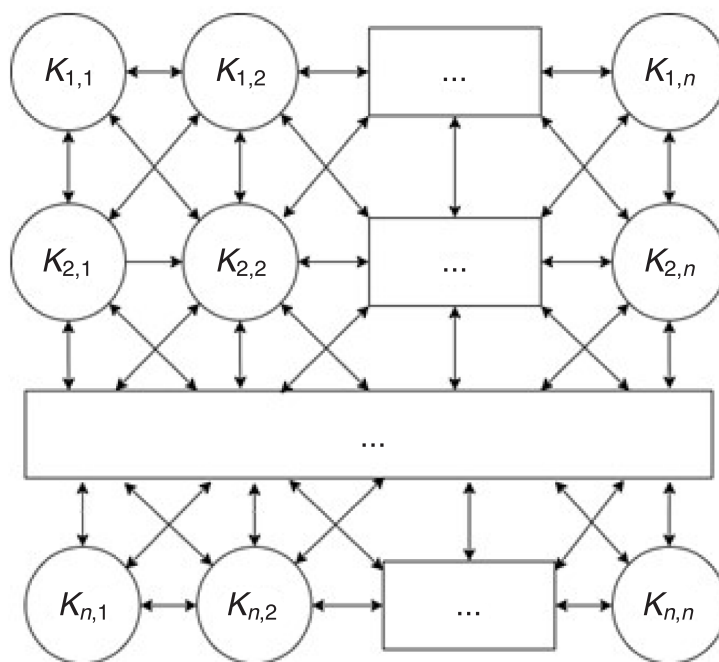


Рис. 2. Граф для поиска оптимального маршрута

Применение алгоритма Дейкстры к выбранным начальным условиям позволяет получить путь между вершинами графа, минимизирующий сформулированную целевую функцию. Путем последующего анализа полученного пути возможно построить траекторию полета ВС в рассматриваемых координатах.

Система моделей функционирования и оценки эффективности БЛА

В качестве средства проведения разведки предполагается использование БЛА, базирующихся на борту ВС.

Запуск БЛА с ВС происходит при помощи автомата сброса или автомата отстрела.

В качестве полезной нагрузки БЛА рассматривается комплекс оптических датчиков с единым объективом. В комплекс входят:

- объектив с изменяемым фокусным расстоянием в диапазоне 18–200 мм и углом обзора 12°;
- мнговолоконный оптический спектрометр;
- система распознавания образов;
- длинноволновый инфракрасный тепловизор.

Зависимость вероятностной оценки возможности получения четкого изображения, что эквивалентно вероятности обнаружения угрозы ($P_{\text{опт}}$), от высоты полета БЛА (H) представлена на рис. 3.

Характер распределения вероятности обнаружения угрозы для прочих типов датчиков является схожим.

Комплекс оптических датчиков дает единую вероятность обнаружения и оценки угрозы $P_{\text{оценки}}$, зависящую от вероятностей обнаружения угроз перечисленными системами и датчиками комплекса ($P_{\text{спектрометра}}$, $P_{\text{распозн. образов}}$, $P_{\text{ИК}}$), которая рассчитывается следующим образом:

$$P_{\text{оценки}} = 1 - (1 - P_{\text{спектрометра}})(1 - P_{\text{распозн. образов}})(1 - P_{\text{ИК}}).$$

У каждого оптического датчика есть вероятность «ложного» срабатывания – т. е. вероятность распознавания цели, которая на самом деле не представляет никакой угрозы [9, 10].

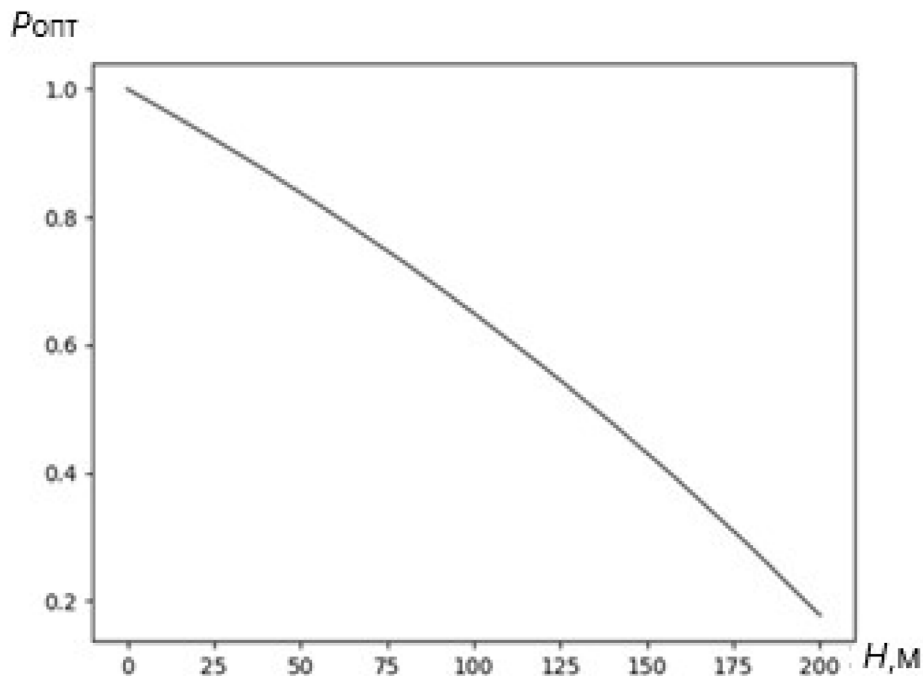


Рис. 3. Зависимость вероятности обнаружения угрозы от высоты полета БЛА

Модель поиска

В условиях автономного действия БЛА выполняют задачу поиска по заранее подготовленному плану, согласно которому выделяются небольшие по площади размеры прямолинейного поиска маршрутом типа «змейка».

Площадь сектора обследования S_{co} формируется исходя из максимальной дальности полета БЛА, задействованного в КСОВ.

Зона обзора датчиков БЛА аппроксимировалась ячейкой, размер которой выбирается в зависимости от высоты полета. Если угол зоны обзора равен α , то линейный размер ячейки поиска:

$$L = 2H \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}.$$

Для расчета количества ячеек в зоне поиска используется следующее соотношение:

$$n = \frac{S_{co}}{S_0},$$

где $S_0 = L^2$ – площадь обзора БЛА в конкретный момент времени (одна область).

Количество переходов по «змейке» внутри заданной области для полного ее обзора БЛА рассчитывается следующим образом:

$$k_{п} = \frac{S_k}{S_0}.$$

Время обследования всей области одним БЛА определяется как:

$$T = k_{п} \Delta t_{сп},$$

где $\Delta t_{сп} = \frac{L}{V_{БЛА}}$ – время смены перехода, $V_{БЛА}$ – скорость БЛА.

Для прохода алгоритма строится ряд координат, по которому будет выполняться полный обход обозреваемого сектора.

Оценка эффективности преодоления потенциально опасной зоны. Имея координаты и тип каждой обнаруженной угрозы, а также маршрут, выбранный из соображений минимизации воздействия угроз на ВС, необходимо оценить эффективность применения КСОВ ВС.

Результаты исследования. Сформулируем следующие условия операции:

- заданы размеры области потенциального расположения угроз;
- в зоне случайным образом размещены угрозы двух типов: переносной зенитно-ракетный комплекс (ПЗРК) и переносной ствольный комплекс (ПСК);
- ВС осуществляет преодоление зоны потенциального расположения угроз;
- ВС оснащено системой разведывательных БЛА.

При помощи разработанного модельного аппарата проведем ряд численных экспериментов с целью анализа эффективности предлагаемого подхода.

Для проведения эксперимента были выбраны следующие тактико-технические характеристики (ТТХ) БЛА:

- крейсерская скорость: 25 м/с;
- максимальная дальность полета: 90 км;
- размах крыла: 1,8 м;
- масса конструкции: 3 кг;
- максимальная снаряженная масса: 4,5 кг;
- силовая установка: 1 электродвигатель мощностью 25 кВт;
- практический потолок: 3400 м.

На рис. 4 окружностями обозначены области действия угроз, расположенных в рассматриваемой области. Штриховкой обозначены угрозы, добавленные в результате ложного срабатывания группы сенсоров информационных систем разведывательных БЛА. Сплошной линией обозначена траектория полета ВС, построенная на основании разведанных, полученных при помощи системы разведывательных БЛА. Пунктиром обозначена траектория полета ВС без учета разведанных.

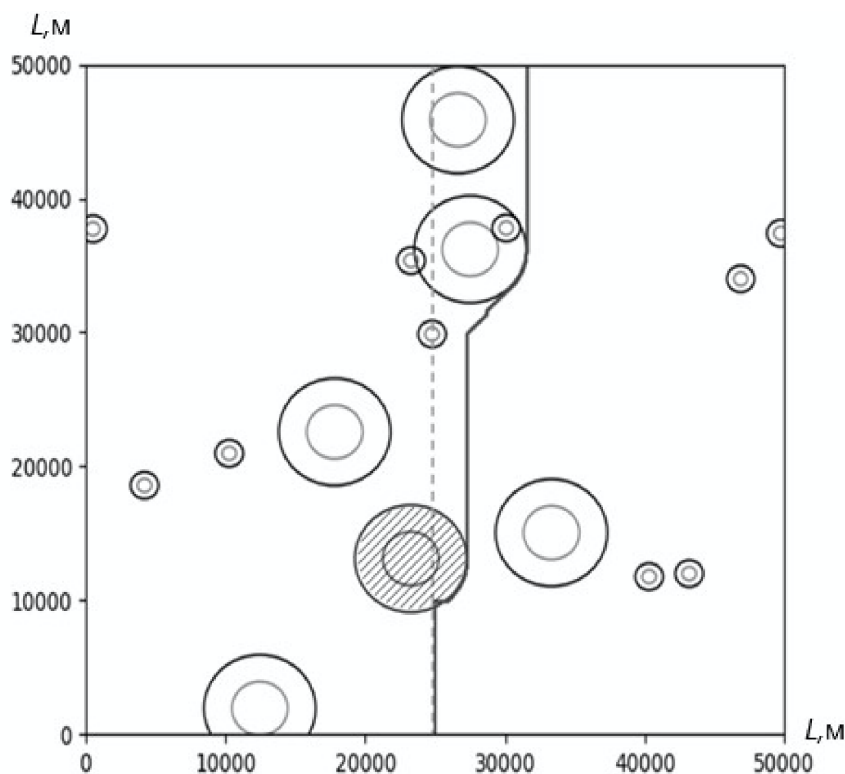


Рис. 4. Траектории полета ВС в области вероятных угроз

Несмотря на наличие ложных срабатываний сенсоров информационных систем разведывательных БЛА, траектория, полученная с использованием предложенного подхода, избегает попадания в зоны действия угроз, обеспечивая меньшую вероятность поражения ВС по сравнению с традиционным подходом.

Поскольку имитационный модельный аппарат предполагает учет принятого закона распределения характеристик угроз, необходимо повторить вышеупомянутый численный эксперимент n раз. В приведенном численном эксперименте число n принято равным 1000.

Анализ полученного набора данных дает среднее увеличение длины маршрута на 25 % при среднем увеличении вероятности выживания на 40 % в результате применения системы разведывательных БЛА.

Заключение

В работе предложены способы повышения выживаемости гражданских ВС при преодолении ими потенциально опасных зон. Помимо стандартных способов повышения выживаемости, рассмотрен принципиально новый подход, заключающийся в применении системы разведывательных БЛА воздушного старта.

В рамках исследования создан и реализован модельно-методический аппарат, с помощью которого путем проведения ряда численных экспериментов обоснована эффективность применения указанного подхода.

Разработанный модельно-методический аппарат может применяться в дальнейших исследованиях, в частности, при синтезе облика рассматриваемой системы разведывательных БЛА и комплекса обороны ВС в целом. Результатом проведения подобных исследований должен стать перечень требований к системе, на основании которого может быть создан реальный прототип подобной системы.

Список источников

1. Бухановский А. В., Ковальчук С. В., Марьин С. В. Интеллектуальные программные комплексы компьютерного моделирования сложных систем: концепция, архитектура и примеры реализации // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2009. Т. 52. № 10. С. 5–24.
2. Топоров Б. П., Горлов В. М. Проблемы формирования рационального облика и типажа сложных технических систем, функционирующих в условиях конфликта и неопределенностей. // Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды IV Международной конференции. Самара, 2002. С. 273–281.
3. Топоров Н. Б. Исследование по обоснованию рационального состава и размерности комплекса средств обеспечения выживаемости самолетов транспортной авиации // Научный вестник МГТУ ГА. 2010. № 157. С. 58–63.
4. Топоров Н. Б. Принципы и особенности технологии создания комплексов моделирования и поддержки принятия решений в области совершенствования технического оснащения государственной авиации // «Авиационные системы в XXI веке»: сборник трудов юбилейной всероссийской научно-технической конференции. Москва, 26–27 мая 2016 г. Москва. ФГУП ГосНИИАС, 2017. С. 124–129.
5. Кропова В. В., Топоров Н. Б. Интегрированная среда моделирования и оценки эффективности ЛА // Авиационные системы в XXI веке: сборник трудов юбилейной научно-технической конф. Т. 1. Москва. ФГУП ГосНИИАС, 2006. С. 539–547.
6. Шалкаускас А. П. Исследование эффективности применения БЛА воздушного старта в интересах повышения выживаемости авиационных комплексов // Навигация, наведение и управление летательными аппаратами. IV Всероссийская научно-техническая конференция. Тезисы докладов. Москва 14–15 ноября 2019 г. ФГУП ГосНИИАС, 2019. С. 62–65.

7. Янгиров А. И. Обзор и анализ современного рынка средств борьбы с БПЛА / В сборнике: Актуальные вопросы эксплуатации систем охраны и защищенных телекоммуникационных систем. Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции. 2019. С. 302–303.
8. Дейкстра Э. Дисциплина программирования. Москва: Мир, 1978. 280 с.
9. Ким Н. В., Кузнецов А. Г., Крылов И. Г. Применение систем технического зрения на беспилотных летательных аппаратах в задачах ориентации на местности // Вестник Московского авиационного института. 2010. Т. 17. № 3. С. 42–49.
10. Визильтер Ю. В., Желтов С. Ю. Проблемы технического зрения в современных авиационных системах / В сборнике: Техническое зрение в системах управления мобильными объектами-2010. Сборник трудов научно-технической конференции-семинара. 2011. С. 11–44.

References

1. Buhanovskij A. V., Koval'chuk S. V., Mar'in S. V., Intellektual'nye programmnye komplekсы komp'yuternogo modelirovaniya slozhnyh sistem: koncepcija, arhitektura i primery realizacii, *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie*, 2009, vol. 52, no. 10, pp. 5–24. (In Russ.)
2. Toporov B. P., Gorlov V. M., Problemy formirovaniya racional'nogo oblika i tipazha slozhnyh tehniceskikh sistem, funkcionirujushhih v uslovijah konflikta i neopredeljonnostej, *Problemy upravlenija i modelirovaniya v slozhnyh sistemah. Trudy IV Mezhdunarodnoj konferencii*, Samara, 2002, pp. 273–281. (In Russ.)
3. Toporov N. B., The study on motivation of the rational composition and dimensionality of the complex of the facilities of the survival potential provision of transport aviation planes, *Nauchnyj vestnik MGTU GA*, 2010, no. 157, pp. 58–63. (In Russ.)
4. Toporov N. B., Principy i osobennosti tehnologii sozdaniya kompleksov modelirovaniya i podderzhki prinjatija reshenij v oblasti sovershenstvovaniya tehničeskogo osnashhenija gosudarstvennoj aviacii, *Aviacionnye sistemy v XXI veke, sbornik trudov jubilejnoj vserossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferencii*, Moscow, 26–27 May 2016, FGUP GosNIIAS Publ., 2017, pp. 124–129. (In Russ.)
5. Kropova V. V., Toporov N. B., Integrirovannaja sreda modelirovaniya i ocenki jeffektivnosti LA, *Aviacionnye sistemy v XXI veke: sbornik trudov jubilejnoj nauchno-tehnicheskoy konf.*, vol. 1, Moscow, 2006, FGUP GosNIIAS Publ., pp. 539–547. (In Russ.)
6. Shalkauskas A. P., Issledovanie jeffektivnosti primeneniya BPLA vozdušnogo starta v interesah povysheniya vyzhivaemosti aviacionnyh kompleksov, *Navigacija, navedenie i upravlenie letatel'nymi apparatami. IV Vserossijskaja nauchno-tehnicheskaja konferencija*, Tezisy dokladov, Moscow, 14–15 Nov 2019, FGUP GosNIIAS Publ., 2019, pp. 62–65. (In Russ.)
7. Jangirov A. I., Obzor i analiz sovremennogo rynka sredstv bor'by s BPLA, *Aktual'nye voprosy jekspluatacii sistem ohrany i zashchishhennyh telekommunikacionnyh sistem. Sbornik materialov Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii*, 2019, pp. 302–303. (In Russ.)
8. Dijkstra E., *A Discipline of Programming*, Englewood Cliffs, NJ, 1976, Prentice-Hall, Inc., 217 p.
9. Kim N. V., Kuznecov A. G., Krylov I. G., Application of systems of technical vision on pilotless flying machines in problems of orientation to districts, *Aerospace MAI journal*, 2010, vol. 17, no. 3, pp. 42–49. (In Russ.)
10. Vizil'ter Ju. V., Zheltov S. Ju., Problemy tehničeskogo zrenija v sovremennyh aviacionnyh sistemah, *Tehničeskoe zrenie v sistemah upravlenija mobil'nymi ob'ektami-2010. Sbornik trudov nauchno-tehnicheskoy konferencii-seminara*, 2011, pp. 11–44. (In Russ.)

Информация об авторах

Кан Анна Владимировна, кандидат технических наук, начальник аналитического отдела департамента координации и сопровождения программ, Национальный исследовательский центр «Институт им. Н. Е. Жуковского», Москва, Россия, kanav@nrczh.ru

Степанский Максим Анатольевич, аспирант, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия, stepansky.maxim@gmail.com

Топоров Николай Борисович, доктор технических наук, директор проектного комплекса, Национальный исследовательский центр «Институт им. Н. Е. Жуковского», Москва, Россия, toporovnb@nrczh.ru

Шалкаускас Андрей Петрович, аспирант, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия, a.shalkauskas@yandex.ru

Шапкин Василий Сергеевич, лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, заслуженный работник транспорта РФ, доктор технических наук, профессор, первый заместитель генерального директора, Национальный исследовательский центр «Институт им. Н. Е. Жуковского», Москва, Россия, shapkinvs@nrczh.ru

Authors information

Kan Anna V., Candidate of Sciences (Engineering), Head of the Analytical Department of the Department for Coordination and Support of Programs, National Research Center “Institute named after Zhukovsky”, Moscow, Russia, kanav@nrczh.ru

Stepansky Maxim A., Postgraduate, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia, stepansky.maxim@gmail.com

Toporov Nikolay B., Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Head of the Department, National Research Center “Institute named after Zhukovsky”, Moscow, Russia, toporovnb@nrczh.ru

Shalkauskas Andrey P., Postgraduate, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia, a.shalkauskas@yandex.ru

Shapkin Vasily S., Laureate of the Government of the Russian Federation in the field of science and technology, Honored Worker of Transport of the Russian Federation, Doctor of Sciences (Engineering), Professor, First Deputy General Director, National Research Center “Institute named after Zhukovsky”, Moscow, Russia, shapkinvs@nrczh.ru

Статья поступила в редакцию 10.06.2022; одобрена после рецензирования 11.10.2022; принята к публикации 17.10.2022

The article was submitted 10.06.2022; approved after reviewing 11.10.2022; accepted for publication 17.10.2022.

Научная статья

УДК 656.7.072.078+330.101.54

АНАЛИЗ АВИАЦИОННОЙ ПОДВИЖНОСТИ НАСЕЛЕНИЯ И ЕЕ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ ПО РЕГИОНАМ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

А. А. ФРИДЛЯНД, А. П. ЧУБУКОВ, Р. Р. НИЗАМЕТДИНОВ

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. Гражданская авиация – одна из ключевых составляющих российской транспортной системы, вносит значительный вклад в развитие экономики страны. Одной из основных характеристик развитости гражданской авиации и качества жизни населения является авиационная подвижность (авиаподвижность) населения. В статье приведены результаты анализа показателей авиаподвижности населения как в целом по стране, так и по отдельным федеральным округам на основе данных 2019 года (последнего года «доковидного» периода), что позволило учесть исторически сложившуюся структуру пассажирских авиаперевозок в федеральных округах без влияния на нее факторов, сформировавшихся в рамках антиковидной политики государств. При исследовании структурированы три основных составляющих авиаподвижности населения: общая, столичных городов и крупных населенных пунктов, прочего населения. Исследование авиаподвижности проведено по федеральным округам России, с учетом их региональной специфики и влияния основных социально-экономических факторов.

Ключевые слова: воздушный транспорт, гражданская авиация, авиационная подвижность, авиапассажир, пассажирские авиаперевозки, федеральный округ, аэропорт, транспортная инфраструктура

Для цитирования: Фридлянд А. А., Чубуков А. П., Низаметдинов Р. Р. Анализ авиационной подвижности населения и ее дифференциация по регионам Российской Федерации // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 40. С. 100–110.

ANALYSIS OF AIR MOBILITY OF THE POPULATION AND ITS DIFFERENTIATION BY REGIONS OF RUSSIAN FEDERATION

A. A. FRIDLYAND, A. P. CHUBUKOV, R. R. NIZAMETDINOV

The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract. Civil aviation is one of the key components of the Russian transport system, making a significant contribution to the development of the country's economy. One of the main characteristics of the development of civil aviation and the quality of life of the population is the aviation mobility (air mobility) of the population. The article presents the results of the analysis of the indicators of air mobility of the population both in the whole country and in individual federal districts, based on the data of 2019 (the last year of the “pre-covid” period), which made it possible to take into account the historically established structure of passenger air transportation in federal districts, without the influence of factors formed within the framework of the government anti-covid policy. In the study, the air mobility of the population was structured into three main components: the general air mobility of the population, the air mobility of the population of metropolitan cities and large settlements, the air mobility of the other population. The study of air mobility was conducted in the federal districts of Russia, taking into account their regional specifics and the influence of the main socio-economic factors.

Keywords: air transport, civil aviation, mobility (air mobility), air passenger, passenger air transportation, federal district, airport, transport infrastructure

For citation: Fridlyand A. A., Chubukov A. P., Nizametdinov R. R., Analysis of air mobility of the population and its differentiation by regions of Russian Federation, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 40, pp. 100–110. (In Russ.)

Введение

Авиационная подвижность (авиаподвижность) – важная характеристика уровня развития страны и составляющая качества жизни населения [1–3]. Исследование этой характеристики имеет большое значение для такой страны как Россия, которая характеризуется высокой дифференциацией географических, климатических и социально-экономических условий жизни жителей различных регионов. На территории России присутствуют обширные регионы с труднодоступными территориями с неразвитой наземной транспортной инфраструктурой и сложными климатическими условиями. В этих регионах как для бизнеса, так и для населения наличие воздушного транспорта является единственным способом поддержания транспортной связности с другими территориями страны и мира. Мониторинг показателя авиаподвижности населения формирует информационную основу для объективного анализа государственных программ стимулирования пассажирских авиаперевозок [4–6], а также действующих программ и стратегий отраслевого развития [7].

Для проведения исследования в качестве базового использовался 2019 год (предковидный), что позволило учесть исторически сложившуюся структуру пассажирских авиаперевозок в регионах без влияния на нее факторов, формировавшихся антиковидными мерами как по стране в целом, так и в транспортных отраслях.

Цель проведенного исследования – выявить дифференциацию авиаподвижности населения по основным регионам страны и обуславливающие ее факторы.

Термины и определения, методология проведения исследования

В исследовании для изучения структуры авиаподвижности населения использовались следующие показатели:

I. Общая авиаподвижность населения региона – S_o (в качестве регионов здесь и далее рассматриваются федеральные округа (ФО) Российской Федерации), определяемая отношением общего количества авиапассажиров, обслуженных аэропортами региона за год, к общей численности населения региона:

$$S_o = \Pi_o / N_o,$$

где Π_o – общее количество авиапассажиров, обслуженных в регионе за год (пасс.);

N_o – общая численность населения региона (чел.).

При расчете авиаподвижности населения региона S_o общее количество пассажиров, обслуженных за год в аэропортах региона (по данным Формы государственной статистической отчетности 15-ГА, далее Ф-15 ГА [8]), корректируется для исключения двойного счета количества обслуженных пассажиров на внутренних воздушных линиях (ВВЛ), т. е. пассажиры ВВЛ учитываются с коэффициентом 0,5.

II. Общая авиаподвижность населения столиц и крупных¹ городов и населенных пунктов региона, обеспеченных авиасообщением через аэропорты, принимающие ВС 1–3 класса [9], далее

¹ К крупным городам и населенным пунктам, обеспеченным авиасообщением, относим города и населенные пункты, имеющие численность населения более 100 тыс. чел. (в СФО и ДФО – более 50 тыс. чел., что связано со структурными особенностями регионов) и действующий аэропорт, обслуживающий ВС 1–3 класса, расположенный на расстоянии до 100 км (по автодороге).

по тексту – обеспеченных необходимым авиасообщением, определяемая отношением общего количества авиапассажиров, обслуженных столичными и относительно крупными аэропортами городов и населенных пунктов региона, обеспеченных необходимым авиасообщением, к населению указанных городов и населенных пунктов:

$$S_{кр} = \Pi_{кр} / N_{кр},$$

где $\Pi_{кр}$ – перевозки авиапассажиров, обслуженных столичными и относительно крупными аэропортами городов и населенных пунктов региона, обеспеченных необходимым авиасообщением (пасс.);

$N_{кр}$ – общая численность населения столиц и крупных городов и населенных пунктов региона, обеспеченных необходимым авиасообщением, (чел.).

При расчете авиаподвижности населения региона $S_{кр}$ общее количество пассажиров, обслуженных за год в аэропортах региона, как и при расчете S_o (с использованием данных Ф-15 ГА) корректируется для исключения двойного счета количества обслуженных пассажиров на ВВЛ, т. е. пассажиры ВВЛ учитываются с коэффициентом 0,5.

III. Общая авиаподвижность прочего населения региона (населения, которое проживает в данном регионе, но не входит в число учтенных выше в составе $N_{кр}$ жителей). Рассчитывается, как отношение числа перевезенных прочих пассажиров к прочему населению региона:

$$S_{п} = \Pi_{п} / N_{п},$$

где $N_{п} = N_o - N_{кр}$ – прочее население; $\Pi_{п} = \Pi_o - \Pi_{кр}$ – прочие авиаперевозки из/в/через регион.

Численность населения России и ФО, крупных городов и населенных пунктов выявлялась на основе данных Росстата. Оценка авиационной подвижности населения учитывает не только местных жителей региона, но и гостей, перемещающихся через аэропорты региона.

Общая информация по территории и населению федеральных округов Российской Федерации

Информация подготовлена на основании данных по федеральным округам Статистического справочника [10].

Центральный ФО – ЦФО. Территория площадью 650,2 тыс. км² (3,80 % от территории России). Численность населения – 39253 тыс. чел. (26,84 % от численности населения России). Административный центр – Москва.

В округ входят 18 субъектов Российской Федерации: Белгородская область, Брянская область, Владимирская область, Воронежская область, Ивановская область, Калужская область, Костромская область, Курская область, Липецкая область, Московская область, Орловская область, Рязанская область, Смоленская область, Тамбовская область, Тверская область, Тульская область, Ярославская область, город федерального значения Москва.

Северо-Западный ФО – СЗФО. Территория площадью 1687 тыс. км² (9,9 % от территории России). Численность населения – 13941,959 тыс. чел. (9,5 % от численности населения России). Административный центр округа – Санкт-Петербург.

В округ входят 11 субъектов Российской Федерации: Республика Карелия, Республика Коми, Архангельская область, Вологодская область, Калининградская область, Ленинградская область, Мурманская область, Новгородская область, Псковская область, город федерального значения Санкт-Петербург, Ненецкий автономный округ.

Приволжский ФО – ПФО. Территория площадью 1036,975 тыс. км² (6,06 % от территории России). Численность населения составляет 29070,827 тыс. чел. (19,89 % от численности

населения России). Административный центр – Нижний Новгород, крупнейший город округа – Казань.

В состав округа входят 14 субъектов Российской Федерации: Республика Башкортостан, Кировская область, Республика Марий Эл, Республика Мордовия, Нижегородская область, Оренбургская область, Пензенская область, Пермский край, Самарская область, Саратовская область, Республика Татарстан, Удмуртская Республика, Ульяновская область, Республика Чувашия.

Южный ФО – ЮФО. Территория площадью 447,821 тыс. км² (2,61 % от территории России). Численность населения – 16482,488 тыс. чел. (11,28 % от численности населения России). Административный центр округа – Ростов-на-Дону.

В пределах округа находятся 8 субъектов Российской Федерации: Республика Адыгея (Адыгея), Республика Калмыкия, Республика Крым, Краснодарский край, Астраханская область, Волгоградская область, Ростовская область, город федерального значения Севастополь.

Северо-Кавказский ФО – СКФО. Территория площадью 170,439 тыс. км² (1 % от территории России). Численность населения - 9967,301 тыс. чел. (6,82 % от численности населения России). Административный центр – Пятигорск.

В округ входят 7 субъектов Российской Федерации: Республика Дагестан, Республика Ингушетия, Кабардино-Балкарская Республика, Карачаево-Черкесская Республика, Республика Северная Осетия – Алания, Чеченская Республика, Ставропольский край.

Уральский ФО – УФО. Территория площадью 1818,497 тыс. км² (10,62 % от территории России). Численность населения – 12329,5 тыс. чел. (8,43 % от численности населения России). Административный центр – Екатеринбург.

В УФО входят 6 субъектов Российской Федерации: Курганская область; Свердловская область; Челябинская область; Тюменская область (Ямало-Ненецкий и Ханты-Мансийский – Югра автономные округа входят в состав Тюменской области).

Сибирский ФО – СФО. Территория площадью 4362 тыс. км² (25,47 % от территории России). Численность населения – 17003,927 тыс. чел. (11,63 % от численности населения России). Административный центр – Новосибирск.

В СФО входят 10 субъектов Российской Федерации: Республика Алтай, Республика Тыва, Республика Хакасия, Алтайский край, Красноярский край, Иркутская область, Кемеровская область (Кузбасс), Новосибирская область, Омская область, Томская область.

Дальневосточный ФО – ДФО. Территория площадью 6952,6 тыс. км² (40,6 % от территории России). Численность населения – 8124,053 чел. (5,56 % от численности населения России). Административный центр – Владивосток.

В ДФО входят 11 субъектов Российской Федерации: Республика Бурятия, Республика Саха (Якутия), Забайкальский край, Камчатский край, Приморский край, Хабаровский край, Амурская область, Магаданская область, Сахалинская область, Еврейская автономная область, Чукотский автономный округ.

Результаты оценки показателей авиационной подвижности населения по ФО представлены в табл. 1.

Таблица 1

Авиаподвижность населения Российской Федерации (по федеральным округам)

Параметр	ЦФО	СЗФО	ПФО	ЮФО	СКФО	УФО	СФО	ДФО
N_0 , чел.	39252960	1394 959	29070827	16482488	9967301	12329500	17003927	8124053
P_0 , пасс.	77977287	16666706	10202424	12913721	3318268	9346575	10120546	7064995
S_0 , полетов/ чел.	1,99	1,20	0,35	0,78	0,33	0,76	0,60	0,87

Продолжение таблицы 1

Параметр	ЦФО	СЗФО	ПФО	ЮФО	СКФО	УФО	СФО	ДФО
$N_{кр}$, чел.	21741095	7825219	12897440	6713647	2950964	5826491	8470169	3491404
$N_{п}$, чел.	17511865	6116740	16173387	9768841	7016337	6503009	8533758	4632649
$P_{кр}$, пасс.	77977287	16453072	10179299	12744411	3318268	8905372	9763304	6164447
$P_{п}$, пасс.	0	213 635	23 126	169 310	0	441 203	357 242	900 548
$S_{кр}$, полетов/ чел.	3,59	2,10	0,79	1,90	1,12	1,53	1,15	1,77
$S_{п}$, полетов/ чел.	0	0,03	0,0014	0,02	0,00	0,07	0,04	0,19

Оценка авиаподвижности населения России (в целом) представлена в табл. 2.

Таблица 2

Авиаподвижность населения Российской Федерации (сводные данные)

Параметр	Значение
N_o , чел.	146173015
P_o , пасс.	147610520
S_o , полетов/чел.	1,01
$N_{кр}$, чел.	69916429
$N_{п}$, чел.	76256586
$P_{кр}$, пасс.	145505457
$P_{п}$, пасс.	2105063
$S_{кр}$, полетов/чел.	2,08
$S_{п}$, полетов/чел.	0,03

На рис. 1–3 представлены оценки авиаподвижности населения по России и ФО, размерность – число полетов в год на одного жителя, что позволяет сделать следующие выводы.

I. Общая авиаподвижность населения России в «предковидный» 2019 год составила 1,01 полетов на человека в год. Указанный уровень авиаподвижности существенно (в 2,4–2,95 раза) уступает авиаподвижности населения таких крупных по географическим размерам стран с развитой экономикой, как США, Австралия, Канада. Причиной указанного отставания является то, что воздушный транспорт России за последние 30 лет увеличил объем пассажирских перевозок ~ на 30 %, в то время как международная гражданская авиация в этот период росла со средним темпом (4,5–5,0) % в год и выросла в целом ~ в 4 раза.

II. В отношении общей авиационной подвижности населения по ФО (рис. 1):

- на уровне, существенно превышающем среднероссийский, находится ЦФО;
- на уровне выше среднероссийского находится СЗФО;
- на уровне несколько ниже среднероссийского или вблизи него находятся ЮФО, УФО, СФО и ДФО;
- на уровне, существенно ниже среднероссийского, находятся ПФО и СКФО.

III. В отношении общей авиационной подвижности населения столиц и крупных городов и населенных пунктов регионов, обеспеченных необходимым авиасообщением, по ФО (рис. 2):

- на уровне, существенно превышающем среднероссийский, находится ЦФО;
- на уровне выше среднероссийского находится СЗФО;
- на уровне несколько ниже среднероссийского или вблизи него находятся ЮФО, УФО и ДФО;
- на уровне, существенно ниже среднероссийского, находятся ПФО, СКФО и СФО.

IV. В отношении общей авиационной подвижности прочего населения России (полетов/чел.), по ФО (рис. 3):

- на уровне, существенно превышающем среднероссийский, находится ДФО;
- на уровне выше среднероссийского находятся СЗФО, УФО и СФО;
- на уровне существенно ниже среднероссийского находятся ЦФО, ПФО, ЮФО и СКФО.

Соответственно, статистически значимые объемы местных авиаперевозок к настоящему времени в России сохранились лишь в ДФО, УФО, СФО и СЗФО.

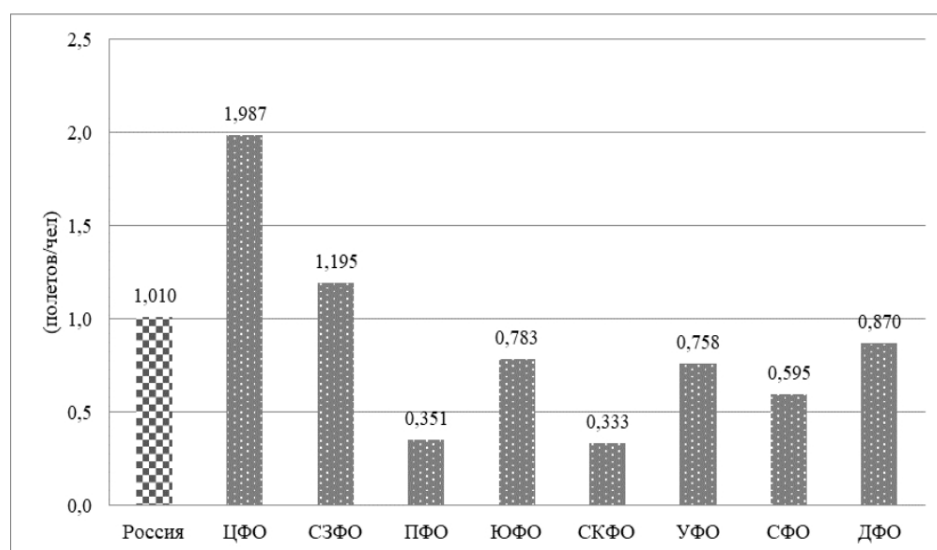


Рис. 1. Общая авиаподвижность населения по России и ФО

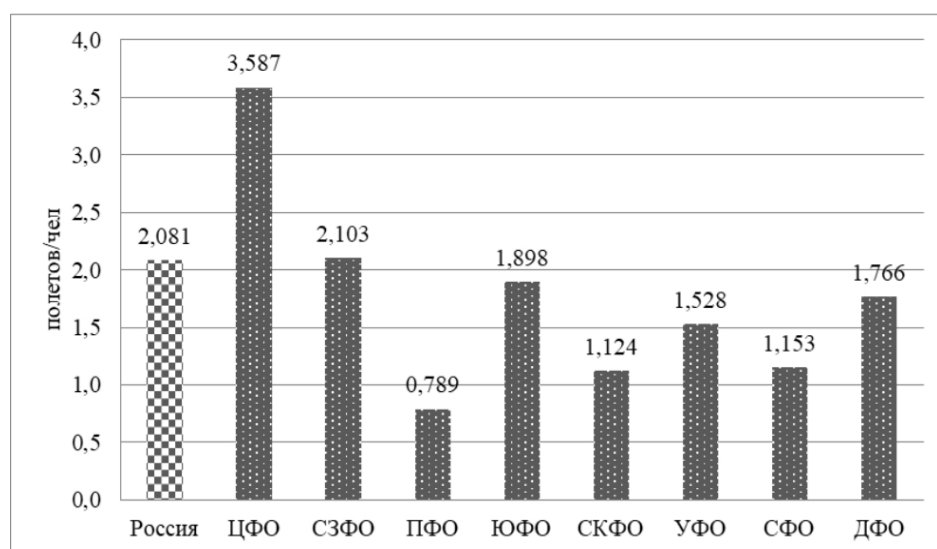


Рис. 2. Общая авиаподвижность населения столиц и крупных городов и населенных пунктов России, обеспеченных необходимым авиасообщением

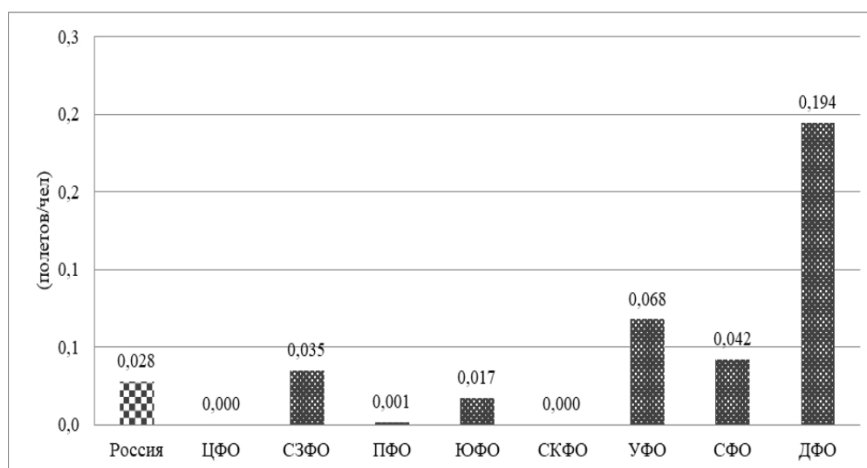


Рис. 3. Общая авиаподвижность прочего населения по России и ФО

Из рис. 4 следует, что более высокая плотность автомобильных и железных дорог характерна для районов крупных городов (мегаполисов) с высокой плотностью населения и повышенными доходами. В таких зонах, как правило, построены крупные аэропорты, принимающие современные авиалайнеры. Перечисленные факторы способствуют росту авиаподвижности населения указанных регионов.

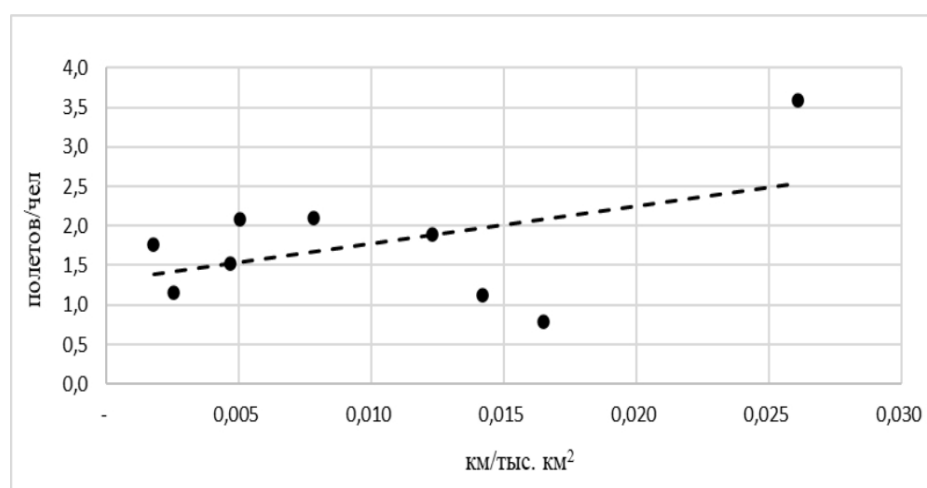


Рис. 4. Зависимость авиаподвижности крупных городов и населенных пунктов от плотности автомобильных и железных дорог в регионе

Рис. 5 показывает, что в зоне более высокой плотности расселения населения, характерной для территорий крупных городов (мегаполисов), с высокой плотностью населения и повышенными доходами, растет и авиаподвижность населения. Аналогичным образом в зоне низкой плотности автомобильных и железных дорог, которая характерна для территорий с низкой плотностью населения и далеко разбросанными населенными пунктами, имеется и потребность и возможности использования местной пассажирской авиации, что также способствует росту спроса на местные авиаперевозки и соответствующему росту авиаподвижности населения. Отсюда на рис. 5 наблюдаем параболический характер зависимости авиаподвижности городского населения от плотности его расселения по территории ФО.

На рис. 6 видно, что в рассматриваемой группе чем ниже плотность (густота) дорог, тем выше спрос на местные авиаперевозки. При росте плотности расположения автодорог и железных дорог авиаподвижность в кластере прочего населения снижается.

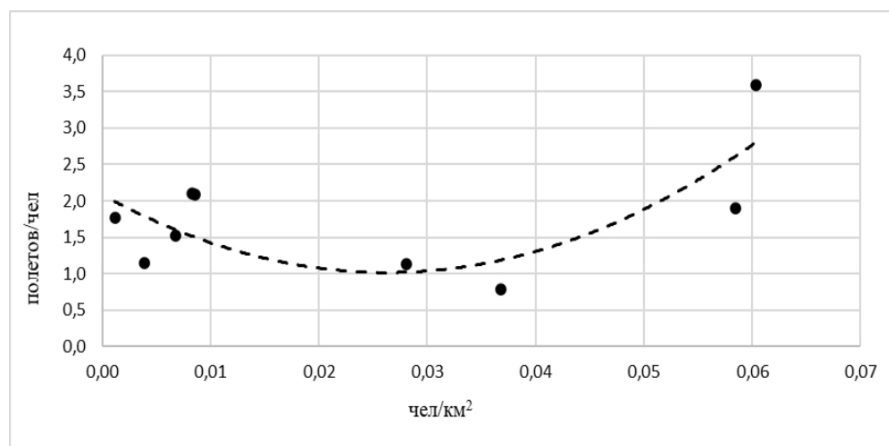


Рис. 5. Зависимость авиаподвижности крупных городов и населенных пунктов от плотности распределения населения

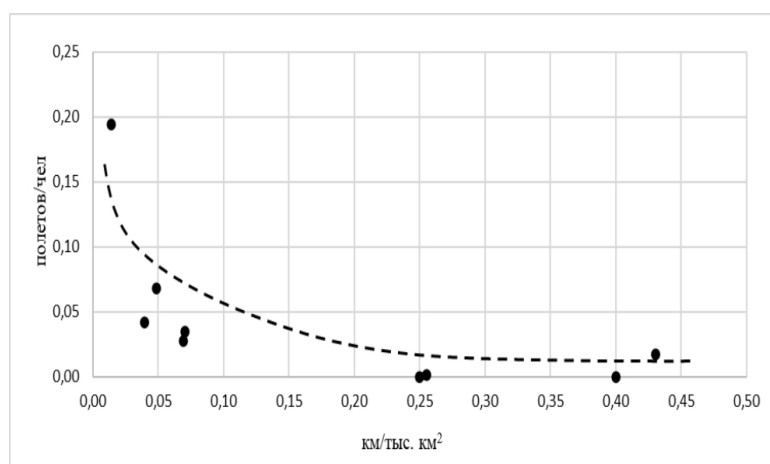


Рис. 6. Зависимость авиаподвижности прочего населения от плотности автомобильных и железных дорог в регионе

На рис. 7 видно, что в рассматриваемой группе чем ниже плотность населения в регионе (т. е. люди живут более удаленно друг от друга, в том числе далеко от крупных региональных центров), тем выше потребность в местных перевозках.

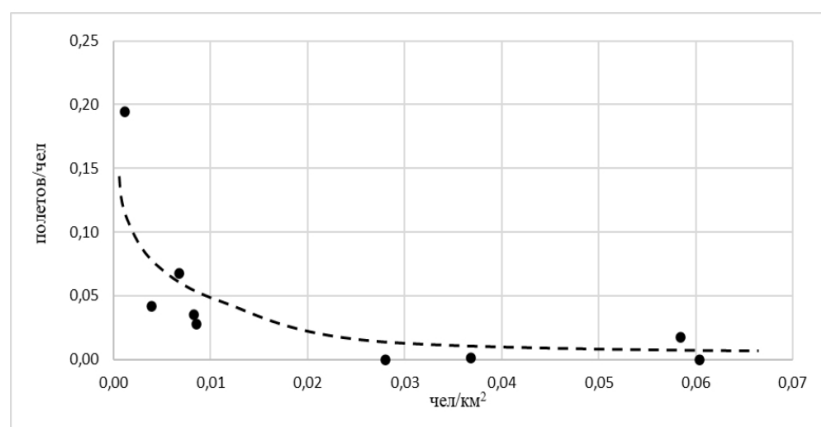


Рис. 7. Зависимость авиаподвижности прочего населения от плотности его распределения

Заключение

По результатам проведенного исследования выполнены оценка и анализ авиационной подвижности населения России в целом и по различным федеральным округам, с учетом глубокой дифференциации авиаподвижности для жителей крупных городов, обеспеченных современной наземной инфраструктурой авиаперевозок, и прочего населения. Выявлен значительный разброс показателей авиационной подвижности по федеральным округам.

На основе исследования определены количественные взаимосвязи авиационной подвижности населения с показателями плотности автомобильных и железных дорог и плотностью расселения населения регионов.

Список источников

1. Фридлянд А. А., Чубуков А. П. Развитие пассажирских авиаперевозок и динамика макроэкономических процессов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2019. № 28. С. 93–102.
2. Демин С. С., Фридлянд А. А., Чубуков А. П. Перспективы посткризисного восстановления российского авиатранспортного рынка // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2021. № 34. С. 102–112.
3. Фридлянд А. А., Чубуков А. П. Анализ механизмов долгосрочного прогнозирования воздушных перевозок // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 39. С. 90–100.
4. Постановление Правительства РФ от 25 декабря 2013 г. № 1242 «О предоставлении субсидий из федерального бюджета организациям воздушного транспорта на осуществление региональных воздушных перевозок пассажиров на территории Российской Федерации и формирование региональной маршрутной сети». [Электронный ресурс] URL: <https://favt.gov.ru/public/materials/0/3/4/c/2/034c29b73dc9eb6486d9f5a50a70a64c.pdf?ysclid=I9mkan8kwb107322981> (дата обращения: 24.10.2022).
5. Постановление Правительства РФ от 30 декабря 2011 года № 1212 «Об утверждении Правил предоставления субсидий из федерального бюджета российским авиакомпаниям, региональным унитарным предприятиям, не являющимся российскими авиакомпаниями, в целях обновления парка воздушных судов для осуществления внутренних региональных и местных воздушных перевозок». [Электронный ресурс] URL: <http://government.ru/docs/all/80647/> (дата обращения: 24.10.2022).
6. Постановление Правительства РФ от 17 апреля 2021 г. № 616 «О внесении изменений в Правила предоставления субсидий из федерального бюджета российским авиакомпаниям, региональным унитарным предприятиям, не являющимся российскими авиакомпаниями, в целях обновления парка воздушных судов для осуществления внутренних региональных и местных воздушных перевозок». Официальный интернет-портал правовой информации. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202104210012?ysclid=I9mk4gvckt551251435>. (дата обращения: 24.09.2022).
7. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. URL: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/11577?> (дата обращения: 21.09.2022).
8. Форма государственной статистической отчетности 15-ГА: «Сведения об объеме перевозок через аэропорты», Постановление Росстата от 31 декабря 2004 года № 163 «Об утверждении статистического инструментария для организации Росавиацией статистического наблюдения за деятельностью воздушного транспорта». Статистические данные АО «Транспортная Клиринговая палата» за 2019 год. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901922249?marker=6580IP>. (дата обращения: 24.10.2022).
9. Наставление по технической эксплуатации и ремонту авиационной техники в гражданской авиации России (НТЭРАТ ГА-93). М.: Департамент воздушного транспорта, 1994. 340 с.
10. Статистический бюллетень «Численность населения Российской Федерации по муниципальным образованиям на 1 января 2022 года». [Электронный ресурс] URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Chisl_nasel_RF_MO_01-01-2022.xlsx (дата обращения: 21.09.2022).

References

1. Fridlyand A. A., Chubukov A. P., Development of passenger traffic and dynamics of macroeconomic processes, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2019, no. 28, pp. 93–102. (In Russ.)
2. Demin S. S., Fridlyand A. A., Chubukov A. P., Prospects for post-crisis recovery Russian air transport market, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2021, no. 34, pp. 102–112. (In Russ.)
3. Fridlyand A. A., Chubukov A. P., Analysis of mechanisms of long-term forecasting of air transportation, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 39, pp. 90–100. (In Russ.)
4. Decree of the Government of the Russian Federation of December 25, 2013 no. 1242 “On the provision of subsidies from the federal budget to air transport organizations for the implementation of regional air transportation of passengers on the territory of the Russian Federation and the formation of a regional route network” [Electronic resource], available at: <https://favt.gov.ru/public/materials/0/3/4/c/2/034c29b73dc9eb6486d9f5a50a70a64c.pdf?ysclid=l9mkan8kwb107322981> (accessed: 24.10.2022). (In Russ.)
5. Decree of the Government of the Russian Federation no. 1212 of December 30, 2011 “On Approval of the Rules for Granting Subsidies from the Federal Budget to Russian Airlines, Regional Unitary Enterprises that are not Russian Airlines, in order to upgrade the Fleet of Aircraft for Domestic Regional and Local Air Transportation” [Electronic resource], available at: <http://government.ru/docs/all/80647/> (accessed: 24.10.22). (In Russ.)
6. Decree of the Government of the Russian Federation no. 616 dated April 17, 2021 “On Amendments to the Rules for Granting Subsidies from the Federal Budget to Russian Airlines, Regional Unitary Enterprises that are Not Russian Airlines, in order to upgrade the Fleet of Aircraft for Domestic Regional and Local Air Transportation”, Official Internet portal of legal information, available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202104210012?ysclid=l9mk4gvckt551251435> (accessed: 24.10.2022). (In Russ.)
7. Transport strategy of the Russian Federation for the period up to 2030, available at: <https://mintrans.gov.ru/documents/8/115777> (accessed: 26.04.2022). (In Russ.)
8. State Statistical Reporting Form 15-GA, “Information on the volume of traffic through airports”, Rosstat Resolution no. 163 of December 31, 2004 “On Approval of statistical tools for the organization of statistical monitoring of Air Transport activities by Rosaviation” [Electronic resource], available at: <https://docs.cntd.ru/document/901922249?marker=6580IP> (accessed: 24.10.2022), Statistical data of JSC “Transport Clearing House” for 2019. (In Russ.)
9. Manual on technical operation and repair of aviation equipment in Civil aviation of Russia (NTERAT GA-93), Moscow, Department of air transport, 1994, 340 p. (In Russ.)
10. Statistical Bulletin “Population of the Russian Federation by municipalities as of January 1, 2022”, available at: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Chisl_nasel_RF_MO_01-01-2022.xlsx (accessed: 21.09.2022). (In Russ.)

Информация об авторах

Фридлянд Александр Абрамович, доктор экономических наук, директор Научного центра, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, info@aeroprogress.ru

Чубуков Александр Петрович, кандидат экономических наук, старший научный сотрудник, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, nv-center@mail.ru

Низаметдинов Руслан Равилович, ведущий инженер, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, ruslan994@mail.ru

Authors information

Fridlyand Alexander A., Doctor of Sciences (Economics), Director of The Scientific Center, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, info@aeroprogress.ru

Chubukov Alexander P., Candidate of Sciences (Economics), Senior Researcher, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, nv-center@mail.ru

Nizametdinov Ruslan R., Leader Engineer, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, ruslan994@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28.09.2022; одобрена после рецензирования 18.10.2022; принята к публикации 26.10.2022.

The article was submitted 28.09.2022; approved after reviewing 18.10.2022; accepted for publication 26.10.2022.

Научная статья
УДК. 656.7.052.002.5

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО РИСКА КАТАСТРОФ ПРИ ЭШЕЛОНИРОВАНИИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИИ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ

В. Б. СПРЫСКОВ, Е. В. ШУВАЛОВА, С. В. КУЗНЕЦОВ

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. В статье дано описание факторов, связанных с физической природой отображаемых на индикаторе воздушной обстановки (ИВО) диспетчера меток воздушного судна (ВС). В силу своей природы эти факторы придают случайный характер отображаемому интервалу между ВС в результате любого выполнения процедуры горизонтального эшелонирования. Исследована случайная природа отображаемого интервала и обоснована модель оценки технического риска катастроф ВС при горизонтальном эшелонировании. Модель зависит от номинальной (наблюдаемой на ИВО) величины интервала эшелонирования ВС, точности (RMS) отображаемых на ИВО меток ВС, вероятностей обновления координат ВС на интервале обновления информации наблюдения и от величины этого интервала. Кроме того модель зависит от факторов, характеризующих воздушное движение в зоне ответственности системы обслуживания воздушного движения (ОВД). Разработана модель технического риска при эшелонировании с использованием информации системы наблюдения ОВД, которая соответствует традициям мировой практики, например, при боковом эшелонировании параллельных маршрутов или вертикальном эшелонировании.

Ключевые слова: обслуживание воздушного движения, технический риск катастроф, эшелонирование воздушных судов, система наблюдения ОВД, период обновления информации наблюдения, вероятности обновления информации системы наблюдения

Для цитирования: Спрысков В. Б., Шувалова Е. В., Кузнецов С. В. Модель оценки технического риска катастроф при эшелонировании воздушных судов в горизонтальной плоскости на основе информации системы наблюдения обслуживания воздушного движения // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 40. С. 111–123.

MODEL FOR ESTIMATING TECHNICAL RISK OF ACCIDENT WHEN SEPARATION AIRCRAFT IN THE HORIZONTAL PLANE BASED ON AIR TRAFFIC SERVICE SURVEILLANCE SYSTEM

V. B. SPRYSKOV, E. V. SHUVALOVA, S. V. KUZNETSOV

The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract. The article describes the factors related to the physical nature of the aircraft marks displayed on the air situation indicator of the air traffic controller. By their nature, these factors provide a random character to the displayed interval between aircraft as a result of any implementation of the horizontal separation procedure. The random nature of the displayed interval is investigated and a mathematical model of the technical risk of

aircraft accidents in horizontal separation is substantiated. The model depends of: the nominal value of the aircraft separation interval, the accuracy (RMS) of the aircraft marks displayed on the controllers display, the probabilities of updating the aircraft coordinates at the observation information update interval and on the value of update interval, factors characterizing air traffic in the area of responsibility of the system ATS. The article presents a mathematical model of technical risk in separation using information from the ATS surveillance system, which corresponds to the traditions of world practice, for example, in lateral separation of parallel routes or vertical separation.

Keywords: air traffic service, technical risk of accident, separation aircraft, air traffic management (ATM) surveillance system, update rate surveillance data, probability of update rate surveillance data

For citation: Spryskov V. B., Shuvalova E. V., Kuznetsov S. V., Model for estimating technical risk of accident when separation aircraft in the horizontal plane based on air traffic service surveillance system, *The Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 40, pp. 111–123. (In Russ.)

Введение

Эшелонирование воздушных судов (ВС) на основе информации системы наблюдения обслуживания воздушного движения (ОВД) представляет собой известную процедуру действий диспетчера и экипажа (экипажей) ВС, в результате которой наблюдаемое расстояние между ВС s не принимает текущих значений, меньших установленного безопасного минимального интервала $S_{\min}$. Большинство специалистов службы движения уверены, что при наблюдаемом расстоянии $s \geq S_{\min}$ столкновение невозможно, так как отображаются метки двух ВС (после столкновения метки ВС не отображаются). При чем тут риск катастроф? А при том, что ВС наблюдаются с ошибками наблюдения, присущими системе. Отражаемая метка ВС не на 100 % актуальна, это может быть метка предыдущего или какого-то другого обновления информации наблюдения. Существуют и другие факторы, связанные как с системой наблюдения ОВД, так и с особенностями воздушного движения, обеспечивающие существование события столкновения ВС в воздухе при корректном выполнении процедуры горизонтального эшелонирования.

Понятия и их интерпретация при математическом моделировании технического риска катастроф ВС

В рамках настоящих исследований используются некоторые специфические понятия. Вот их интерпретация:

- эшелонирование ВС в горизонтальной плоскости на основе информации системы наблюдения ОВД – разделение ВС в горизонтальной плоскости на основе процедуры эшелонирования с применением информации системы наблюдения ОВД;
- безопасный минимальный интервал эшелонирования ВС в горизонтальной плоскости $S_{\min}$ – минимальный интервал эшелонирования ВС в горизонтальной плоскости, при котором риск катастрофы эшелонируемых ВС не превышает установленный уровень;
- технический риск катастроф ВС при эшелонировании в горизонтальной плоскости на основе информации системы наблюдения ОВД представляет собой риск из-за ошибок определения координат ВС системой наблюдения σ_s , а также таких параметров системы, как:
 - тип ошибок определения координат ВС системой наблюдения ($C(s)$);
 - период обновления информации наблюдения (T_u) [с].

Кроме указанных параметров, относящихся непосредственно к системе наблюдения, на технический риск влияют параметры воздушного движения в объеме пространства, в котором функционирует система наблюдения ОВД:

- применяемый $S_{\min}$ [км];
- частота использования информации наблюдения в целях обеспечения минимума эшелонирования F [1/летный час];
- линейный размер эшелонируемых ВС (l_x) [км];
- скорости эшелонируемых ВС (W) [км/ч];
- углы пересечения скоростей (γ) эшелонируемых ВС;
- вероятность вертикального перекрытия P_z эшелонируемых ВС.

Концепция гипотез для корректной формализации технического риска катастроф при эшелонировании ВС на основе информации системы наблюдения ОВД

Математическая модель сложного «явления» лишь отчасти напоминает закон, описывающий связь «явления» с установленными факторами (аргументами), влияющими на его сущность. Нашей целью является формализация влияния установленных ранее факторов на технический риск катастроф ВС при эшелонировании ВС с использованием минимального интервала $S_{\min}$. При этом будем использовать существующий в мире опыт для целей моделирования риска.

Модельная гипотеза заключается в том, что система (диспетчер) ОВД начинает процедуру эшелонирования, когда минимальное наблюдаемое расстояние между ВС соответствует $S_{\min}$. Эта гипотеза вытекает из принятого во всем мире подхода оценки безопасности воздушного движения CAP (Close Approach Probability – вероятность близкого сближения) [1–4].

При относительном движении ВС по одной линии пути и на одной высоте друг за другом ($\gamma = 0^\circ$, курсы совпадают) или лоб в лоб ($\gamma = 180^\circ$, курсы противоположные) наблюдаемое расстояние между ВС s сравнивается с величиной $S_{\min}$ и процедура эшелонирования начинается, когда $s = S_{\min}$.

При движении ВС по пересекающимся линиям пути с разностью высот, меньшей минимума вертикального эшелонирования ($s_z < 1000$ ft) будем полагать, что система (диспетчер) ОВД формирует «правильное» пересечение курсов, когда одно ВС удаляется от точки пересечения, а другое приближается к ней.

На рисунке изображены разные случаи движения двух ВС со скоростями W_1 и W_2 соответственно. Рис. 1, а) иллюстрирует движение ВС с совпадающими курсами $\gamma = 0^\circ$; рис. 1, б) иллюстрирует движение ВС с противоположными курсами; рис. 1, с) иллюстрирует движение ВС с разницей курсов $0^\circ < \gamma < 90^\circ$; рис. 1, d) иллюстрирует движение ВС с разницей курсов $90^\circ < \gamma < 180^\circ$.

Процедура эшелонирования выполняется тогда, когда наблюдаемые расстояния между ВС таковы, что минимальный интервал между ВС будет строго равен $S_{\min}$ ($s = S_{xy}$).

На рисунке маленькие буквы означают текущие значения параметра процедуры ОВД, большие – детерминированные значения параметра.

Для относительного движения с пересекающимися курсами $0^\circ < \gamma < 90^\circ$ и $90^\circ < \gamma < 180^\circ$ процедура эшелонирования начинается тогда, когда текущее расстояние между ВС s будет равно такому значению S_{xy} , при котором минимальный горизонтальный интервал между эшелонируемыми ВС будет равен установленному минимуму $S_{\min}$.

Для $0^\circ < \gamma < 90^\circ$:

$$S_{xy} = \frac{S_{\min} \sqrt{W_1^2 - 2W_1W_2 \cos \gamma + W_2^2}}{W_1 \sin \gamma} \text{ при } W_1 \neq W_2; \quad (1)$$

$$S_{xy} = \frac{S_{\min} \sqrt{2}}{\sqrt{1 + \cos \gamma}} \text{ при } W_1 = W_2 = W. \quad (2)$$

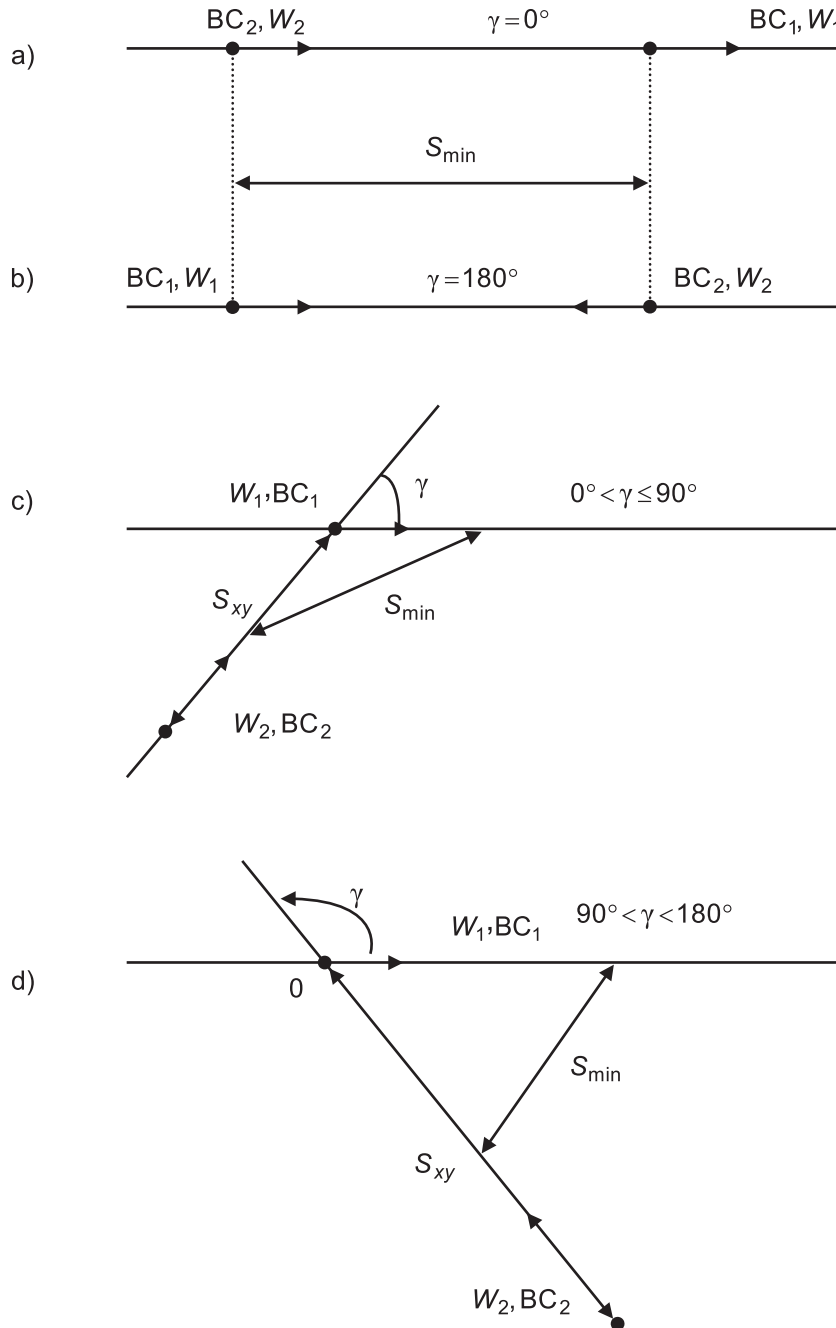


Рис. 1. Наблюдаемые положения ВС, при которых начинается процедура горизонтального эшелонирования, обеспечивающая соблюдение минимального интервала $S_{\min}$ для различных типов относительного движения ВС (γ)

Для $90^\circ < \gamma < 180^\circ$:

$$S_{xy} = \frac{S_{\min} \sqrt{W_1^2 - 2W_1W_2 \cos(180^\circ - \gamma) + W_2^2}}{W_1 \sin(180^\circ - \gamma)} \text{ при } W_1 \neq W_2; \quad (3)$$

$$S_{xy} = \frac{S_{\min} \sqrt{2}}{\sqrt{1 + \cos(180^\circ - \gamma)}} \text{ при } W_1 = W_2 = W. \quad (4)$$

Обновление либо пропуск обновления информации наблюдения для ВС рассматриваемой пары происходит в одни и те же моменты времени.

Для рассматриваемых ВС события обновления либо пропусков обновления независимые. Всего будем рассматривать четыре события обновления либо пропусков обновления координатной информации наблюдения для каждого из ВС пары, для которой применяется процедура горизонтального эшелонирования:

- с вероятностью P_0 происходит обновление координатной информации ВС;
- с вероятностью P_1 происходит пропуск (одиночный) обновления координатной информации;
- с вероятностью P_2 происходит пропуск двух подряд обновлений координатной информации. При этом система наблюдения отображает координаты ВС, которые оно имело в текущий момент времени минус время двух подряд обновлений;
- с вероятностью P_3 происходит пропуск трех подряд обновлений координатной информации. При этом отображаются координаты ВС, которые оно имело для времени три обновления назад.

Вероятности P_0, P_1, P_2, P_3 для каждого из ВС образуют полную группу: $P_0 + P_1 + P_2 + P_3 = 1$.

Так как события обновления информации наблюдения одного ВС независимы от событий обновления информации другого ВС эшелонируемой пары, всего следует рассматривать 16 вариантов событий информации наблюдения для ВС эшелонируемой пары:

$$P_{ij}(i = \overline{0, 3}; j = \overline{0, 3}); \sum_{i=0, j=0}^{3, 3} P_{ij} = 1.$$

Только для состояния P_{00} система наблюдения отображает фактические положения ВС. Для всех других состояний отображаются положения ВС с некоторым запаздыванием. Рассмотрим все варианты состояний отображения информации наблюдения эшелонируемой пары ВС.

Для состояния P_{00} отображаются фактические положения ВС. При движении ВС с совпадающими ($\gamma = 0^\circ$) или противоположными ($\gamma = 180^\circ$) курсами процедура эшелонирования начинается при $s = S_{xy}$. Для пересекающихся курсов процедура эшелонирования начинается, если расстояние S_{xy} (см. рис. 1) равно значениям, полученным по формулам (1), (2), (3) или (4).

Для состояния P_{01} отображаются фактические координаты BC_1 и координаты BC_2 , которые оно имело при предыдущем обновлении информации наблюдения. Фактическое положение BC_2 по отношению к наблюдаемому в состоянии P_{01} будет смещено на величину $W_2 T_u$ вперед по линии полета по отношению к отображаемому системой наблюдения ОВД.

Для состояния P_{02} отображаются фактические координаты BC_1 и координаты BC_2 , которые оно имело $2T_u$ назад. Фактическое положение BC_2 по отношению к наблюдаемому в состоянии P_{02} будет смещено на величину $2W_2 T_u$ вперед от наблюдаемого по траектории движения BC_2 .

Для состояния P_{03} отображаются фактические координаты BC_1 и координаты BC_2 , которые оно имело $3T_u$ назад. Фактическое положение BC_2 по отношению к наблюдаемому для состояния P_{03} будет смещено на величину $3W_2 T_u$ вперед от наблюдаемого по траектории движения BC_2 .

Для состояния P_{10} отображаются положение BC_1 , которое оно занимало T_u назад (на предыдущем обзоре), и фактические координаты BC_2 . Фактическое положение BC_1 по отношению к наблюдаемому для состояния P_{10} будет смещено на величину $W_1 T_u$ вперед по траектории движения BC_1 .

Для состояния P_{11} отображаются положение BC_1 , которое оно занимало на предыдущем обзоре (T_u назад), и положение BC_2 , которое оно также занимало T_u назад. Фактические положения BC_1 и BC_2 для состояния отображения P_{11} необходимо сместить на $W_1 T_u$ вперед по линии движения BC_1 и на $W_2 T_u$ вперед по линии движения BC_2 .

Для состояния P_{12} отображаются положение BC_1 , которое оно занимало на предыдущем обзоре, и положение BC_2 , которое оно занимало два обзора назад. Фактические положения BC_1

и BC_2 необходимо сместить на величину W_1T_u вперед по линии пути BC_1 и на величину $2W_2T_u$ вперед по траектории движения BC_2 .

Для состояния P_{13} отображаются положение BC_1 , которое оно занимало на предыдущем обзоре, и положение BC_2 , которое оно занимало три обзора назад. Фактические положения BC_1 и BC_2 необходимо сместить на величину W_1T_u вперед по линии пути BC_1 и на величину $3W_2T_u$ вперед по траектории движения BC_2 .

Для состояния P_{20} отображаются положение BC_1 , которое оно имело два обзора назад и фактическое положение BC_2 . Фактические положения BC_1 по отношению к наблюдаемому для состояния P_{20} будет смещено на величину $2W_1T_u$ вперед по траектории движения BC_1 .

Для состояния P_{21} отображаются положение BC_1 , которое оно имело два обзора назад и положение BC_2 , которое оно имело T_u назад. Фактические положения для BC_1 по отношению к наблюдаемому будет смещено на величину $2W_1T_u$ вперед по траектории движения BC_1 и для BC_2 на величину W_2T_u вперед по линии пути BC_2 .

Для состояния P_{22} отображаются положение BC_1 , которое оно имело два обзора назад и положение BC_2 , которое оно имело также два обзора назад. Фактическое положение BC_1 по отношению к наблюдаемому для состояния P_{22} будет смещено на величину $2W_1T_u$ вперед по линии пути BC_1 , а для BC_2 – на величину $2W_2T_u$ вперед по траектории движения BC_2 .

Для состояния P_{23} отображаются положение BC_1 , которое оно занимало два обзора времени назад, и положение BC_2 , которое оно занимало три обзора назад. Фактические положения BC_1 по отношению к наблюдаемому для состояния P_{23} будет смещено на величину $2W_1T_u$ вперед по траектории движения BC_1 , а для BC_2 на величину $3W_2T_u$ вперед по линии пути BC_2 .

Для состояния P_{30} отображаются положение BC_1 , которое оно занимало три обзора назад, и реальное положение BC_2 . Фактические положения BC_1 по отношению к наблюдаемому для состояния P_{30} будет смещено на величину $3W_1T_u$ вперед по траектории движения BC_1 .

Для состояния P_{31} отображается положение BC_1 , которое оно занимало три обзора назад, и положение BC_2 , которое оно занимало один обзор назад. Фактические положения BC_1 по отношению к наблюдаемому для состояния P_{31} будет смещено на величину $3W_1T_u$ вперед по траектории полета BC_1 , а для BC_2 на величину W_2T_u вперед по линии пути BC_2 .

Для состояния P_{32} отображается положение BC_1 , которое оно занимало три обзора назад, и положение BC_2 , которое оно имело два обзора назад. Фактические положения BC_1 по отношению к наблюдаемому для состояния P_{32} будет смещено на величину $3W_1T_u$ вперед по траектории движения BC_1 , а для BC_2 на величину $2W_2T_u$ вперед по линии пути BC_2 .

Для состояния P_{33} отображается положение BC_1 , которое оно занимало три обзора назад, и положение BC_2 , которое оно имело три обзора назад. Фактические положения для BC_1 по отношению к наблюдаемому будет смещено на величину $3W_1T_u$ по линии пути BC_1 и для BC_2 на величину $3W_2T_u$ вперед по траектории полета BC_2 .

Диспетчер ОВД (система ОВД) принимает решение о начале процедуры горизонтального эшелонирования на основе наблюдаемой координатной информации.

При этом только в одном из 16 состояний (P_{00}) отображения текущих координат BC эшелонируемой пары фактические положения BC совпадают с наблюдаемыми. Так как диспетчер (система) начинает выполнять процедуру эшелонирования по информации наблюдения, а фактические положения BC могут отличаться от наблюдаемых, возникают дополнительные причины возникновения технического риска катастроф при эшелонировании BC . Вербальное описание различий между наблюдаемыми и фактическими положениями BC эшелонируемой пары позволяет формально записать эти различия для различных типов относительного движения BC .

Для движения BC с совпадающими курсами ($\gamma = 0^\circ$) (рис. 1, а) в табл. 1 представлены фактические относительные расстояния между BC эшелонируемой пары при наблюдаемом относительном расстоянии $S_{\min}$ для рассматриваемых состояний наблюдения $BC P_{ij}$.

Таблица 1

Фактические минимальные горизонтальные расстояния эшелонируемых ВС с совпадающими курсами ($\gamma = 0^\circ$)

Состояние наблюдения ВС эшелонируемой пары	s_{ij}	Состояние наблюдения ВС эшелонируемой пары	s_{ij}
P_{00}	$s_{00} = S_{\min}$	P_{20}	$s_{20} = S_{\min} + 2W_1T_u$
P_{01}	$s_{01} = S_{\min} - W_2T_u$	P_{21}	$s_{21} = S_{\min} + 2W_1T_u - W_2T_u$
P_{02}	$s_{02} = S_{\min} - 2W_2T_u$	P_{22}	$s_{22} = S_{\min} + 2W_1T_u - 2W_2T_u$
P_{03}	$s_{03} = S_{\min} - 3W_2T_u$	P_{23}	$s_{23} = S_{\min} + 2W_1T_u - 3W_2T_u$
P_{10}	$s_{10} = S_{\min} + W_1T_u$	P_{30}	$s_{30} = S_{\min} + 3W_1T_u$
P_{11}	$s_{11} = S_{\min} + W_1T_u - W_2T_u$	P_{31}	$s_{31} = S_{\min} + 3W_1T_u - W_2T_u$
P_{12}	$s_{12} = S_{\min} + W_1T_u - 2W_2T_u$	P_{32}	$s_{32} = S_{\min} + 3W_1T_u - 2W_2T_u$
P_{13}	$s_{13} = S_{\min} + W_1T_u - 3W_2T_u$	P_{33}	$s_{33} = S_{\min} + 3W_1T_u - 3W_2T_u$

Для движения ВС с пересекающимися курсами ($0^\circ < \gamma < 90^\circ$) (рис. 1, с) в табл. 2 представлены фактические минимальные горизонтальные интервалы между ВС рассматриваемых состояний наблюдения ВС ($P_{ij}; i = 0, 3; j = 0, 3$) эшелонируемой пары при $W_1 \neq W_2$.

В табл. 2 все значения S_{xy} вычисляются по выражению (1).

Таблица 2

Фактические минимальные горизонтальные расстояния эшелонируемых ВС с пересекающимися курсами ($0^\circ < \gamma < 90^\circ$)

Состояние наблюдения ВС эшелонируемой пары	s_{ij}
P_{00}	$s_{00} = S_{\min}$
P_{01}	$s_{01} = \frac{W_1(S_{xy} - W_2T_u)\sin\gamma}{\sqrt{W_1^2 - 2W_1W_2\cos\gamma + W_2^2}}$
P_{02}	$s_{02} = \frac{W_1(S_{xy} - 2W_2T_u)\sin\gamma}{\sqrt{W_1^2 - 2W_1W_2\cos\gamma + W_2^2}}$
P_{03}	$s_{03} = \frac{W_1(S_{xy} - 3W_2T_u)\sin\gamma}{\sqrt{W_1^2 - 2W_1W_2\cos\gamma + W_2^2}}$
P_{10}	$s_{10} = \frac{(W_1T_uW_2 + S_{xy}W_2)\sin\gamma}{\sqrt{W_1^2 - 2W_1W_2\cos\gamma + W_2^2}}$
P_{11}	$s_{11} = \frac{(W_1T_uW_2 + (S_{xy} - T_uW_2)W_1)\sin\gamma}{\sqrt{W_1^2 - 2W_1W_2\cos\gamma + W_2^2}}$
P_{12}	$s_{12} = \frac{(W_1T_uW_2 + (S_{xy} - 2T_uW_2)W_1)\sin\gamma}{\sqrt{W_1^2 - 2W_1W_2\cos\gamma + W_2^2}}$

Продолжение таблицы 2

Состояние наблюдения ВС эшелонируемой пары	S_{ij}
P_{13}	$s_{13} = \frac{(W_1 T_u W_2 + (S_{xy} - 3T_u W_2)W_1) \sin \gamma}{\sqrt{W_1^2 - 2W_1 W_2 \cos \gamma + W_2^2}}$
P_{20}	$s_{20} = \frac{(2W_1 T_u W_2 + S_{xy} W_2) \sin \gamma}{\sqrt{W_1^2 - 2W_1 W_2 \cos \gamma + W_2^2}}$
P_{21}	$s_{21} = \frac{(2W_1 T_u W_2 + (S_{xy} - T_u W_2)W_1) \sin \gamma}{\sqrt{W_1^2 - 2W_1 W_2 \cos \gamma + W_2^2}}$
P_{22}	$s_{22} = \frac{(2W_1 T_u W_2 + (S_{xy} - 2T_u W_2)W_1) \sin \gamma}{\sqrt{W_1^2 - 2W_1 W_2 \cos \gamma + W_2^2}}$
P_{23}	$s_{23} = \frac{(2W_1 T_u W_2 + (S_{xy} - 3T_u W_2)W_1) \sin \gamma}{\sqrt{W_1^2 - 2W_1 W_2 \cos \gamma + W_2^2}}$
P_{30}	$s_{30} = \frac{(3W_1 T_u W_2 + S_{xy} W_2) \sin \gamma}{\sqrt{W_1^2 - 2W_1 W_2 \cos \gamma + W_2^2}}$
P_{31}	$s_{31} = \frac{(3W_1 T_u W_2 + (S_{xy} - T_u W_2)W_1) \sin \gamma}{\sqrt{W_1^2 - 2W_1 W_2 \cos \gamma + W_2^2}}$
P_{32}	$s_{32} = \frac{(3W_1 T_u W_2 + (S_{xy} - 2T_u W_2)W_1) \sin \gamma}{\sqrt{W_1^2 - 2W_1 W_2 \cos \gamma + W_2^2}}$
P_{33}	$s_{33} = \frac{(3W_1 T_u W_2 + (S_{xy} - 3T_u W_2)W_1) \sin \gamma}{\sqrt{W_1^2 - 2W_1 W_2 \cos \gamma + W_2^2}}$

Для движения ВС с пересекающимися курсами ($90^\circ < \gamma < 180^\circ$) (рис. 1, d) в табл. 3 представлены фактические минимальные горизонтальные интервалы между ВС для рассматриваемых состояний наблюдения ВС ($P_{ij}; i=0,3; j=0,3$) эшелонируемой пары при $W_1 \neq W_2$.

Все значения S_{xy} для табл. 3 рассчитывают по выражению (3). Формулы величин S_{ij} получены на основе их вербального обоснования.

Таблица 3

Фактические минимальные горизонтальные расстояния эшелонируемых ВС с пересекающимися курсами ($90^\circ < \gamma < 180^\circ$)

Состояние наблюдения ВС эшелонируемой пары	S_{ij}
P_{00}	$s_{00} = S_{\min}$
P_{01}	$s_{01} = \frac{W_1 (S_{xy} - W_2 T_u) \sin(180^\circ - \gamma)}{\sqrt{W_1^2 + 2W_1 W_2 \cos(180^\circ - \gamma) + W_2^2}}$

Продолжение таблицы 3

Состояние наблюдения ВС эшелонируемой пары	s_{ij}
P_{02}	$s_{02} = \frac{W_1(S_{xy} - 2W_2T_u)\sin(180^\circ - \gamma)}{\sqrt{W_1^2 + 2W_1W_2\cos(180^\circ - \gamma) + W_2^2}}$
P_{03}	$s_{03} = \frac{W_1(S_{xy} - 3W_2T_u)\sin(180^\circ - \gamma)}{\sqrt{W_1^2 + 2W_1W_2\cos(180^\circ - \gamma) + W_2^2}}$
P_{10}	$s_{10} = \frac{W_1(S_{xy} + W_2T_u)\sin(180^\circ - \gamma)}{\sqrt{W_1^2 + 2W_1W_2\cos(180^\circ - \gamma) + W_2^2}}$
P_{11}	$s_{11} = \frac{(W_1T_uW_2 + (S_{xy} - W_2T_u)W_1)\sin(180^\circ - \gamma)}{\sqrt{W_1^2 + 2W_1W_2\cos(180^\circ - \gamma) + W_2^2}}$
P_{12}	$s_{12} = \frac{(W_1T_uW_2 + (S_{xy} - 2W_2T_u)W_1)\sin(180^\circ - \gamma)}{\sqrt{W_1^2 + 2W_1W_2\cos(180^\circ - \gamma) + W_2^2}}$
P_{13}	$s_{13} = \frac{(W_1T_uW_2 + (S_{xy} - 3W_2T_u)W_1)\sin(180^\circ - \gamma)}{\sqrt{W_1^2 + 2W_1W_2\cos(180^\circ - \gamma) + W_2^2}}$
P_{20}	$s_{20} = \frac{(2W_1T_uW_2 + S_{xy}W_1)\sin(180^\circ - \gamma)}{\sqrt{W_1^2 + 2W_1W_2\cos(180^\circ - \gamma) + W_2^2}}$
P_{21}	$s_{21} = \frac{(2W_1T_uW_2 + (S_{xy} - W_2T_u)W_1)\sin(180^\circ - \gamma)}{\sqrt{W_1^2 + 2W_1W_2\cos(180^\circ - \gamma) + W_2^2}}$
P_{22}	$s_{22} = \frac{(2W_1T_uW_2 + (S_{xy} - 2W_2T_u)W_1)\sin(180^\circ - \gamma)}{\sqrt{W_1^2 + 2W_1W_2\cos(180^\circ - \gamma) + W_2^2}}$
P_{23}	$s_{23} = \frac{(2W_1T_uW_2 + (S_{xy} - 3W_2T_u)W_1)\sin(180^\circ - \gamma)}{\sqrt{W_1^2 + 2W_1W_2\cos(180^\circ - \gamma) + W_2^2}}$
P_{30}	$s_{30} = \frac{(3W_1T_uW_2 + S_{xy}W_1)\sin(180^\circ - \gamma)}{\sqrt{W_1^2 + 2W_1W_2\cos(180^\circ - \gamma) + W_2^2}}$
P_{31}	$s_{31} = \frac{(3W_1T_uW_2 + (S_{xy} - W_2T_u)W_1)\sin(180^\circ - \gamma)}{\sqrt{W_1^2 + 2W_1W_2\cos(180^\circ - \gamma) + W_2^2}}$
P_{32}	$s_{32} = \frac{(3W_1T_uW_2 + (S_{xy} - 2W_2T_u)W_1)\sin(180^\circ - \gamma)}{\sqrt{W_1^2 + 2W_1W_2\cos(180^\circ - \gamma) + W_2^2}}$
P_{33}	$s_{33} = \frac{(3W_1T_uW_2 + (S_{xy} - 3W_2T_u)W_1)\sin(180^\circ - \gamma)}{\sqrt{W_1^2 + 2W_1W_2\cos(180^\circ - \gamma) + W_2^2}}$

При движении ВС с противоположными курсами $\gamma = 180^\circ$ (рис. 1, б) в табл. 4 представлены фактические относительные расстояния между ВС эшелонируемой пары при наблюдаемом расстоянии $S_{\min}$ для рассматриваемых состояний P_{ij} .

Таблица 4

Фактические минимальные относительные расстояния эшелонируемых ВС при движении с противоположными курсами ($\gamma = 180^\circ$)

Состояние наблюдения ВС эшелонируемой пары	s_{ij}	Состояние наблюдения ВС эшелонируемой пары	s_{ij}
P_{00}	$s_{00} = S_{\min}$	P_{20}	$s_{20} = S_{\min} - 2W_1T_u$
P_{01}	$s_{01} = S_{\min} - W_2T_u$	P_{21}	$s_{32} = S_{\min} - 3W_1T_u - 2W_2T_u$
P_{02}	$s_{02} = S_{\min} - 2W_2T_u$	P_{22}	$s_{22} = S_{\min} - 2W_1T_u - 2W_2T_u$
P_{03}	$s_{03} = S_{\min} - 3W_2T_u$	P_{23}	$s_{23} = S_{\min} - 2W_1T_u - 3W_2T_u$
P_{10}	$s_{10} = S_{\min} - W_1T_u$	P_{30}	$s_{30} = S_{\min} - 3W_1T_u$
P_{11}	$s_{11} = S_{\min} - W_1T_u - W_2T_u$	P_{31}	$s_{31} = S_{\min} - 3W_1T_u - W_2T_u$
P_{12}	$s_{12} = S_{\min} - W_1T_u - 2W_2T_u$	P_{32}	$s_{21} = S_{\min} - 2W_1T_u - W_2T_u$
P_{13}	$s_{13} = S_{\min} - W_1T_u - 3W_2T_u$	P_{33}	$s_{33} = S_{\min} - 3W_1T_u - 3W_2T_u$

Технический риск катастроф при эшелонировании воздушных судов в горизонтальной плоскости по информации системы ОВД

Технический риск катастроф при разделении объектов возникает всегда, если наблюдаемые координаты положения хотя бы одного из объектов эшелонирования известны с ошибками. В рассматриваемом случае координаты двух объектов эшелонирования известны с ошибками. Будем считать, что ошибки определения координат одного ВС независимы от ошибок определения координат другого ВС эшелонируемой пары. Для любого значения фактического расстояния между ВС s_{ij} ; $i = 0, 3$; $j = 0, 3$, перечень значений которых в зависимости от γ и состояния наблюдения P_{ij} приведен в таблицах 1, 2, 3 и 4, существует плотность вероятности их перекрытия в горизонтальной плоскости.

Плотность вероятности перекрытия при фактических положениях ВС относительно наблюдаемых следует искать как плотность вероятности разницы случайных координат x_1 и x_2 , равной наблюдаемому значению s .

Пусть 0_x – направление сближения наблюдаемых объектов в горизонтальной плоскости. Пусть $f_1(x_1)$ и $f_2(x_2)$ – плотности вероятностей ошибок измерения координат ВС₁ и ВС₂ системой наблюдения ОВД.

При этом наблюдаемое расстояние между эшелонируемыми ВС равно s .

Итак, $x_1 - x_2 = s$ или $x_2 = x_1 - s$.

Обозначим x_1 как x : $x_1 = x$. Тогда плотность вероятности перекрытия

$$C(s) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(x) f_2(x-s) dx, \quad (5)$$

а вероятность горизонтального перекрытия с учетом (5) будет равна

$$HOP(s) = \int_{s-\lambda_x}^{s+\lambda_x} C(u) du \cong \lambda_x C(s),$$

где λ_x – усредненный габарит ВС эшелонируемой пары по направлению сближения (0_x).

Плотность $C(s)$ существенным образом зависит от типов ошибок определения координат ВС системой наблюдения и от точности определения координат. Этот вопрос хорошо изучен и в рамках настоящих исследований не описывается.

Кроме того, в зависимости от состояния измерения координат ВС P_{ij} и курсовых углов относительного движения ВС эшелонируемой пары (γ) вместо значения s следует использовать конкретные значения s_{ij}^γ , указанные в табл. 1–4.

Для того, чтобы от вероятности горизонтального перекрытия $HOP(s)$ перейти к риску катастроф, необходимо вычислить не только вероятность перекрытия в горизонтальной плоскости, но и оценить вероятность перекрытия в вертикальной плоскости. С учетом независимости вертикальных и горизонтальных фактических отклонений от наблюдаемых, вероятность столкновения в каждой процедуре горизонтального эшелонирования будет равна вероятности горизонтального перекрытия $HOP(s)$, умноженной на вероятность вертикального столкновения ВС при эшелонировании P_z . В [5] дана разумная рекомендация по величине P_z :

- если эшелонируемые ВС сохраняют полет в режиме стабилизации высоты, то $P_z = 0,4$;
- если хотя бы один из эшелонируемых ВС изменяет высоту, то $P_z = 0,1$.

Итак, для каждой процедуры горизонтального эшелонирования ВС можем оценить вероятность столкновения ВС в воздухе. Для перехода к риску катастроф при эшелонировании с использованием информации системы наблюдения ОВД необходимо и достаточно частоту применения процедуры горизонтального эшелонирования F [1/летный ч] умножить на вероятность столкновения эшелонируемых ВС в воздухе и коэффициент 2, уравнивающий столкновения с катастрофами:

$$Risk_tech = 2FP_z HOP(S_{min}). \quad (6)$$

При вычислении технического риска в объеме воздушного пространства, в котором горизонтальное эшелонирование выполняется с использованием информации системы наблюдения, вероятность горизонтального перекрытия $HOP(S_{min})$ будет равна взвешенной сумме вероятностей для различных типов относительного движения в рассматриваемом пространстве (различных γ). Если заданы значения долей относительного движения d_γ $d_{\gamma=0^\circ}$, $d_{0^\circ < \gamma \leq 90^\circ}$, $d_{90^\circ < \gamma \leq 180^\circ}$, то

$$HOP(S_{min}) = d_{\gamma=0^\circ} HOP_{\gamma=0^\circ}(S_{min}) + d_{0^\circ < \gamma \leq 90^\circ} HOP_{0^\circ < \gamma \leq 90^\circ}(S_{min}) + d_{90^\circ < \gamma \leq 180^\circ} HOP_{90^\circ < \gamma \leq 180^\circ}(S_{min}).$$

Заключение

Модель технического риска катастроф (6) соответствует традициям мировой практики моделирования риска катастроф. В соответствии с ней оценка технического риска всегда представляет собой объединение результатов математической оценки вероятности полного столкновения ВС со статической частотой проявления ситуации, при которой вероятность столкновения возникает. Частота F использования информации системы наблюдения ОВД для горизонтального эшелонирования, имеющая размерность [1/летный ч], зависит от многих факторов, главный из них – интенсивность воздушного движения, которая должна оцениваться в том объеме воздушного пространства, в котором функционирует система наблюдения ОВД. Так как F зависит от интенсивности воздушного движения, то для разных высотных слоев она будет иметь свои значения, так же как и точность определения координат ВС.

В целом при учете всех нюансов воздушного движения и функционирования системы наблюдения, модель (6) позволяет сформировать научный подход обеспечения безопасности полетов при ОрВД у поставщиков обслуживания.

Список источников

1. Doc 9689 AN/953 ICAO. Руководство по методике планирования воздушного пространства для определения минимумов эшелонирования. Изд. первое с поправкой № 1. Монреаль: ИКАО, 2002. 266 с.
2. Safety, Performance and Interoperability Requirements Document for the ADS-B Non-Radar-Airspace (NRA) Application. RTCA/DO-303, Washington, RTCA, 2006, 316 p.
3. Safety, Performance and Interoperability Requirements Document for Enhanced Air Traffic Services in Radar-Controlled Areas Using ADS-B Surveillance (ADS-B-RAD). RTCA/DO-318, Washington, RTCA, 2009, 582 p.
4. Nagaoka S., Amai O., Estimation Accuracy of Close Approach Probability for Establishing a Radar Separation Minimum. *Journal of the Institute of Navigation*, 1991, vol. 44, no. 1, pp. 121–126.
5. Eurocontrol Specification for ATM Surveillance System Performance (Volume 1 and 2), Brussels, Document Identifier: Eurocontrol–Spec–0147, Edition Number: 1.1, 2015, 85 p.
6. Методика оценки безопасности полетов в воздушном пространстве с сокращенным интервалом вертикального эшелонирования Российской Федерации. ФАВТ, 2015. 17 с.

References

1. Doc 9689 AN/953. ICAO, Guidelines for Airspace Planning Techniques for Determining Layering Minimums, ed. 1, Montreal, 2002, 266 p.
2. Safety, Performance and Interoperability Requirements Document for the ADS-B Non-Radar-Airspace (NRA) Application. RTCA/DO-303, Washington, RTCA, 2006, 316 p.
3. Safety, Performance and Interoperability Requirements Document for Enhanced Air Traffic Services in Radar-Controlled Areas Using ADS-B Surveillance (ADS-B-RAD). RTCA/DO-318, Washington, RTCA, 2009, 582 p.
4. Nagaoka S., Amai O., Estimation Accuracy of Close Approach Probability for Establishing a Radar Separation Minimum, *Journal of the Institute of Navigation*, 1991, vol. 44, no. 1, pp. 121–126.
5. Eurocontrol Specification for ATM Surveillance System Performance (Volume 1 and 2), Brussels, Document Identifier: Eurocontrol–Spec–0147, Edition Number: 1.1, 2015, 85 p.
6. Metodika otsenki bezopasnosti poletov v vozdushnom prostranstve s sokrashchennym intervalom vertical'nogo ehshelonirovaniya Rossijskoj Federatsii, Federal'noye Agentstvo Vozdushnogo Transporta, 2015, 17 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Спрысков Владимир Борисович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, spryskov@atminst.ru

Шувалова Екатерина Викторовна, заместитель генерального директора по аэронавигации, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, shuvalovaev@gosniiga.ru

Кузнецов Сергей Вадимович, заместитель начальника отдела – начальник сектора, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, kuznetsov@atminst.ru

Authors information

Spryskov Vladimir B., Doctor of Sciences (Engineering), Chief Researcher, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, spryskov@atminst.ru

Shuvalova Ekaterina V., Deputy General Director for Air Navigation, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, shuvalovaev@gosniiga.ru

Kuznetsov Sergei V., Deputy Head of Department – Head of sector, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, kuznetsov@atminst.ru

Статья поступила в редакцию 02.08.2022; одобрена после рецензирования 19.10.2022; принята к публикации 30.10.2022.

The article was submitted 02.07.2022; approved after reviewing 19.10.2022; accepted for publication 30.10.2022.

Обзорная статья
УДК 331.4:623.746-519

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ КОМПОНОВКИ РАБОЧЕГО МЕСТА ВНЕШНЕГО ПИЛОТА

Н. С. БЕЛЯКОВА, А. В. ПОТУРАЕВ, П. В. АЛПЕЕВ, К. В. КАРАСЕВ, Г. Е. ДЮЖИКОВА

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. Представлены материалы, касающиеся разработки норм летной годности для беспилотных авиационных систем (БАС) и их компонентов, включая станцию внешнего пилота. Обозначены основные требования к компоновке рабочего места внешнего пилота, основанные на сравнении с требованиями к компоновке рабочих мест членов летного экипажа. Обозначены и рассмотрены проблемы, связанные с отсутствием отечественной авиационной нормативной базы, применимой к БАС и их компонентам. Рассмотрены действующие национальные стандарты, которые являются на сегодняшний день единственными утвержденными нормативными требованиями к беспилотному летательному аппарату (БПЛА) и рабочему месту внешнего пилота, применимые к БАС и их компонентам. Сформулированы рекомендации для разработки и внедрения норм летной годности для БАС и их компонентов, включая требования к компоновке рабочих мест членов внешнего экипажа, основанные на существующих авиационных правилах, а также учитывающих особенности управления беспилотным воздушным судном и различия между ним и воздушным судном с пилотом на борту.

Ключевые слова: беспилотная авиационная система, станция внешнего пилота, беспилотный летательный аппарат, внешний член экипажа, компоновка рабочего места внешнего пилота, органы управления, средства отображения информации, средства связи, нормативные требования

Для цитирования: Белякова Н. С., Потурев А. В., Алпеев П. В., Карасев К. В., Дюжикова Г. Е. Об особенностях компоновки рабочего места внешнего пилота // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 40. С. 124–131.

ABOUT THE FEATURES OF THE LAYOUT OF THE WORKSTATION OF EXTERNAL PILOT

N. S. BELYAKOVA, A. V. POTURAEV, P. V. ALPEEV, K. V. KARASEV, G. E. DUZHIKOVA

The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract. This article presents materials related to the development of airworthiness standards for unmanned aerial systems (UAS) and its components, including the external pilot station. The main requirements for the layout of the workplace of the external pilot are indicated, they based on a comparison with the requirements for the layout of the workplaces of the flight crew members. The problems associated with the current lack of an aviation regulatory framework in Russia applicable to unmanned aerial systems and their components are identified and considered. Current national standards, which are today the only approved regulatory requirements for unmanned aerial vehicle (UAV) and external pilot workstation, applicable to UAS and their components, are reviewed. Recommendations are given for the development and implementation of airworthiness standards for unmanned aerial systems and their components, including requirements for the layout of the workplaces of

external crew members and their workload, based on existing aviation regulations, as well as taking into account the peculiarities of piloting an unmanned aircraft and differences between unmanned aircraft and an aircraft with a pilot on board.

Keywords: unmanned aerial system, external pilot station, unmanned aerial vehicle, external crew member, external pilot workplace layout, controls, information display facilities, communication facilities, regulatory requirements

For citation: Belyakova N. S., Poturaev A. V., Alpeev P. V., Karasev K. V., Duzhikova G. E., About the features of the layout of the workstation of external pilot, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 40, pp. 124–131. (In Russ.)

Введение

В настоящее время в России развитие БАС приобретает все больший масштаб в различных сферах деятельности. Применение БПЛА позволяет выполнять множество задач: географические исследования местности, аэрофотосъемка и геодезия; поисково-спасательные работы, ликвидация чрезвычайных ситуаций и их последствий; мониторинг лесных ресурсов, движущихся объектов, ремонтно-строительных работ; беспилотная охрана; перевозка грузов [1–2].

Концепции развития беспилотной авиационной техники в России реализуется очень бурно и стремительно. Специальная рабочая группа по проблемам использования БАС, созданная при Правительстве Российской Федерации, должна разработать предложения по созданию правового поля и условий включения беспилотных авиационных комплексов в единое воздушное пространство Российской Федерации, а также по обучению персонала и выдаче свидетельств операторам БПЛА.

Гражданская авиация до сих пор основывалась на представлении о пилоте, который управляет воздушным судном (ВС), находясь на его борту. Отсутствие пилота на борту ВС ставит важные технические и эксплуатационные вопросы, характер которых активно изучается авиационным сообществом. БАС представляют собой новый компонент общей авиационной системы. В настоящее время ИКАО, входящие в нее государства и предприятия авиационной промышленности проводят работы, связанные с изучением, определением и, в конечном счете, интеграцией БАС в единое воздушное пространство [3].

Традиционно, рабочие места пилотов на борту ВС находятся в изолированной кабине пилотов. Наличие на борту летного экипажа является неотъемлемым элементом всего процесса сертификации ВС и разработки полетных процедур. Снятие кабины пилотов с ВС, особенности взаимодействия членов внешнего экипажа и их рабочих мест будут ставить новые проблемы, которые необходимо решать.

На сегодняшний день в России отсутствуют нормы летной годности, одобренные Федеральным агентством воздушного транспорта, применимые к БАС. Тем не менее, правила полетов относятся ко всем ВС, как с пилотом на борту, так и к БПЛА. Эти правила обязывают поддерживать максимально возможное единообразие отечественных и зарубежных авиационных правил и стандартов. Согласно статье 12 и Приложению 2 к Конвенции о международной гражданской авиации, командир ВС отвечает за выполнение полета в соответствии с правилами полетов. Это также распространяется на его обладание окончательными полномочиями в отношении распоряжения ВС, командиром которого он является, независимо от того, находится ли он на борту ВС или вне его.

В процессе полетов дистанционно пилотируемого воздушного судна (ДПВС) может предусматриваться смена пилотов и передача всех соответствующих обязанностей. Внешние пилоты могут находиться рядом или располагаться в тысячах километров друг от друга; например, в случае океанического полета большой дальности может предусматриваться передача обязанностей, связанных с пилотированием, внешнему пилоту, находящемуся в Азии, от внешнего пилота, находящегося в Северной Америке, или между внешним пилотом на маршруте и местным

внешним пилотом (находящимся в районе аэродрома). Такая передача обязанностей может также определяться сменностью работы внешних пилотов. Для учета передачи обязанностей между различными внешними пилотами потребуются внести соответствующие изменения в имеющиеся авиационные правила и стандарты.

ВС с пилотом на борту и беспилотные имеют много общего в плане обеспечения летной годности. Большинство оценок БАС будет, скорее всего, основываться на том, что уже предусмотрено для ВС с пилотом на борту. Несмотря на это есть специфические для БАС требования, которые необходимо регламентировать на федеральном уровне.

Общие требования

Согласно определению ИКАО, БАС – это ВС и связанные с ним элементы, которые эксплуатируются без пилота на борту. Минимальный набор компонентов, входящих в состав БАС, следующий:

- БВС – беспилотное ВС;
- СВП – станция внешнего пилота, рабочее место, с которого внешний пилот управляет полетом беспилотного ВС;
- канал передачи данных между БВС и СВП.

Член внешнего экипажа, внешний пилот – член экипажа БАС, имеющий свидетельство пилота, на которого возложены обязанности, связанные с управлением дистанционно пилотируемым ВС в течение полетного времени.

В зависимости от задач и эксплуатационной категории конкретной БАС состав компонентов может быть расширен [3–5].

В отношении СВП потребуется осуществлять регламентирующий надзор, аналогичный применяемому в отношении других критически важных элементов авиационной системы. По соображениям летной годности и сертификации, многие бортовые системы с пилотом на борту предусматривают дублирование. Обеспечение аналогичной степени дублирования будет распространяться на ДПВС, СВП и линии связи. Кроме того, может потребоваться обеспечить аналогичную или более высокую степень дублирования для дополнительных систем.

СВП, обеспечивающие полеты БПЛА, должны быть сертифицированы в соответствии со стандартами, которые еще предстоит разработать. Конкретизация новой рабочей обстановки и определение ее влияния на сертификат типа ДПВС связаны с рассмотрением особых возможностей и проблем. Может потребоваться разработка новых конструктивных решений и норм для обеспечения таких функций, как выделение специальной линии передачи данных между СВП и ВС, передача между СВП одной линии передачи данных. Новая рабочая обстановка будет предусматривать использование технических средств и оборудования, которые не подвергались процессу сертификации летной годности.

В России на сегодняшний день уже введен в действие ряд национальных стандартов с нормативными требованиями для БПЛА и БАС [4–8].

Компоновка рабочего места удаленного пилота, а именно функциональные свойства СВП, должна позволять внешнему экипажу осуществлять управление и контроль БПЛА без чрезмерной концентрации внимания или усталости, а также минимизировать возможные ошибки экипажа в процессе эксплуатации. Вероятность возникновения особой ситуации (авария БПЛА, материальные потери и повреждения на земле) должна быть уменьшена до минимально приемлемого уровня, который должен задаваться нормами летной годности (НЛГ), утвержденными авиационными властями России.

В зависимости от типа выполняемой операции (в зоне или вне зоны прямой видимости, сложности БАС, типа используемого интерфейса системы управления, количества внешних пилотов) СВП должна быть оборудована:

- а) органами управления и контроля;

- b) рабочими местами членов внешнего экипажа БАС в соответствии с санитарными нормами;
- c) установками кондиционирования воздуха и системами отопления;
- d) устройствами противопожарной безопасности;
- e) освещением рабочих зон;
- f) оборудованием предполетной подготовки БАС;
- g) системой взлета и посадки БВС;
- h) радиосвязью;
- i) системами индикации и сигнализации о нештатных и аварийных ситуациях;
- j) комплектом рабочей документации БАС;
- k) системой контроля состояния функциональных систем БАС;
- l) системой защиты от несанкционированного доступа;
- m) средствами транспортировки, хранения и размещения СВП.

Как и в нормах летной годности ВС с пилотом на борту, в нормы летной годности БАС должны быть включены следующие основные требования в части компоновки СВП:

- 1 - к рабочим местам внешнего экипажа БАС;
- 2 - к органам управления;
- 3 - к средствам отображения информации;
- 4 - к радиотехническому оборудованию.

Требования к рабочим местам внешнего экипажа БАС

1. Минимальное количество членов внешнего экипажа БАС должно быть определено таким образом, чтобы их было достаточно для безопасного проведения полета, принимая во внимание следующее:

– индивидуальный объем работы каждого члена внешнего экипажа БАС должен предусматривать решение следующих задач: контроль и управление всеми основными элементами БАС: навигация; контроль курса полета; связь (системы связи); согласование своих действий со службами организации воздушного движения; принятие решений, включая использование возможностей внешнего экипажа; удобство и легкость работы с необходимыми средствами управления.

2. СВП и ее оборудование должны позволять каждому члену внешнего экипажа БАС выполнять свои обязанности на рабочем месте без перенапряжения или усталости.

3. Условия работы внешнего экипажа БАС (температура, влажность, вибрация, шум, теплоотдача) не должны препятствовать безопасному выполнению полетов.

4. Освещение рабочего места члена внешнего экипажа должно обеспечивать заметность, точную идентификацию и легкость восприятия информации каждого индикатора, дисплея и других элементов контроля, необходимых внешнему экипажу для выполнения своих функциональных обязанностей; размещаться так, чтобы органы зрения были защищены от попадания прямых лучей света и лучей, отраженных от любой поверхности.

5. Обзор с рабочего места внешнего пилота должен полностью охватывать рабочую зону и не допускать искажений обстановки.

Рабочие места внешнего экипажа БАС должны быть оснащены охлаждением [8].

Требования к органам управления

1. Каждый орган управления СВП должен быть расположен и обозначен таким образом, чтобы исключить ошибочные действия членов внешнего экипажа БАС.

2. Расположение и конструкция органов управления СВП должны обеспечивать членам внешнего экипажа на их рабочем месте удобное и эффективное применение всех органов управления без каких-либо помех.

3. Система управления БАС должна быть разработана таким образом, чтобы органы управления, необходимые для длительного безопасного полета и посадки оставались доступными для членов внешнего экипажа БВС – в нормальных, нештатных и аварийных ситуациях эксплуатации БПЛА.

4. Направление действия органов управления положением БВС в пространстве должно соответствовать реакции БВС на изменение направления его движения.

5. Должны иметься средства, позволяющие внешнему экипажу БАС быстро отключать в полете подачу топлива к каждому двигателю отдельно. Конструкция перекрывного устройства должна обеспечить невозможность случайного включения каждого перекрывного устройства и возможность повторного его использования после того, как оно было применено для отключения подачи топлива к двигателю БВС.

6. Внешний экипаж БВС на СВП должен быть обеспечен всеми необходимыми органами управления силовой установкой БВС, позволяющими осуществлять ее эксплуатацию в нормальных, нештатных и аварийных ситуациях, принимая во внимание уровень автоматизации, реализованной системой управления полетом БАС.

7. Для каждого устройства БАС, которое может отключаться с рабочего места СВП, должна быть предусмотрена такая конструкция, которая предотвращает непреднамеренное отключение (закрытие) устройства и позволяет повторно включить устройство в полете после его отключения (закрытия).

8. Если БВС способен выполнять взлет или посадку в автоматическом режиме, внешний пилот БВС должен иметь органы управления на рабочем месте СВП, позволяющие быстро и безошибочно выполнить операцию по прекращению этапа взлета или этапа посадки [8].

Требования к средствам отображения информации

1. Данные о состоянии работы силовой установки и информация о пространственном положении БВС должны быть хорошо видны и однозначно восприниматься каждым членом внешнего экипажа.

2. Информация, необходимая для безопасной эксплуатации БАС, должна быть соответствующим образом сгруппирована и расположена в поле зрения члена внешнего экипажа БВС.

3. Должна быть предусмотрена индикация, указывающая на отказы в работе оборудования; она должна быть видна при любой освещенности.

4. Все устройства отображения информации СВП (дисплеи, индикаторы, табло) должны быть видны и правильно и полностью считываемы при любой освещенности.

5. Если отображение какой-либо информации нечеткое, то его автоматическое появление должно сопровождаться соответствующим звуковым оповещением.

6. Параметры полета и навигационная информация. Минимально необходимые полетные и навигационные данные, которые должны непрерывно выводиться на устройства отображения информации СВП со скоростью обновления, соответствующей безопасной работе, следующие: воздушная скорость; барометрическая высота и связанные с ней установки высотомера; текущий курс полета БВС; реальная траектория полета БВС; положение БВС, которое должно отображаться на карте непрерывно и в масштабе, выбираемом внешним экипажем БАС на уровне детализации, гарантирующем безопасный полет.

7. Данные силовой установки. Минимально необходимые параметры силовой установки, которые должны постоянно выводиться на устройства отображения информации СВП со скоростью обновления, обеспечивающей оперативность контроля и безопасную работу, следующие:

– количество и расход топлива с соблюдением нижеперечисленных условий:

(1) указатели остатка топлива должны показывать количество оставшегося топлива в каждой баке БВС в течение всего полета;

(2) указатели расхода топлива должны показывать скорость потребления топлива в каждом баке БВС в течение всего полета;

(3) каждый указатель остатка топлива должен иметь достаточное количество делений для удобной и точной индикации;

- число оборотов в минуту ротора каждого двигателя, установленного на БПЛА;

- параметры работы каждого двигателя, характеризующие устойчивость его работы (установленные эксплуатационными документами);

- для БВС, оборудованного системой автоматического взлета или системой автоматической посадки, или обеими системами, в течение фаз взлета и/или посадки для внешнего экипажа БАС должны непрерывно выводиться следующие данные: траектория полета БВС, отклонение фактической траектории полета от запланированной пилотом БВС.

8. Система электронных устройств отображения информации СВП должна:

- обеспечивать хорошую различимость и считываемость данных при всех видах освещения, которые возможны на автоматизированном рабочем месте, принимая во внимание прогнозируемый уровень яркости дисплея к концу эксплуатационного срока электронных устройств отображения информации;

- быть разработана таким образом, чтобы члену внешнего экипажа БАС на его рабочем месте было достаточно одного электронного устройства отображения информации (дисплея) для продолжительного безопасного полета или посадки в случае единичного или множественных отказов электронных устройств отображения информации [8].

Требования к радиотехническому оборудованию

1. СВП должна быть оборудована устройствами, обеспечивающими управление передачей данных от внешнего экипажа на БВС и обратно.

2. Для СВП, имеющих несколько рабочих мест членов внешнего экипажа, одновременно выполняющих свои обязанности, необходимо обеспечить возможность ведения независимых переговоров в реальных условиях.

3. Если возможны условия, при которых будет затруднено ведение переговоров между членами внешнего экипажа, конструкция СВП должна включать в себя внутреннее переговорное устройство (ВПУ) [8].

Заключение

Для интеграции БАС в единое воздушное пространство и для обеспечения и поддержания необходимого уровня безопасности полетов в нем пилотируемых ВС и беспилотных ВС необходимо создание нормативной базы, содержащей:

- требования к конструкции БАС и ее компонентам;
- требования к организации и выполнению полетов БАС;
- требования к квалификации внешних пилотов.

Рекомендуется обратить внимание на необходимость разработки и утверждения НЛГ БАС, которые учитывали бы общность и различие между ВС с пилотом на борту и без него.

Требования к компоновке рабочих мест членов внешнего экипажа и их нагрузке должны учитывать те же принципы и рекомендации, которые учитываются при компоновке рабочих мест членов летного экипажа и их нагрузки.

Отсутствие на борту пилота может ввести новые особенности исполнения функций, связанных с обеспечением безопасности полетов в воздушном пространстве, включая в том числе БАС, что предполагает внедрение в авиационную деятельность технических средств обнаружения и предупреждения опасных ситуаций, управления и контроля, обеспечения связи с органом

управления воздушным движением и предотвращения непреднамеренного или незаконного вмешательства.

Список источников

1. Перспективы развития применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами // Сборник докладов и статей по материалам II научно-практической конференции. Коломна: 924 ГЦ БПА МО РФ, 2017. 337 с.
2. Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях // Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Иркутск 22–23 мая 2018 г., Иркутск: институт географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2018. 136 с.
3. Циркуляр 328 AN/190 ИКАО. Беспилотные авиационные системы (БАС). ИКАО. 2011. 65 с.
4. ГОСТ Р 57258-2016. Системы беспилотные авиационные. Термины и определения. Москва: Стандартиформ, 2018. 12 с.
5. ГОСТ Р 59517-2021. Беспилотные авиационные системы. Классификация и категоризация. Москва: Стандартиформ, 2021. 11 с.
6. ГОСТ Р 59518-2021. Беспилотные авиационные системы. Порядок разработки. Москва: Стандартиформ, 2021. 8 с.
7. ГОСТ Р 59519-2021. Беспилотные авиационные системы. Компоненты беспилотных авиационных систем. Спецификация и общие технические требования. Москва: Стандартиформ, 2021. 11 с.
8. ГОСТ Р 59520-2021. БАС. Функциональные свойства станции внешнего пилота. Москва: Стандартиформ, 2021. 16 с.

References

1. *Perspektivy razvitiya i primeneniya kompleksov s bespilotnymi letatel'nyimi apparatami, Sbornik dokladov i statej po materialam II nauchno-prakticheskoy konferencii*, Kolomna, 924 GTS BpA MO RF, 2017, 337 p. (In Russ.)
2. *Primenenie bespilotnyh letatel'nyh apparatov v geograficheskikh issledovaniyakh, Materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii*, Irkutsk, May 22–23, 2018, Irkutsk, Institut geografii im. V.B. Sochavy SO RAN, 2018, 136 p. (In Russ.)
3. Circular 328 AN/190 ICAO. Unmanned Aircraft Systems (UAS), ICAO, 2011., 54 p.
4. GOST R 57258-2016. Unmanned aircraft systems. Terms and definitions, Moscow, Standartinform Publ., 2018, 12 p. (In Russ.)
5. GOST R 59517-2021. Unmanned aircraft systems. Classification and categorization, Moscow, Standartinform Publ., 2021, 11 p. (In Russ.)
6. GOST R 59518-2021 Unmanned aircraft systems. Development procedure, Moscow, Standartinform Publ., 2021, 8 p. (In Russ.)
7. GOST R 59519-2021. Unmanned aircraft systems. UAS components. Specification and general technical requirements, Moscow, Standartinform Publ., 2021, 12 p. (In Russ.)
8. GOST P 59520-2021. Unmanned aircraft systems. Functional properties of the remote pilot station, Moscow, Standartinform Publ., 16 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Белякова Наталья Сергеевна, ведущий инженер – эксперт, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, NA_Belyakova@gosniiga.ru

Потураев Алексей Викторович, заместитель начальника отдела, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, av_poturaev@gosniiga.ru

Алпеев Петр Валерьевич, заместитель директора Сертификационного центра бортового оборудования – начальник отдела, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, PA_Alpeev@gosniiga.ru

Карасев Константин Валерьевич, исполняющий обязанности директора Научного Центра бортового оборудования, Директор Сертификационного центра бортового оборудования, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, KV_Karasev@gosniiga.ru

Дюжикова Галина Евгеньевна, старший научный сотрудник, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Dyuzhikovage@gosniiga.ru

Authors information

Belyakova Natalia S., Lead Engineer – Expert of Department, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, NA_Belyakova@gosniiga.ru

Poturaev Aleksey V., Deputy Head of Department, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, av_poturaev@gosniiga.ru

Alpeev Petr V., Deputy Director of the Certification Center for Onboard Equipment, Head of Department, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, PA_Alpeev@gosniiga.ru

Karasev Konstantin V., Acting Director of the Scientific Center for Onboard Equipment, Director of the Certification Center for Onboard Equipment, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, KV_Karasev@gosniiga.ru

Duzhikova Galina E., Senior Researcher, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, Dyuzhikovage@gosniiga.ru

*Статья поступила в редакцию 27.07.2022; одобрена после рецензирования 24.10.2022 принята к публикации 31.10.2022.
The article was submitted 27.07.2022; approved after reviewing 24.10.2022; accepted for publication 31.10.2022.*

Научная статья
УДК 629.7.051

АЛГОРИТМЫ КОМПЛЕКСНОЙ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ ГЛОНАСС И БЭЙДОУ В БОРТОВОЙ АППАРАТУРЕ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Э. А. БОЛЕЛОВ¹, А. Т. КУДИНОВ¹, В. Н. ШИКАЛОВ¹, А. В. ПРОХОРОВ¹, И. Б. ГУБЕРМАН²

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

² *Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия*

Аннотация. В статье рассмотрен подход к построению бортовой аппаратуры потребителя глобальных навигационных спутниковых систем в составе бортового навигационного оборудования воздушных судов. Выполнен анализ особенностей функционирования глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и Бэйдоу. Показано, что использование меандровых шумоподобных (широкополосных) сигналов (ВОС-сигналов) открывает новые возможности для построения алгоритмов обработки информации в интересах навигационного обеспечения воздушных судов (ВС) гражданской авиации (ГА). Рассмотрены достоинства и недостатки ВОС-сигналов. Применение таких сигналов осложняется такими условиями функционирования глобальных навигационных спутниковых систем, как плохая геометрия видимых навигационных космических аппаратов (НКА), вероятности возникновения сильных радиопомех от непреднамеренных и преднамеренных радиоизлучателей, локальные неоднородности ионосферы. Делается вывод о необходимости и возможности построения бортовой аппаратуры потребителей навигационной информации на основе комплексной обработки информации от радиотехнических и нерадийных навигационных систем. Методами марковской теории оптимального оценивания случайных процессов получены алгоритмы комплексной обработки сигналов спутниковой радионавигационной системы и инерциальной навигационной системы для случаев структурно раздельной и совместной обработки радиосигналов. Представлена структурная схема системы, характерной особенностью которой является отсутствие перекрестных связей между каналами обработки радиосигналов.

Ключевые слова: глобальные навигационные спутниковые системы, комплексная обработка информации, марковская теория оценивания случайных процессов, меандровые шумоподобные сигналы, ГЛОНАСС, Бэйдоу, инерциальная навигационная система

Для цитирования: Болелов Э. А., Кудинов А. Т., Шикалов В. Н., Прохоров А. В., Губерман И. Б. Алгоритмы комплексной обработки информации глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и Бэйдоу в бортовой аппаратуре воздушных судов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 40. С. 132–144.

ALGORITHMS OF COMPLEX INFORMATION PROCESSING OF GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS GLONASS AND BEIDOU IN THE ONBOARD EQUIPMENT OF AIRCRAFT

E. A. BOLELOV¹, A. T. KUDINOV¹, V. N. SHIKALOV¹, A. V. PROKHOROV¹, I. B. GUBERMAN²

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

² *The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia*

Abstract. The article considers an approach to the construction of on-board equipment for the consumer of global navigation satellite systems as part of the on-board navigation equipment of aircraft. The analysis of the functioning features of the global navigation satellite systems GLONASS and Beidou is carried out. It is shown that the use of meander noise-like (broadband) signals opens up new possibilities for constructing algorithms for information processing in the interests of navigation support for civil aviation aircraft. The advantages and disadvantages of BOC-signals are considered. The use of such signals is complicated by such operating conditions of global navigation satellite systems as poor geometry of visible navigation spacecraft, the likelihood of strong radio interference from unintentional and intentional radio emitters, local inhomogeneities of the ionosphere. It is concluded that it is necessary and possible to build on-board equipment for navigation information consumers based on complex processing of information from radio and non-radio navigation systems. Algorithms of complex signal processing of satellite radio navigation system and inertial navigation systems for cases of structurally separate and joint processing of radio signals are obtained by the methods of Markov theory of optimal estimation of random processes. A block diagram of the system is presented, a characteristic feature of which is the absence of cross-links between the channels of radio signal processing.

Keywords: global navigation satellite systems, complex information processing, Markov theory of random process estimation, meander noise-like signals, GLONASS, Beidou, inertial navigation system

For citation: Bolelov E. A., Kudinov A. T., Shikalov V. N., Prokhorov A. V., Guberman I. B., Algorithms of complex information processing of global navigation satellite systems GLONASS and Beidou in the onboard equipment of aircraft, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 40, pp. 132–144. (In Russ.)

Введение

Круг задач, решаемых глобальными навигационными спутниковыми системами (ГНСС), и требования, предъявляемые к ним по точности и надежности навигационных определений, их оперативности, устойчивости к помехам и при работе в условиях многолучевости, электромагнитной совместимости, растут с каждым годом [1–3]. В настоящее время все диапазоны частот, в частности L диапазон, который отведен для ГНСС, практически уже заняты существующими системами. В таких условиях любое перераспределение или выделение каких-либо новых частот представляет собой сложную проблему, что обуславливает требование как можно более эффективного использования каждого диапазона с максимальной плотностью радиоэлектронных устройств и систем на единицу полосы частот. Все это вызывает необходимость исследования и внедрения в практику ГНСС новых более совершенных навигационных сигналов, например, меандровых шумоподобных (широкополосных) сигналов (МШПС), ВОС-сигналов, и разработки алгоритмов функционирования устройств и систем, осуществляющих оптимальную обработку сигналов такого рода в целях повышения эффективности навигационных определений в целом.

Особенность МШПС, выделяющая их из традиционных шумоподобных сигналов (ШПС), используемых сегодня в ГНСС ГЛОНАСС и немодернизированной GPS, заключается в наличии в составе модулирующей функции ВОС-сигналов меандрового поднесущего колебания (МПК), длительность меандровых импульсов которого в коэффициент кратности раз короче длительности элемента прямоугольной псевдослучайной последовательности (ППСП) [2, 4].

Более эффективное использование частотного спектра применительно к L диапазону в условиях заметно растущего числа пользователей ГНСС становится реализуемым благодаря появившейся возможности формирования на одной и той же несущей частоте сигналов с различными спектрами за счет изменения коэффициента кратности меандровых импульсов в структуре ВОС-сигналов.

Последнее обстоятельство позволяет обеспечить одновременное функционирование навигационных систем с традиционными и новыми радиосигналами, что достигается благодаря «расщеплению» спектра у ВОС-сигналов (при четном числе импульсов в меандровом символе (МС)).

Кроме того, можно ожидать достижения более высоких точности и помехозащищенности ГНСС, использующих подобные сигналы, за счет обострения основного пика корреляционной функции (КФ) ВОС-сигналов в силу применения более коротких видеоимпульсов в МС.

Однако использование такого рода сигналов имеет ряд недостатков, связанных с трудностями захвата и обеспечения однозначного слежения за основным пиком КФ. Вместе с отмеченными особенностями, функционирование ГНСС в интересах навигационного обеспечения воздушных судов (ВС) гражданской авиации (ГА) осложняется следующими факторами: плохая геометрия видимых НКА; вероятности возникновения сильных радиопомех от непреднамеренных и преднамеренных радиоизлучателей; локальные неоднородности ионосферы [5].

Устойчивость функционирования ГНСС в подобных аномальных условиях существенно зависит от помехоустойчивости приёмников потребителей. Помехоустойчивые приёмники ГНСС могут быть построены на основе их комплексирования с другими измерителями и реализации методов первичной оптимальной (субоптимальной) обработки радиосигналов.

Мониторинг количества видимых на территории Российской Федерации НКА и значений геометрического фактора, определяющего характеристики точности различных ГНСС (ГЛОНАСС, GPS, Галилео, Бэйдоу) показывает, что в большей степени для построения интегрированной приемоиндикаторной аппаратуры, реализующей алгоритмы комплексной первичной обработки, подходят российская ГНСС ГЛОНАСС и китайская Бэйдоу (BDS). В частности (см. рис. 1–4), количество навигационных спутников составляет в среднем 23, а значение геометрического фактора PDOP в среднем не превышает 1,06, в то время как для GPS эти показатели составляют 10 видимых спутников, а значение геометрического фактора PDOP – 1,56 и выше.

Кроме того, тот факт, что в ГНСС Бэйдоу изначально используются ВОС-сигналы, а в ГНСС ГЛОНАСС наряду с ВОС-сигналами применяются традиционные ШПС, позволяет предположить, что использование этих сигналов в системе комплексной первичной обработки информации в составе навигационного оборудования ВС повысит эффективность навигационных определений на различных этапах полёта. Также не следует отказываться от использования информации от нерадотехнических систем, в первую очередь инерциальных навигационных систем (ИНС). Использование такого рода информационной избыточности позволит повысить помехоустойчивость системы комплексной обработки информации (КОИ) и в значительной мере устранить недостатки, обусловленные особенностью структуры и принципами формирования ВОС-сигналов.

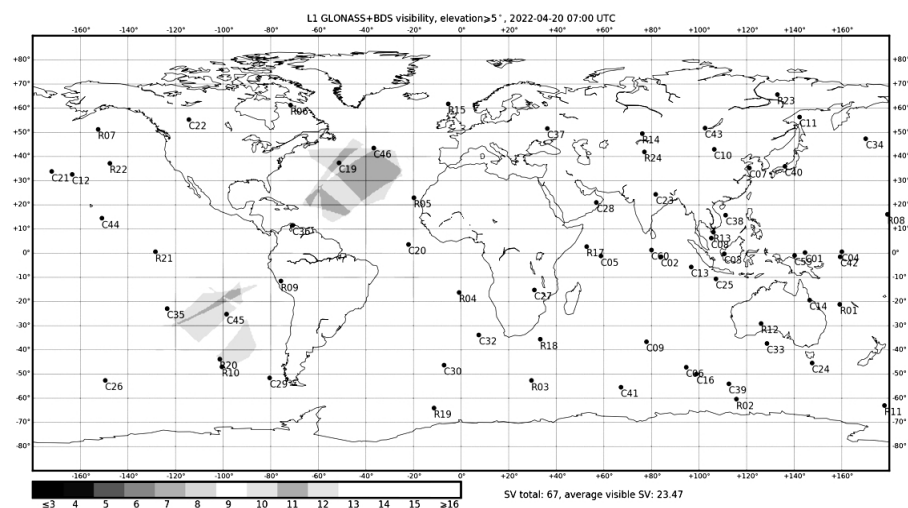


Рис. 1. Количество видимых спутников ГНСС ГЛОНАСС+Бэйдоу

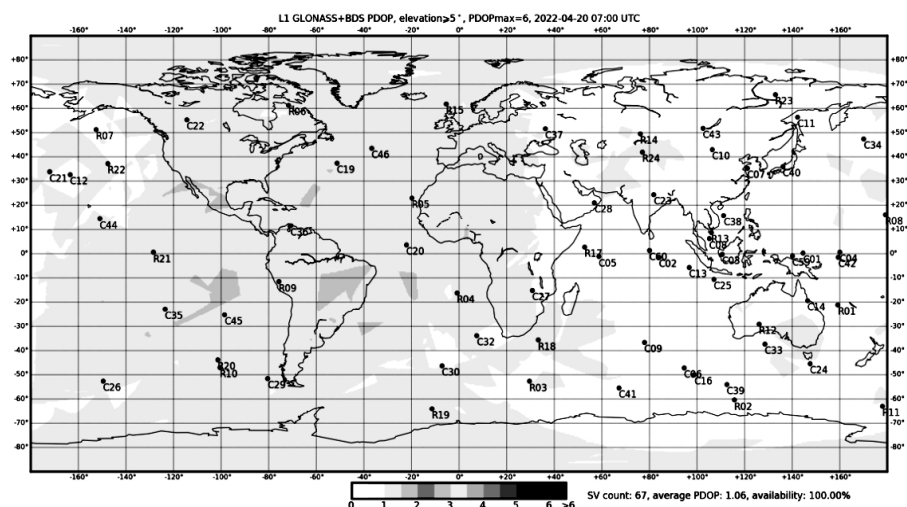


Рис. 2. Значение геометрического фактора ГНСС ГЛОНАСС+Бэйдоу

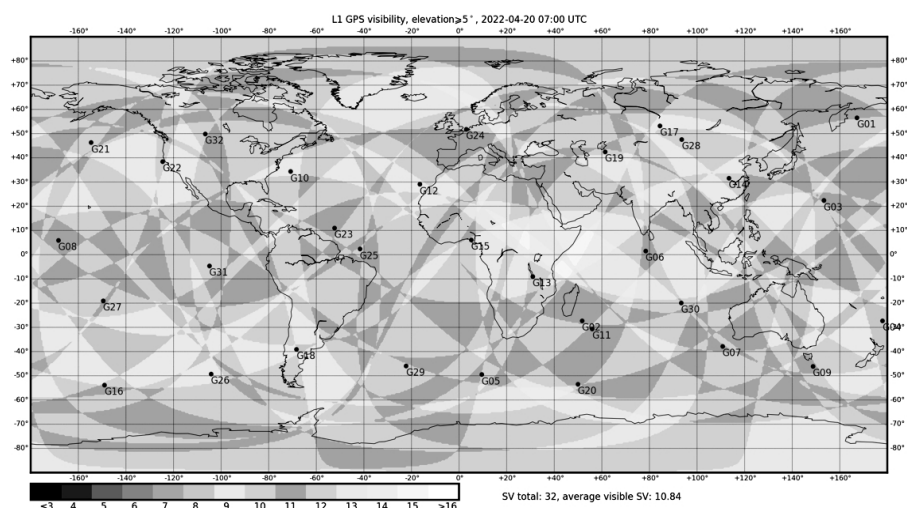


Рис. 3. Количество видимых спутников ГНСС GPS

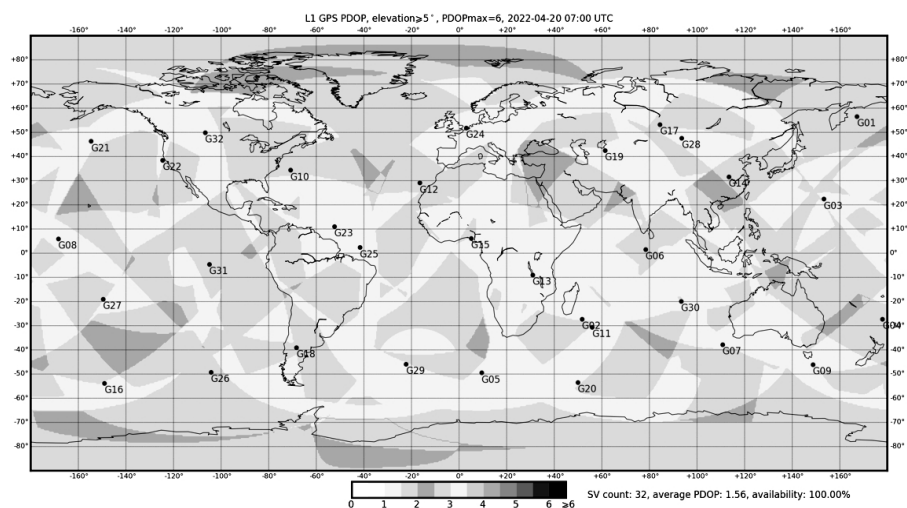


Рис. 4. Значение геометрического фактора ГНСС GPS

Актуальность исследований в данном направлении также подтверждается подписанием в ноябре 2021 года российско-китайской дорожной карты в области спутниковой навигации на 2021–2025 годы. Опираясь на имеющиеся достижения и стремясь обеспечить интегрированное и инновационное развитие систем ГЛОНАСС и Бэйдоу, стороны определили следующие задачи и направления совместного сотрудничества: обеспечение совместимости и взаимодополняемости систем ГЛОНАСС и Бэйдоу, развитие функциональных дополнений и измерительных станций, осуществление мониторинга и оценки характеристик ГНСС, а также реализация проектов по совместному применению технологий ГНСС.

Постановка задачи синтеза

Синтез алгоритмов КОИ в бортовой аппаратуре потребителя (АП) ГНСС проведем с учетом того, что в зоне видимости ВС находится избыточное количество НКА. Кроме того, примем следующие предположения:

- 1) для повышения качества функционирования АП ГНСС в системе КОИ используется информация о скорости ВС, поступающая от ИНС;
 - 2) в АП предусматривается возможность реализации автономного контроля целостности (АКЦ);
 - 3) причиной нарушения целостности ГНСС является пропадание по какой-либо причине радиосигналов от того или иного НКА или от нескольких НКА одновременно;
 - 4) определение координат ВС осуществляется в гринвичской системе координат (СК).
- Вектор наблюдения на полуинтервалах $[t_k, t_{k+1})$ можно представить в виде:

$$\Xi(t) = [\xi_1(t), \dots, \xi_I(t), \Xi_n(t_k)]^T, \quad t \in [t_k, t_{k+1}), \quad k=1, 2, \dots,$$

где

$$\xi_i(t) = S_i[t, \mathbf{Y}_i, \mathcal{G}_{ik}, \lambda_{ik}] + n_i(t), \quad i = \overline{1, I} \quad (1)$$

– радиосигнал i -го НКА, наблюдаемый на входе бортовой АП ГНСС на полуинтервале $[t_k, t_{k+1})$; I – общее число НКА, доступных для наблюдения на борту ВС в текущий момент времени t ; $S_i[t, \mathbf{Y}_i, \mathcal{G}_{ik}, \lambda_{ik}]$ – полезный дискретно-непрерывный сигнал i -го НКА; $n_i(t)$ – стационарный белый гауссовский шум (БГШ) наблюдения с известными статистическими характеристиками; $\mathbf{Y}_i^T(t) = [d_i, \dot{d}_i, \varphi_i, \Delta\omega_i]$ – вектор радионавигационных параметров, от которых непосредственно зависит радиосигнал i -го НКА (d_i – основной радионавигационный параметр, представляющий собой псевдодальность по направлению ВС – НКА, $\dot{d}_i$ – радиальная псевдоскорость применительно к i -му НКА, φ_i – случайная фаза, $\Delta\omega_i$ – уход части задающего генератора i -го НКА); $\mathcal{G}_{ik}$ – дискретный информационный параметр, передающий служебную информацию и принимающий значения 0 и 1; λ_{ik} – параметр отказа для i -го НКА, принимающий значение 0 или 1 в зависимости от состояния i -го канала измерения («0» означает отказ канала, «1» – i -й канал исправен);

$$\Xi_n(t_k) = H(t_k)\mathbf{X}(t_k) + \mathbf{E}_n(t_k), \quad k=1, 2, \dots, \quad (2)$$

– наблюдение с выхода ИНС, представляющее собой вектор измеренных с помощью ИНС величин проекций путевой скорости ВС на оси гринвичской СК;

$$\mathbf{E}_n(t_k) = \Phi_{EE}\mathbf{E}_n(t_{k-1}) + \Phi_{Ex}X(t_{k-1}) + \Gamma_E\mathbf{N}_E(t_{k-1}), \quad \mathbf{E}_n(t_0) = \mathbf{E}_{n0}$$

– вектор дискретных шумов измерения, определяемый погрешностями измерения скорости на выходе ИНС, $H(t_k)$, Φ_{EE} , Φ_{Ex} , Γ_E – известные матрицы, $\mathbf{N}_E(t_{k-1})$ – вектор независимых

гауссовских случайных величин с нулевыми математическими ожиданиями и единичными дисперсиями.

Полезный сигнал ГНСС $S_i[t, \mathbf{Y}_i, \vartheta_{ik}, \lambda_{ik}]$ i -го НКА с учётом возможных отказов можно представить в виде

$$S_i[t, \mathbf{Y}_i, \vartheta_{ik}, \lambda_{ik}] = \lambda_{ik} A_i g_i(t - \tau_{zi}) \sin(\omega_i t + \phi_i(t) + \vartheta_{ik} \pi) = \lambda_{ik} \tilde{S}_i[t, \mathbf{Y}_i, \vartheta_{ik}], \quad (3)$$

где A_i – амплитуда сигнала; $\tau_{zi} = d_i/c$ – задержка сигнала; ω_i – несущая частота сигнала; $g_i(t - \tau_{zi})$ – модулирующая функция (МФ) радиосигнала ГНСС; c – скорость света; $\tilde{S}_i[t, \mathbf{Y}_i, \vartheta_{ik}]$ – полезный сигнал ГНСС i -го НКА без учета возможных отказов канала.

Специфика МШПС (ВОС-сигналов) полностью заключена в их МФ $g_i(t - \tau_{zi})$. Применительно к информационному сигналу в достаточно общем случае МФ $g(t)$ является результатом перемножения четырех последовательностей:

- 1) собственно прямоугольная псевдослучайная последовательность (ППСП) дальномерного кода;
- 2) меандрового поднесущего колебания (специфика ВОС-сигналов);
- 3) посылок навигационного сообщения;
- 4) посылки синхрокода для обеспечения тактовой синхронизации при функционировании системы [6].

МФ $g_i(t - \tau_{zi})$ типового ВОС-сигнала (3), представляющая собой меандровую псевдослучайную последовательность (МПСП) дальномерного кода, определяется соотношением вида

$$g_i(t - \tau_{zi}) = \partial(t - \tau_{zi}) r(t - \tau_{zi}),$$

где $\partial(t)$ – ППСП дальномерного кода, которая также характерна и для традиционных ГНСС; $r(t)$ – меандровое поднесущее колебание, отражающее специфику ВОС-сигналов [4].

Таким образом, МПСП $g(t)$ образуется путем перемножения взаимно синхронизированных двоичных последовательностей $\partial(t)$ и $r(t)$, каждая из которых состоит из чередующихся единичных видеоимпульсов соответствующей длительности, меняющих свою полярность по определенным законам согласно кодовым коэффициентам, значения которых равны +1 или –1.

При рассмотрении параметров отказов λ_{ik} полагаем, что их значения на соседних тактовых интервалах образуют однородную марковскую цепь с матрицей вероятностей перехода

$$\Pi^i = [\pi_{\nu\mu}^i] = [p\{\lambda_i(t_{k+1}) = \mu | \lambda_i(t_k) = \nu\}] \quad (4)$$

и вектором вероятностей начального состояния

$$\mathbf{P}_{i0} = [p_{i1}(t_0), p_{i0}(t_0)]^T.$$

С учетом принятых допущений задача АКЦ сводится к получению оценок параметров отказов λ_{ik} , $i=1, I$, характеризующих состояние информационных каналов видимого созвездия НКА.

Вектор состояния, подлежащий оцениванию, в рассматриваемом случае имеет вид

$$\mathbf{X}^T(t) = [x, y, z, \mathbf{V}^T, \mathbf{A}^T, \mathbf{V}_{\Pi}^T, \phi_1, \dots, \phi_I, \Delta\omega_1, \dots, \Delta\omega_I, \Delta, \delta d], \quad (5)$$

где x, y, z – координаты ЛА; $\mathbf{V} = [V_x, V_y, V_z]^T$, $\mathbf{A} = [A_x, A_y, A_z]^T$, $\mathbf{V}_{\Pi} = [V_{\Pi x}, V_{\Pi y}, V_{\Pi z}]^T$ – векторы проекций земной скорости, ускорения и постоянной составляющей земной скорости ВС на оси гринвичской СК; $\Delta = [\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z]^T$ – вектор постоянных ошибок определения ускорений

в проекциях на оси гринвичской СК; δd – сдвиг шкалы времени (ШВ) ВС относительно ШВ НКА, выраженный в единицах дальности.

Связь вектора радионавигационных параметров i -го НКА $\mathbf{Y}_i(t)$ с компонентами вектора состояния в общем виде описывается как $\mathbf{Y}_i(t) = L_i \{\mathbf{X}(t)\}$, где $L_i \{\cdot\}$ – известная функция.

В ряде случаев динамику вектора состояния $\mathbf{X}(t)$ удаётся представить в виде линейного векторно-матричного дифференциального стохастического уравнения [7, 8]:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = F\mathbf{X}(t) + C\mathbf{U}(t) + G\mathbf{N}(t), \quad \mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}_0,$$

где $\mathbf{N}(t)$ – вектор формирующих БГШ с известными статистическими характеристиками; F , C и G – известные матрицы состояния, управления и возмущения соответственно; $\mathbf{U}(t)$ – вектор управления, элементами которого являются известные на основе служебной информации проекции земной скорости НКА на оси гринвичской СК.

Таким образом, постановку задачи синтеза алгоритмов КОИ в АП с АКЦ ГНСС можно сформулировать следующим образом: имея априорные сведения о векторе состояния $\mathbf{X}(t)$ (5), параметрах отказов λ_{ik} (4) и располагая наблюдениями (1) и (2), требуется определить оценку вектора состояния $\mathbf{X}^*(t)$, оптимальную по критерию минимума СКО, и оценки параметров отказов λ_{ik}^* , оптимальные по критерию максимума апостериорной вероятности. Далее будем полагать, что оценки дискретных параметров $\mathcal{P}_{ik}$ формируются по соответствующим алгоритмам и являются известными [4, 6].

Результаты

Решение задачи синтеза алгоритмов КОИ в АП ГНСС выполнено методами марковской теории оценивания случайных процессов путем поэтапного решения уравнения Стратоновича и гауссовской аппроксимации апостериорной плотности вероятности (АПВ) [9].

Возможность применения метода поэтапного решения уравнения Стратоновича обусловлена обоснованным упрощением моделей оцениваемых процессов, суть которого заключается в описании динамики вектора состояния $\mathbf{X}(t)$ на полуинтервалах $[t_k, t_k + T)$ квазислучайным процессом [10]:

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{f}(t, \mathbf{X}_k), \quad [t_k, t_k + T), \quad \mathbf{X}(t_0) = \mathbf{X}_0,$$

где $\mathbf{f}(\cdot)$ – известная векторная функция своих аргументов.

Представление вектора состояния в виде квазислучайного процесса позволяет свести задачу нелинейного оценивания к задаче нелинейной оценки параметров. При этом удаётся получить аналитическое решение соответствующего уравнения Стратоновича.

Кроме того, использование гауссовской аппроксимации АПВ позволяет получить выражения для апостериорных математических ожиданий и центральных моментов 2-го порядка, которые определяют субоптимальные алгоритмы формирования оценок вектора состояния на первом этапе, т. е. на этапе обработки наблюдений (1) [10]. Указанные алгоритмы для первого этапа описываются следующими выражениями:

$$\mathbf{X}^*(t_k | t_k + T) = \mathbf{X}^*(t_k) + R(t_k | t_k + T) \sum_{i=1}^I \lambda_{ik}^* L_i' \Phi_i'^T, \quad (6)$$

$$R(t_k | t_k + T) = \left\{ R^{-1}(t_k) - \sum_{i=1}^I \lambda_{ik}^* L_i' \Phi_i''^T L_i'^T \right\}^{-1}, \quad (7)$$

где $\mathbf{X}^*(t_k | t_k + T)$ – оценка вектора состояния на первом этапе; $R(t_k | t_k + T)$ – матрица апостериорных центральных моментов 2-го порядка; $\mathbf{X}^*(t_k)$ и $R(t_k)$ – оценка вектора состояния и матрица

апостериорных центральных моментов 2-го порядка после проведения наблюдений $\Xi(t)$ на предыдущем интервале;

$$\Phi'_i = \int_{t_k}^{t_k+T} \left[\frac{\partial F_i(\tau, \mathbf{Y}_{ik})}{\partial \mathbf{Y}_{ik}} \right]^T d\tau \bigg|_{\mathbf{Y}_{ik}=\mathbf{Y}_i^*(t_k)}, \quad \Phi''_i = \int_{t_k}^{t_k+T} \left[\frac{\partial}{\partial \mathbf{Y}_{ik}} \right]^T \left[\frac{\partial F_i(\tau, \mathbf{Y}_{ik})}{\partial \mathbf{Y}_{ik}} \right] d\tau \bigg|_{\mathbf{Y}_{ik}=\mathbf{Y}_i^*(t_k)}$$

– первая и вторая производные логарифма функционала правдоподобия (ЛФП) по компонентам вектора радионавигационных параметров $\mathbf{Y}_i$, вычисленные при $\mathbf{Y}_{ik}=\mathbf{Y}_i^*(t_k)$;

$$F_i(\tau, \mathbf{Y}_{ik}) = \mathbf{N}_i^{-1} \{ 2\xi_i(t) \tilde{S}_i(t, L_i\{\mathbf{f}(t, \mathbf{X}_k)\}) - \tilde{S}_i^2(t, L_i\{\mathbf{f}(t, \mathbf{X}_k)\}) \} \bigg|_{\mathbf{X}_k=\mathbf{X}^*(t_k)}$$

– производная по времени от ЛФП;

$$L'_i = \frac{\partial L_i\{\mathbf{f}(t, \mathbf{X}_k)\}}{\partial \mathbf{X}_k} \bigg|_{\mathbf{X}_k=\mathbf{X}^*(t_k)}$$

– матрица прямого преобразования координат, элементы которой для $t \in [t_k, t_k+T)$ можно считать постоянными.

Используемые в (6) и (7) оценки параметров отказов λ_{ik}^* формируются на основе апостериорных вероятностей, вычисленных в соответствии с выражением

$$p_{ij}(t_k+T|\mathbf{X}_k) = C p_{ij}(t_k+T|\mathbf{X}_k) \exp \int_{t_k}^{t_k+T} F_i(t, L_i\{\mathbf{f}(t, \mathbf{X}_k)\}, \lambda_{ik}=j) dt, \quad j=0,1, \quad (8)$$

где C – постоянный множитель, определяемый из условия нормировки;

$$p_{ij}(t_k|\mathbf{X}_k) = \sum_{l=0}^1 \pi_{lj}^i p_{ij}(t_{k-1}|\mathbf{X}_k).$$

При этом в качестве оптимальной оценки λ_{ik}^* выбирается значение параметра отказа, для которого апостериорная вероятность (8) максимальна:

$$\lambda_{ik}^* = \lambda_{ik} : \max_j p_{ij}(t_k+T|\mathbf{X}_k), \quad j=0,1. \quad (9)$$

На втором этапе, т. е. при обработке дискретных наблюдений (2) в моменты времени $t_k=t_0+kT, k=0,1,2,\dots$, используются алгоритмы, полученные на основе решения рекуррентного уравнения Стратоновича:

$$\mathbf{X}^*(t_{k+1}) = \mathbf{X}_{\text{np}} + K(t_{k+1}) [\Xi(t_{k+1}) - \Phi_{EE}(t_k) \Xi(t_{k+1}) - \Phi_{\Xi x}(t_k) \mathbf{X}^*(t_k+T)], \quad (10)$$

$$K(t_{k+1}) = [\Phi_{xx} R(t_k|t_k+T) \Phi_{\Xi x}^T + B_{x\Xi}] [\Phi_{\Xi x} R(t_k|t_k+T) \Phi_{\Xi x}^T + B_{\Xi\Xi}]^{-1}, \quad (11)$$

$$R(t_{k+1}) = [\Phi_{xx} R(t_k|t_k+T) \Phi_{xx}^T + B_{xx}] - K(t_{k+1}) [\Phi_{xx} R(t_k|t_k+T) \Phi_{\Xi x}^T + B_{x\Xi}]^T, \quad (12)$$

где $\mathbf{X}_{\text{np}} = \Phi_{xx} \mathbf{X}^*(t_k|t_k+T) + \Psi \mathbf{U}(t_k)$, $R(t_{k+1})$ – матрица апостериорных центральных моментов 2-го порядка после проведения наблюдения (2); Φ_{xx} , Ψ , $\Phi_{\Xi x}$, $B_{\Xi\Xi}$ – известные матрицы.

На втором этапе в качестве начальных значений берутся оценка вектора состояния $\mathbf{X}^*(t_k|t_k+T)$ и матрица апостериорных центральных моментов 2-го порядка $R(t_k|t_k+T)$, полученные на первом этапе в соответствии с (6) и (7).

Как видно из (6) и (7), основными элементами алгоритмов для первого этапа являются многомерные дискриминаторы, количество которых соответствует числу одновременно принимаемых сигналов от всех I видимых НКА.

Алгоритм контроля целостности состоит из I идентичных каналов, в каждом из которых согласно (8) и (9) осуществляется формирование оценки параметра отказа λ_{ik}^* соответствующего информационного канала.

В соответствии с (10)–(12) окончательные оценки $\mathbf{X}^*(t_{k+1})$ формируются на основе совместной обработки оценок $\mathbf{X}^*(t_k|t_k+T)$ и наблюдений $\Xi_{ik}(t_k)$, поступающих с выхода ИНС в момент времени t_{k+1} .

Особенностью синтезированных субоптимальных алгоритмов является наличие перекрестных связей между каналами обработки сигналов от различных НКА на уровне первичной обработки сигналов.

Наличие перекрестных связей между каналами обработки радиосигналов на уровне первичной обработки создает определенные трудности при их практической реализации и усложняет процедуру реконфигурации интегрированной системы. Так, при изменении в соответствии с текущими условиями функционирования состава совместно обрабатываемых сигналов потребуются изменять структуру алгоритмов, реализуемых на уровне первичной обработки радиосигналов. Кроме того, необходимо учитывать, что концепция создания интегрированных радионавигационных систем предусматривает использование радионавигационного поля и других систем, например, систем дальней навигации ЧАЙКА и LORAN-C. Поэтому при включении в состав интегрированной системы новых измерителей на основе описанной методики синтеза возникнет необходимость изменения тех ее блоков и устройств, в которых реализуется обработка собственно радиосигналов, что затруднит дальнейшую модификацию уже созданной бортовой интегрированной АП. Учитывая указанные недостатки, свойственные синтезированным алгоритмам, проведем дальнейшее упрощение и получим субоптимальные алгоритмы, которые позволят производить структурно раздельную комплексную обработку радиосигналов рассматриваемого класса на уровне первичной обработки информации.

Перекрестные связи между каналами обработки радиосигналов (КОРС) на уровне первичной обработки информации можно попытаться исключить, если выполнить их синтез в координатах радионавигационных параметров соответствующих полезных радиосигналов, а затем получить алгоритмы совместной обработки выходных данных этих каналов и ИНС в координатах вектора состояния.

Предлагаемый подход к разработке подобных алгоритмов КОИ со структурно раздельной первичной обработкой радиосигналов ГНСС ГЛОНАСС и Бэйдоу заключается в последовательном синтезе КОРС, на выходе которых формируются оценки параметров соответствующих радиосигналов (псевдодальностей, псевдоскоростей, случайных фаз) и алгоритмов совместной обработки выходных данных этих каналов совместно с данными ИНС.

Рассмотрим векторы радионавигационных параметров $\mathbf{Y}_i^T(t) = [d_i, \dot{d}_i, \varphi_i, \Delta\omega_i]$, $i = \overline{1, I}$, от которых непосредственно зависят полезные сигналы $S_i[t, \mathbf{Y}_i, \vartheta_{ik}, \lambda_{ik}]$ в наблюдениях (1).

Для задания динамики изменения векторов $\mathbf{Y}_i(t)$ на характерных полуинтервалах $[t_k, t_k+T)$ воспользуемся моделью в виде квазислучайного процесса:

$$\mathbf{Y}_i(t) = \mathbf{A}_i(t, \mathbf{Y}_{ik}), t \in [t_k, t_k+T), \mathbf{Y}_i(t_0) = \mathbf{Y}_{i0},$$

где $\mathbf{A}_i(\cdot)$ – известная векторная функция своих аргументов.

При этом квазиоптимальные в гауссовском приближении 1-го порядка алгоритмы обработки наблюдений $\xi_i(t)$, $i = \overline{1, I}$, на временном полуинтервале $[t_k, t_k+T)$, полученные на основе решения соответствующего уравнения Стратоновича на этапе обработки радиосигналов, применительно к одному из каналов описываются выражениями:

$$\mathbf{Y}_i^*(t_k|t_k+T) = \mathbf{Y}_i^*(t_k) + R_i(t_k|t_k+T) \lambda_{ik}^* \int_{t_k}^{t_k+T} \left[\frac{\partial F_i(\tau, \mathbf{Y}_{ik}^*)}{\partial \mathbf{Y}_{ik}^*} \right]^T d\tau = \mathbf{Y}_i^*(t_k) + R_i(t_k|t_k+T) \lambda_{ik}^* \Phi_i'(t_k+T), \quad (13)$$

$$R_i(t_k|t_k+T) = \left\{ \tilde{R}_i^{-1}(t_k) - \lambda_{ik}^* \int_{t_k}^{t_k+T} \left[\frac{\partial}{\partial \mathbf{Y}_{ik}^*} \right]^T \left[\frac{\partial F_i(\tau, \mathbf{Y}_{ik}^*)}{\partial \mathbf{Y}_{ik}^*} \right] d\tau \right\}^{-1} = \left\{ \tilde{R}_i^{-1}(t_k) - \lambda_{ik}^* \Phi_i''(t_k+T) \right\}^{-1}, \quad (14)$$

$$\tilde{R}_i^{-1}(t_k) = L_i'^T(\mathbf{X}_k^*) R_k L_i'(\mathbf{X}_k^*), \quad L_i'(\mathbf{X}_k^*) = \left[\frac{\partial L_i'(\mathbf{X}_k^*)}{\partial \mathbf{X}_k^*} \right], \quad i = \overline{1, I},$$

где $\mathbf{Y}_i^*(t_k) = L_i(\mathbf{X}_k^*)$, $\mathbf{X}_k^*$ – оценка вектора состояния $\mathbf{X}(t)$ в момент времени t_k , формируемая в результате совместной обработки оценок радионавигационных параметров $\mathbf{Y}_i^*(t_{k-1}|t_{k-1}+T)$ и выходных данных ИНС; $R_i(t_k|t_k+T)$ – матрица центральных моментов 2-го порядка ошибок фильтрации компонент вектора $\mathbf{Y}_i$; R_k – матрица центральных моментов 2-го порядка ошибок фильтрации компонент вектора $\mathbf{X}$, которые имеют место в результате совместной обработки наблюдений $\Xi_{\text{и}}(t_k)$ и $\mathbf{Y}_i^*(t_{k-1}|t_{k-1}+T)$;

$$F_i(t, \mathbf{Y}_{ik}^*) = N^{-1} \{ 2\xi_i(t) S_i(t, \mathbf{A}(t, \mathbf{Y}_{ik}^*)) - S_i^2(t, \mathbf{A}(t, \mathbf{Y}_{ik}^*)) \};$$

$\Phi_i'(t_k+T)$ и $\Phi_i''(t_k+T)$ – первая и вторая производные ЛФП соответственно.

Присутствующие в (13) и (14) оценки параметров отказов определяются, как и в случае алгоритмов с совместной первичной обработкой радиосигналов, в соответствии с правилом (6) на основе апостериорных вероятностей, вычисленных согласно выражению

$$p_i(t_k+T, \lambda_{ki}=r | \mathbf{Y}_{ik}^*) = C p_i(t_k, \lambda_{ki}=r | \mathbf{Y}_{ik}^*) \exp \int_{t_k}^{t_k+T} F_i(t, \mathbf{Y}_{ik}^*, \lambda_{ki}=r) dt, \quad (15)$$

где $r=0,1$; C – постоянный множитель, определяемый из условия нормировки;

$$p_i(t_k, \lambda_{ki}=r | \mathbf{Y}_k^*) = \sum_{l=0}^1 \pi_{lr}^i p_i(t_{k-1}, \lambda_{ki}=l | \mathbf{Y}_k^*).$$

Рассматривая далее оценки $\mathbf{Y}_i^*(t_{k-1}|t_{k-1}+T)$ в качестве наблюдений, получим алгоритмы оптимального дискретного оценивания значений компонент вектора состояния $\mathbf{X}(t)$. Реализация этих алгоритмов, по сути, является второй ступенью обработки информации.

Если условия применимости метода гауссовской аппроксимации выполняются, то указанные алгоритмы могут быть представлены в виде

$$\mathbf{X}_{k+1}^* = \mathbf{X}_g + K_{k+1} \begin{bmatrix} \Phi'(t_k+T) \\ \Xi_{k+1}^{\text{и}} - H_{k+1} - \Phi_{E\text{X}} \mathbf{X}_k^* - \Phi_{E\text{E}} [\Xi_{k+1}^{\text{и}} - H_k \mathbf{X}_k^*] \end{bmatrix} = \mathbf{X}_g + K_{k+1} \mathbf{Z}_{k+1}, \quad (16)$$

где $\Phi'(t_k+T) = [\Phi_1'(t_k+T), \dots, \Phi_I'(t_k+T)]^T$ – значения первых производных ЛФП; K_{k+1} – матрица оптимальных коэффициентов передачи; $\mathbf{Z}_{k+1}$ – вектор невязок измерений.

Структурная схема системы, реализующей полученные алгоритмы, представлена на рис. 5. Основными элементами схемы являются: каналы обработки радиосигналов (КОРС 1 – КОРС i), блок управления структурой (БУС), блок обработки данных (БОД) и блок обратного преобразования координат (БОПК).

Особенностью данной схемы является отсутствие перекрёстных связей между каналами обработки радиосигналов, но достоинства комплексирования на уровне первичной обработки

сохраняются, так как формирование опорных сигналов осуществляется на основе оценок навигационных параметров, являющихся результатом комплексной обработки радионавигационных параметров и выходных данных ИНС на второй ступени обработки.

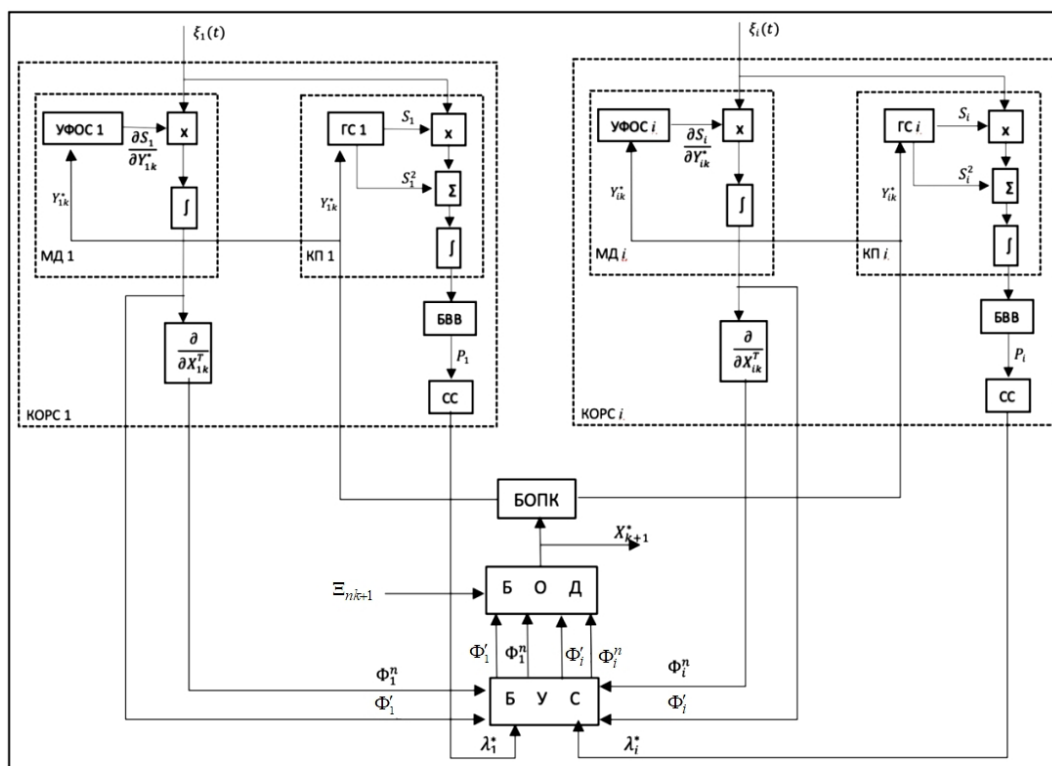


Рис. 5. Структурная схема системы комплексной обработки информации

Заключение

Сравнительный анализ рассматриваемых алгоритмов (6)–(12) и (13)–(16) позволяет сделать вывод о том, что алгоритмы с совместной первичной обработкой радиосигналов являются наиболее приемлемым вариантом обработки информации в бортовой интегрированной АП ГНСС для повышения качества и надёжности навигационного обеспечения в условиях сложной помеховой обстановки.

Подобные алгоритмы оказываются более помехоустойчивыми и улучшают точностные показатели в сложной помеховой обстановке. Их применение снижает вероятность срыва слежения за сигналами и позволяет сократить время поиска сигналов и входа в синхронизм при кратковременных пропаданиях сигналов, например, из-за затенения или переотражений. Кроме того, эффективность функционирования бортовой АП интегрированной РНС за счёт использования информационной избыточности связана с необходимостью увеличения числа используемых информационных каналов (ИК), а это приводит к росту потребных вычислительных затрат, который в случае использования алгоритмов с совместной первичной обработкой относительно невелик.

Алгоритмы со структурно раздельной первичной обработкой радиосигналов могут быть рекомендованы для использования в бортовой аппаратуре интегрированных РНС, предназначенной для работы в менее сложной помеховой обстановке, когда требуемая точность навигационных определений может быть достигнута при использовании меньшего количества ИК. При этом удастся получить АП, отличающуюся простотой практической реализации при сравнительно невысоких требованиях к вычислительным возможностям.

Список источников

1. Ярлыков М. С. Статистическая теория радионавигации. М.: Радио и связь, 1985. 344 с.
2. Болдин В. А., Зубинский Ю. Г., Зурабов Ю. Т. Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС. М.: ИПРЖР, 1998. 400 с.
3. Радиоэлектронные комплексы навигации, прицеливания и управления вооружением летательных аппаратов : в 2 т. / Под. ред. М. С. Ярлыкова. Москва: Радиотехника, 2012. Т. 1 – 504 с. Т. 2 – 256 с.
4. Ярлыков М. С. Меандровые шумоподобные сигналы (ВОС-сигналы) в новых спутниковых радионавигационных системах // Радиотехника, 2007. № 8. С. 3–12.
5. Аверин С. В., Виноградов А. А., Иванов Н. Е., Салищев В. А. Комбинированное использование систем ГЛОНАСС и GPS на основе адаптивного навигационного алгоритма // Радиотехника, 1998. № 9. С. 53–61.
6. Шебшаевич В. С., Дмитриев П. П., Иваницев Н. В. Сетевые спутниковые радионавигационные системы. 2-е изд. Москва: Радио и связь, 1993. 408 с.
7. Ярлыков М. С., Кудинов А. Т. Анализ субоптимальных алгоритмов обработки сигналов интегрированной аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем ГЛОНАСС и GPS // Радиотехника, 1998, № 10. С. 69–79.
8. Ярлыков М. С. Применение марковской теории нелинейной фильтрации в радиотехнике. Москва: Сов. радио, 1980. 358 с.
9. Ярлыков М. С., Миронов М. А. Марковская теория оценивания случайных процессов. Москва: Радио и связь, 1993. 460 с.
10. Ярлыков М. С., Кудинов А. Т. Повышение качества функционирования аппаратуры потребителей спутниковых радионавигационных систем за счёт использования информационной избыточности // Радиотехника, 1998. № 2. С. 3–11.

References

1. Yarlykov M. S., *Statisticheskaya teoriia radionavigatsii [Statistical theory of radio navigation]*, Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1985, 344 p. (In Russ.)
2. Boldin V. A., Zubinskii Yu. G., Zubarov Yu. T., *Globalnaia sputnikovaia radionavigatsionnaia sistema GLONASS [Global Satellite Radio Navigation System GLONASS]*, Moscow, IPRZHR Publ., 1998, 400 p. (In Russ.)
3. Yarlykov M. S., Bogachev A. S., Merkulov V. I., Drogalin V. V., *Radioelektronnie kompleksi navigatsii, pritselivaniia i upravleniia vooruzheniem letatel'nykh apparatov [Radio-electronic systems for navigation, aiming and control aircraft weapons]*, Moscow, Radiotekhnika Publ., 2012, vol. 1, 504 p., vol. 2, 256 p. (In Russ.)
4. Yarlykov M. S., Meandrovie shumopodobnie signali (VOS-signali) v novih sputnikovih radionavigatsionnykh sistemah, *Radiotekhnika*, 2007, no. 8, pp. 3–12. (In Russ.)
5. Averin S. V., Vinogradov A. A., Ivanov N. E., Salishchev V. A., *Kombinirovannoe ispolzovanie sistem GLONASS i GPS na osnove adaptivnogo navigatsionnogo algoritma Radiotekhnika*, 1998, no. 9, pp. 53–61. (In Russ.)
6. Shabsheovich V. S., Dmitriev P. P., Ivamtsevich N. V., *Setevye sputnikovye radionavigatsionnye sistemy [Network satellite radio navigation systems]*, Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1993, 408 p. (In Russ.)
7. Yarlykov M. S., Kudinov A. T., *Analiz suboptimalnykh algoritmov obrabotki signalov integrirovannoy apparatury potrebitel'ey sputnikovyx radionavigatsionnykh sistem GLONASS i GPS, Radiotekhnika*, 1998, no. 10, pp. 69–79. (In Russ.)
8. Yarlykov M. S., *Primenenie markovskoy teorii nelineinoi filtratsii v radiotekhnike [Applying of the Markov theory of nonlinear filtering in radio engineering]*, Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1980, 358 p. (In Russ.)
9. Yarlykov M. S., Mironov M. A., *Markovskaya teoriya otsenivaniya sluchajnykh protsessov [Markov theory of estimation of stochastic processes]*, Radio i svyaz' Publ., 1993, 460 p. (In Russ.)

10. Yarlykov M. S., Kudinov A. T., Povyshenie kachestva funktsionirovaniya apparatury potrebitelej sputnikovykh radionavigatsionnykh sistem za schet ispolzovaniya informatsionnoj izbytochnosti, *Radiotekhnika*, 1998, no. 2, pp. 3–11. (In Russ.)

Информация об авторах

Болелов Эдуард Анатольевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия, e.bolelov@mstuca.aero

Кудинов Александр Тимофеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия, a.kudinov@mstuca.aero

Шикалов Владислав Николаевич, аспирант, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия, vladshikalov@mail.ru

Прохоров Александр Валентинович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия, a.prokhorov@mstuca.aero

Губерман Игорь Борисович, кандидат технических наук, ведущий специалист, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, guberman1904@mail.ru

Authors information

Bolelov Eduard A., Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia, e.bolelov@mstuca.aero

Kudinov Alexander T., Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia, a.kudinov@mstuca.aero

Shikalov Vladislav N., Graduate Student, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia, vladshikalov@mail.ru

Prokhorov Alexander V., Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Department, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia, a.prokhorov@mstuca.aero

Guberman Igor B., Candidate of Sciences (Engineering), Leading Specialist, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, guberman@mail.ru

Статья поступила в редакцию 27.07.2022; одобрена после рецензирования 14.10.2022; принята к публикации 24.10.2022.

The article was submitted 27.07.2022; approved after reviewing 14.10.2022; accepted for publication 24.10.2022.

Научная статья
УДК 629.7.017.1

НАДЕЖНОСТЬ ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

С. М. МУСИН¹, В. А. КАЛИЙ², А. В. ПЛОТНИКОВ²

¹ Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

² Обособленное конструкторское бюро Уфимского агрегатного производственного объединения,
Москва, Россия

Аннотация. В данной статье рассматриваются проблемы обеспечения надежности программных средств бортового оборудования воздушных судов, оценивается влияние надежности программных средств в составе бортового оборудования на безопасность полетов. На этапе эксплуатации программного обеспечения встроенных бортовых систем воздушных судов осуществляется поддержка программного обеспечения и управление его конфигурацией со стороны разработчика. Объем процесса управления конфигурацией программного обеспечения зависит от его уровня отказных состояний, который был задан при разработке, где наиболее ответственный уровень это, когда отказ программного обеспечения вызывает катастрофическую ситуацию, и наименее ответственный уровень, когда отказ программного обеспечения не влияет на рабочую нагрузку экипажа. Как правило, не выявленная в ходе верификации и валидации на этапе разработки ошибка в программном обеспечении и/или требованиях и/или проекте и/или коде, вызывает в эксплуатации сбой функционирования бортового оборудования, который устраняется путем рестарта программы. Такой сбой классифицируется как самоустраниющийся отказ и имеет признаки перемежающегося отказа. Идентификация и устранение перемежающихся отказов – трудоемкий процесс; как правило, перемежающийся отказ устраняется после его проявления как стабильного отказа. Статья подготовлена по анализу результата импортозамещения бортового оборудования разработки АО «Технодинамика» для самолета SSJ-NEW.

Ключевые слова: программное обеспечение, бортовое оборудование, авиационное оборудование, встроенные системы, сертификация программного обеспечения, надежность программного обеспечения, верификация программного обеспечения, сбой в программном обеспечении

Для цитирования: Мусин С. М., Калий В. А., Плотников А. В. Надежность программных средств бортового оборудования воздушных судов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 40. С. 145–153.

RELIABILITY OF AIRCRAFT ONBOARD EQUIPMENT SOFTWARE

S. M. MUSIN¹, V. A. KALIY², A. V. PLOTNIKOV²

¹ The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia

² Separate Design Bureau of the Ufa Aggregate Production Association, Moscow, Russia

Abstract. In given clause problems of maintenance of reliability of software of the onboard equipment of air courts are considered, influence of reliability of software in structure of the onboard equipment on safety of flights is estimated. The software of the built in onboard systems of air courts at a stage of life cycle operation grows out processes and separate kinds of works inside of processes of definition of requirements to the software,

designing, coding, integration, verification, validation, management of a configuration, support of the software and differ on a level failure conditions from catastrophic up to crew not influencing working loading. As a rule, not revealed during verification and validation a mistake in the software and-or requirements, and-or the project and-or a code causing in operation failure, is eliminated by restart of the program. Such refusal is classified as alternating. Identification and elimination of alternating refusals of processes complex, as a rule, such refusals are eliminated after display of stable refusal. Clause is prepared by results of import substitution of the onboard equipment of development of joint-stock company “Technodinamika” for plane SSJ-NEW.

Keywords: the software, the onboard equipment, the aviation equipment, the built in systems, certification of the software, reliability of the software, verification of the software, failure in the software

For citation: Musin S. M., Kaliy V. A., Plotnikov A. V., Reliability of aircraft onboard equipment software, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 40, pp. 145–153. (In Russ.)

Введение

Уровень функциональных возможностей современного бортового оборудования (БО) воздушных судов (ВС) значительно возрос. Согласно сведениям, содержащимся в материалах докладов [1], функциональные возможности БО за период с конца 1980-х годов по настоящее время увеличились более чем в 10 раз. Данный рост в обеспечении функциональности БО связан с применением при его проектировании современных достижений в области микроэлектроники, цифровых и информационных технологий. В результате чего БО ВС в настоящее время все более принимает очертания сложных цифровых информационно-вычислительных комплексов и систем, функционирующих под управлением микроконтроллеров, программно-аппаратных средств (ПАС), по логике программных средств (ПС).

Особенностью развития БО ВС является постепенное перераспределение сложности построения и функциональных возможностей между двумя его объектами: ПАС и ПС. В основе существующей концепции построения БО на базе интегрированной модульной авионики (ИМА) [2] лежат открытая сетевая архитектура и единая вычислительная платформа (аппаратная составляющая) на базе максимально упрощенных и унифицированных комплектующих изделий. Функции оборудования при этом реализуются в алгоритмах ПС. Отмеченная особенность отчетливо просматривается в перераспределении с течением времени затрат на разработку БО. Перераспределение затрат при создании БО между ПАС и ПС по состоянию на 1980 год и на 2020 год согласно [1] представлено на рис. 1.

Построение БО на базе ИМА, как показано в работе [2], наделяет его значительными преимуществами, однако ведет к определенному перераспределению ответственности в части обеспечения надежности, безопасности и эффективности функционирования между ПС и ПАС.

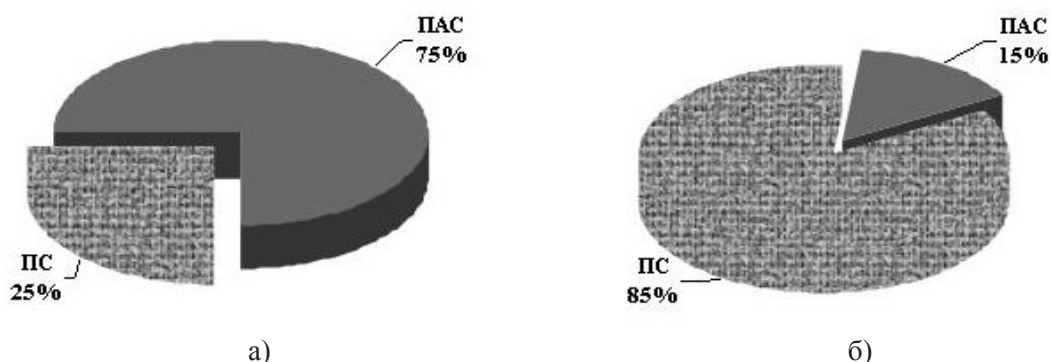


Рис. 1. Перераспределение затрат при создании БО между ПАС и ПС составляющими по состоянию на: декабрь 1980 года – а), декабрь 2020 года – б)

В условиях значительно возрастающей ответственности и стоимости ПС исследование, оценка и контроль характеристик данной составляющей БО ВС являются актуальной задачей.

Важнейшей характеристикой ПС, применяемых в составе БО ВС, является надежность.

«Надежность ПС – совокупность свойств, характеризующая способность ПС сохранять заданный уровень пригодности в заданных условиях в течение заданного интервала времени» (ГОСТ 28806-90 [3]).

Важный смысл в данном стандарте имеют примечания к термину «надежность ПС», которые позволяют определить отличительные особенности ПС от технических устройств. Одной из основных особенностей ПС является отсутствие их износа или старения в процессе жизненного цикла. Другой важной особенностью ПС является то, что их надежность определяется наличием дефектов (ошибок), внесенных в содержание ПС в процессе постановки и решения задачи их создания или модификации.

«Ошибка – это неправильность в требованиях, проекте или непосредственно в коде программы» (ГОСТ Р 51904-2002 [4]).

Исследованиям, относящимся к программному обеспечению специальных средств измерений и информационно-измерительных систем в авиационной деятельности, посвящены работы [5–8]. Однако вопросы, связанные с программными средствами БО ВС, их авторами не рассматривались.

Постановка задачи

Количество и характер отказов БО, являющихся следствием ошибок в ПС, устраняемых путем рестарта программы, зависят от способа хранения программы и от выбираемых вариантов ее функционирования, но не зависят от времени. То есть ошибка в ПС может проявиться только при определенных условиях или в определенном режиме функционирования БО (не зависящих от времени), как следствие вызвать сбой вычислительного процесса, который впоследствии может привести к ситуации отказа БО. Следовательно, основной задачей повышения надежности ПС является обнаружение и устранение ошибок в их составе.

Методика исследования

Анализ исследований и публикаций в области надежности ПС БО ВС показал, что данная область знаний является малоизученной. Публикации в данной области в основном направлены на обнаружение ошибок в ПС на стадии их разработки и отладки. Исследования в области выявления ошибок и обеспечения надежности ПС на стадии эксплуатации ВС практически отсутствуют.

Единичные исследования в области эксплуатационной пригодности ПС, применяемых в составе авиационных комплексов 3-го и 4-го поколений, проведенные в 1980-х и начале 1990-х годов, показали непосредственную связь между качеством ПС и надежностью, безопасностью, эффективностью применения авиационной техники (АТ). Данные исследования проводились на БО, имеющем федеративную архитектуру построения [2] и значительно более простые, по сравнению с современными авиационными комплексами, ПС. Установлено, что эти простые по своему устройству ПС имели значительное количество ошибок, которые негативно влияли как на надежность АТ, так и на безопасность полетов.

Результаты исследования

Объективно невозможно обнаружить все ошибки в ПС на этапах разработки, отладки (верификации) и испытаний (валидации) ВС в связи с отсутствием возможности имитировать на

данных этапах все многообразие условий эксплуатации АТ. Поэтому значительное количество ошибок в ПС можно выявить только на этапе эксплуатации авиационного и радиоэлектронного оборудования ВС. Для примера в таблице представлено количество ошибок в ПС, обнаруженных при проведении исследований на этапе эксплуатации ВС.

Количество ошибок, обнаруженных в составе ПС БО ВС (по материалам АО «Технодинамика»)

Тип воздушного судна/система	Количество обнаруженных ошибок
Boeing 737 MAX/ ЭДСУ (электродистанционная система управления) БРЗУ (блок регулирования, защиты и управления)	96 105
Ту-204/214/ ЭДСУ РЭД-90А (регулятор электронный двигателя) ПЧА (преобразователь напряжения и частоты)	36 25 98
RRJ-95В/ ЭДСУ	15

Анализ влияния ошибок в ПС на надежность БО по материалам ОКБ АО «УАПО» показал, что доля отказов по вине программной составляющей для авиационных комплексов 3-го и 4-го поколений достигала 30 % от общего количества отказов.

Опыт эксплуатации современных авиационных комплексов и систем электроснабжения самолетов Ту-204/214, Airbus 320/321, Boeing 737/747 по материалам АО «Технодинамика» характеризуется наличием ложных отказов БО, доля которых в общем количестве отказов достигает по некоторым системам до 95 %. Отказы авиационного оборудования с ПС характеризуются как ложные, так как они не имеют признаков проявления при последующих проверках оборудования. Причиной до 80 % данных отказов является несовершенство ПС БО, так как ПАС признается исправным при последующих проверках встроенными средствами контроля. В случае отсутствия реального отказа оборудования наиболее вероятно, что формирование ложной индикации о нем также является ошибкой в ПС, отвечающих за встроенный контроль оборудования.

Сбои в виде ошибочных данных в системе предупреждения сваливания MCAS стали причинами катастроф трех самолетов Boeing 737 MAX.

Приведенная статистика имеет тенденцию к увеличению доли отказов вследствие ошибок в ПС на современном более сложном БО, что вполне закономерно при значительно возросшей сложности ПС и свидетельствует о наличии большего количества ошибок в их составе.

Определение достоверной причины подобных отказов является весьма сложной задачей, решение которой при выполнении технического обслуживания ВС по существующей эксплуатационной документации невозможно. Более того, анализ причины отказа и определение конкретной ошибки в ПС требует от осуществляющих техническое обслуживание специалистов иметь компетенции в области тестирования ПС. В результате в существующей системе эксплуатации ВС подобные отказы признаются ложными, их причины не исследуются, а сами отказы практически не учитываются как при оценке надежности БО, так и при разработке мероприятий, направленных на ее повышение. Фактором, способствующим данному обстоятельству, является непригодность существующей системы сбора, обработки и представления информации о надежности АТ, установленной методическими указаниями [6], к учету информации о надежности ПС. Это делает невозможным в принципе сбор сведений об ошибках ПС в процессе эксплуатации, в результате задача поддержания уровня надежности ПС БО ВС в настоящее время практически не решается.

Однако несовершенство системы эксплуатации АТ и сложность определения ошибок в ПС являются не единственными проблемами исследования надежности БО. Анализ требований к встроенному программному обеспечению (ПО) выявил отсутствие показателей, характеризующих надежность и качество ПС, применяемых в составе БО ВС. Это делает невозможным задание, оценку и контроль показателей надежности ПС на всех стадиях жизненного цикла ВС. Эксплуатационная интенсивность отказов программного обеспечения находится на уровне $10^{-6} \cdot \text{час}^{-1}$, при этом сбои программ не учитываются.

Часть ошибок в ПС БО может быть обнаружена только на этапе эксплуатации ВС, в связи с чем ПС требуют обязательного системного сопровождения на данной стадии жизненного цикла ВС.

Требования к системе технического обслуживания разрабатываются поэтапно с применением метода структурирования и последовательной детализации информации о системе. Метод структурирования заключается в последовательном просмотре и анализе требований к системе, связанных с ПО, с целью их классификации и отнесения каждого требования к какой-либо главе требований к ПО. Сложное требование, которое не сопоставляется с одной главой, должно быть разбито на части и каждая такая часть должна быть сопоставлена с определенной главой, но не допускается дублировать идентичные требования (или их части) в разных местах в требованиях к ПО. При повторном упоминании требования к системе или его части в требованиях к ПО необходимо использовать ссылки на те места, где находится первоисточник требования.

На этапе проектирования создаются следующие плановые документы: план управления конфигурацией ПО, указатель конфигурации среды жизненного цикла ПО, указатель конфигурации ПО, план сертификации ПО, итоговое заключение о ПО, план гарантии качества ПО (SQAP), план разработки ПО, стандарты на разработку требований к ПО, стандарты на проектирование ПО, стандарты на кодирование ПО, требования к ПО (Спецификация требований высокого уровня), описание проекта ПО, данные трассировки, план верификации ПО (SVP), примеры и процедуры верификации ПО, результаты верификации ПО. Алгоритм создания требований к ПО представлен на рис. 2.

Разработчик определяет, что отказобезопасность ПО обусловлена следующими процессами:

1. Разработка планов и стандартов (на проектирование ПО, на кодирование ПО, на верификацию ПО).
2. Верификация планов и стандартов (на соответствие производственным стандартам и нормативной базе: ГОСТ 51904-2002 [4], КТ-178С [9], MISRA).
3. Разработка требований к ПО (определение функций ПО, целей и задач ПО).
4. Верификация требований к ПО (на соответствие планам и стандартам).
5. Проектирование ПО (в соответствии с разработанными требованиями).
6. Верификация архитектуры ПО (на соответствие требованиям).
7. Кодирование ПО.
8. Верификация исходного кода (на соответствие требованиям).
9. Интеграция исполняемого кода с аппаратурой целевого вычислителя.
10. Верификация интеграции (тестирование ПО на целевом вычислителе).

Рассмотрев план разработки ПО, можно выделить следующие процессы жизненного цикла ПО:

- 1) Процессы разработки ПО:
 - процесс определения требований к ПО;
 - процесс проектирования ПО;
 - процесс кодирования ПО;
 - процесс интеграции ПО.

2) Интегральные процессы, которые обеспечивают корректную реализацию и качество выполнения процессов разработки:

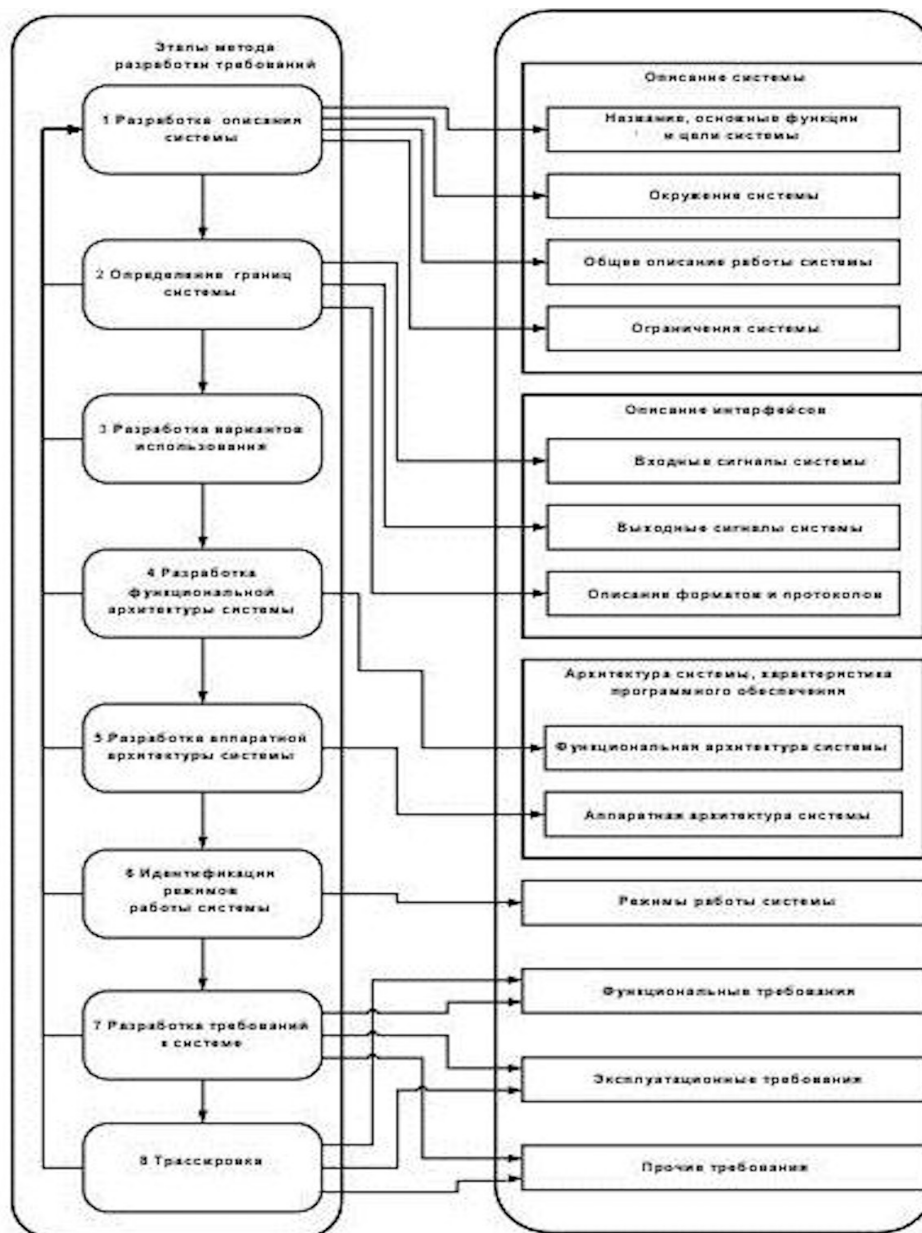


Рис. 2. Алгоритм создания требований к ПО

- процесс верификации ПО;
- процесс управления конфигурацией ПО;
- процесс гарантии качества ПО;
- процесс сертификационного сопровождения ПО.

Реализация всех перечисленных процессов подразумевает многократный контроль на каждом из этапов создания ПО, что в свою очередь должно вести к исключению ошибок в конечном исполняемом коде.

Документы жизненного цикла ПО, относящиеся к эксплуатации, такие как эксплуатационная концепция, руководство поддержки программно-аппаратных средств, руководство оператора ПО, руководство пользователя, в лучшем случае находятся на предприятии-изготовителе ВС и в эксплуатацию не поступают.

В процессе эксплуатации БО появляются дополнительные требования к функционалу или эргономике его агрегатов. Это либо изначально не учтённые требования, либо требования,

возникшие в результате изменения окружения системы в связи с развитием авиационного оборудования. Удовлетворить возникшие в процессе эксплуатации БО требования можно двумя путями: изменением конструкции (электрической схемы) агрегата или изменением ПО. В большинстве случаев именно изменение ПО является предпочтительным. Как правило, при установке новой версии ПО не требуется демонтаж и проведение работ по изменению конструкции (электрической схемы) агрегата. Любое изменение ПО ведется в соответствии с процедурами процесса управления конфигурацией.

При всех перспективных достоинствах систем на основе программно-математического обеспечения, они обладают рядом недостатков, которые проявляются в эксплуатации.

Проблема с разработкой и эксплуатацией ЭДСУ, систем электроснабжения с цифровыми БРЗУ и преобразователями рода электроэнергии ПЧА более глубокая и имеет усугубляющую тенденцию выраженную в увеличении времени простоев ВС при идентификации причин сбоев.

В настоящее время в эксплуатации:

- нет учета ошибок ПО, выражающихся в отказах и повреждениях АТ, следовательно, необходимы мероприятия, направленные на разработку требований к учету и методики учета программных ошибок;

- нет системы хранения и установки ПО, которое по своей сути представляет собой ЗИП – запасной агрегат, блок или инструмент;

- отсутствует система управления конфигурацией ПО;

- отсутствуют авиационные специалисты, способные произвести рестарт ПО с запуском полной проверки ПО с устранением ошибок;

- отсутствует информация о надежности микропроцессорной техники относительно ресурса и срока службы, которая связана с увеличением в процессе эксплуатации пустых ячеек памяти и дальнейшей неспособностью ПО исключить их из функционирования. В результате происходят сбои в работе систем только в определенных режимах, которые могут проявляться три-четыре раза в год. При стечении определенных обстоятельств такие сбои могут стать причиной авиационного события.

Этот перечень недостатков показывает, что представленная информация имеет актуальность и требует углубленного научного и практического анализа с разработкой и реализацией рекомендаций по снижению остроты проблемы и поддержанию заданного уровня безопасности полетов, и первым этапом необходимо ввести в карточки учета неисправностей графы по описанию программных ошибок (отказов).

Заключение

1. Конструктивное совершенство бортовых систем первой категории, имеющих ПО нового поколения, наряду с их значительными преимуществами обладает рядом недостатков, которые требуют повышенного внимания со стороны специально подготовленного эксплуатанта.

2. Авиационная отрасль не имеет модели надежности ПО и методики ее оценки, нет методики оценки эксплуатационной надежности и отказобезопасности ПО и в целом ПАС.

3. Эксплуатация ВС осуществляется в условиях отсутствия количественных нормативных требований к отказобезопасности математического обеспечения авиационного оборудования, осуществляющего безопасное совершение и завершение полета.

4. Разработчики не в полной мере обладают системой управления конфигурацией ПО, что увеличивает риск наличия невыявляемых ошибок, приводящих к отказам и повреждениям оборудования в эксплуатации.

5. До момента времени, когда ПО приобретет свойства защиты от ошибок, вызывающих ложные срабатывания, требуется постоянное авторское сопровождение процесса эксплуатации БО ВС, функционирующего на основе ПС, со стороны разработчика БО.

Список источников

1. Материалы 4 Международной конференции «Перспективные направления развития бортового оборудования гражданских воздушных судов», [сайт] URL: https://aviatp.ru/files/aviaevents-2017/gosniias/07_Danilov.pdf (дата обращения: 12.04.2022).
2. Федосов Е. А., Косьянчук В. В., Сельвесюк Н. И. Интегрированная модульная авионика // Радиоэлектронные технологии. 2015. № 1. С. 66–71.
3. ГОСТ 28806-90. Качество программных средств. Термины и определения. Москва: Госстандарт, 1991. 8 с.
4. ГОСТ Р 51904-2002. Программное обеспечение встроенных систем. Общие требования к разработке и документированию. Москва: Стандартинформ, 2005. 62 с.
5. Богоявленский А. А., Боков А. Е. Аттестация программного обеспечения специальных СИ на воздушном транспорте // Мир измерений. 2012. № 11. С. 14–22. <https://doi.org/10.35400/1813-8667-2012-11-14-22>
6. Богоявленский А. А. Аттестация испытательного оборудования узлов и агрегатов авиационной техники // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 199(1). С. 126–133.
7. Богоявленский А. А., Боков А. Е., Разработка и совершенствование процедур измерений, испытаний и контроля на предприятиях авиационной промышленности и воздушного транспорта // Мир измерений. 2019. № 4. С. 6–9. <https://doi.org/10.35400/1813-8667-2019-4-6-9>
8. Богоявленский А. А., Боков А. Е., Ермолаева О. Л., Матюхин К. Е. О сертификации программного обеспечения средств измерений и информационно-измерительных систем, применяемых в гражданской авиации // Сборник научных трудов ГосНИИ ГА. 2010. № 311. С. 86–90.
9. Межгосударственный Авиационный Комитет. Авиационный Регистр. Квалификационные требования КТ-178С. Требования к программному обеспечению бортовой аппаратуры и систем при сертификации авиационной техники. НИИАО. 2016. 99 с.

References

1. Proceedings of 4th International Conference “Perspective Directions of Development of Onboard Equipment of Civil Aircraft”, available at: https://aviatp.ru/files/aviaevents-2017/gosniias/07_Danilov.pdf (accessed 12.04.2022). (In Russ.)
2. Fedosov E. A., Kosjanchuk V. V., Sel'vesyuk N. I., Integrat Modular Avionics, *Radio electronic Technologies*, 2015, no. 1, pp. 66–71 (In Russ.)
3. GOST 28806-90. Software quality. Terms and definitions. Moscow, Gosstandart Publ., 1991, 8 p. (In Russ.)
4. GOST R 51904-2002. Embedded system software. General requirements for development and documentation, Moscow, Standartinform Publ., 2005, 62 p. (In Russ.)
5. Bogoyavlensky A. A., Bokov A. E., *World of Measurements*, 2012, no. 11, pp. 14–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.35400/1813-8667-2012-11-14-22>
6. Bogoyavlensky A. A., Certification of test equipment for units and assemblies of aviation equipment, *Scientific Bulletin of MSTU CA*, 2014, no. 199(1), pp. 126–133. (In Russ.)
7. Bogoyavlensky A. A., Bokov A. E., *World of measurements*, 2019, no. 4, pp. 6–9. (In Russ.) <https://doi.org/10.35400/1813-8667-2019-4-6-9>
8. Bogoyavlensky A. A., Bokov A. E., Ermolaeva O. L., Matyukhin K. E., On the certification of software for measuring instruments and information-measuring systems used in civil aviation, *Collection of Scientific works of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2010, no. 311, pp. 86–90. (In Russ.)
9. RTCA DO-178C. Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification, RTCA, Inc, 2016.

Информация об авторах

Мусин Сергей Миргасович, доктор технических наук, профессор, главный специалист, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, smusin@tdhc.ru

Калий Валерий Алексеевич, доктор технических наук, главный конструктор, Обособленное конструкторское бюро Уфимского агрегатного производственного объединения, Москва, Россия, vkaliy@tdhc.ru

Плотников Алексей Валерьевич, начальник отдела, Обособленное конструкторское бюро Уфимского агрегатного производственного объединения, Москва, Россия, PlotnikovAV@tdhc.ru

Authors information

Musin Sergey M., Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Chief Specialist, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, smusin@tdhc.ru

Kaliy Valeriy A., Doctor of Sciences (Engineering), Separate Design Bureau of the Ufa Aggregate Production Association, Moscow, Russia, vkaliy@tdhc.ru

Plotnikov Alexey V., Chief of Department, Separate Design Bureau of the Ufa Aggregate Production Association, Moscow, Russia, PlotnikovAV@tdhc.ru

Статья поступила в редакцию 01.08.2022; одобрена после рецензирования 29.09.2022 принята к публикации 10.10.2022..

The article was submitted 01.08.2022; approved after reviewing 29.09.2022; accepted for publication 10.10.2022.

Научная статья

УДК 623.746-519:504.064.37

ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ХИМИЧЕСКОЙ РАЗВЕДКИ ГРУНТА НА ЗАРАЖЕННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

А. В. ВЕЛИКАНОВ¹, А. В. ШИШКИН¹, Ж. Ю. КОЧЕТОВА¹, В. С. ОСИПОВ², Н. А. ДЬЯКОВА³¹ Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия² Научно-исследовательский институт электронной техники, Воронеж, Россия³ Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия

Аннотация. В статье приведены результаты анализа существующих конструкций беспилотных летательных аппаратов, рассмотрена возможность их применения в качестве носителей полезной нагрузки в виде газоанализатора для проведения химической разведки грунта. Обоснована актуальность и экономическая эффективность применения беспилотных комплексов для проведения химической разведки зараженной территории. Проведенный анализ литературных источников свидетельствует об интенсивном развитии робототехнических комплексов воздушного базирования и их применении в различных сферах деятельности. В то же время вопрос использования беспилотных летательных аппаратов в целях химической разведки проработан недостаточно полно. Предложен беспилотный комплекс химической разведки грунта, позволяющий производить дистанционную разведку местности на наличие отравляющих веществ, оснащенный телескопическими опорными стойками для обеспечения горизонтирования и повышения устойчивости беспилотного летательного аппарата при посадке на исследуемую поверхность. Обоснована необходимость оснащения беспилотного комплекса химической разведки грунта газоанализатором с сенсорами пьезосорбционного типа, устойчивыми к вибрации, с малым энергопотреблением и быстрой саморегенерацией.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, газоанализатор, пьезосенсоры, устройство горизонтирования, химическая разведка местности, отравляющие вещества

Для цитирования: Великанов А. В., Шишкин А. В., Кочетова Ж. Ю., Осипов В. С., Дьякова Н. А. Применение беспилотных летательных аппаратов для проведения химической разведки грунта на зараженных территориях // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 40. С. 154–163.

THE USE OF UNMANNED AERIAL VEHICLES FOR CHEMICAL EXPLORATION OF SOIL IN CONTAMINATED AREAS

A. V. VELIKANOV¹, A. V. SHISHKIN¹, ZH. YU. KOCHETOVA¹, V. S. OSIPOV², N. A. DYAKOVA³¹ Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia² Scientific Research Institute of Electronic Technology, Voronezh, Russia³ Voronezh State University, Voronezh, Russia

Abstract. The article presents the results of the analysis of existing unmanned aerial vehicles, determines their suitability for use as payload carriers in the form of a gas analyzer for chemical exploration of the soil.

The relevance and economic efficiency of the use of unmanned complexes of chemical soil exploration during chemical exploration of an infected area is substantiated. The analysis of the literature sources indicates the intensive development of air-based robotic complexes and their application in various fields of activity. At the same time, the issue of using unmanned aerial vehicles for chemical reconnaissance purposes has not been fully worked out. An unmanned complex of chemical soil reconnaissance is proposed, which allows remote reconnaissance of the terrain for the presence of toxic substances, equipped with telescopic support posts to ensure horizontal positioning and increase the stability of an unmanned aerial vehicle when landing on the surface under study. The necessity of equipping an unmanned complex of chemical soil exploration with a gas analyzer with piezosorption-type sensors resistant to vibration, with low energy consumption and rapid self-regeneration is substantiated.

Keywords: unmanned aerial vehicle, gas analyzer, piezosensors, horizontal positioning device, chemical reconnaissance of the area, toxic substances

For citation: Velikanov A. V., Shishkin A. V., Kochetova Zh. Yu., Osipov V. S., Dyakova N. A., The use of unmanned aerial vehicles for chemical exploration of soil in contaminated areas, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 40, pp. 154–163. (In Russ.)

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) обладают высокой эффективностью, что позволяет оперативно выявлять информацию о химическом загрязнении больших территорий и доводить ее до заинтересованных лиц, а также устанавливать границы участков химического заражения местности, незараженных участков, маршрутов (направлений) или участков с наименьшими концентрациями отравляющих веществ (ОВ). Введение термина «Беспилотный комплекс химической разведки грунта» (БКХРГ) обусловлено тем, что общепринятое понятие «комплекс» в технике подразумевает два и более специализированных изделия, не соединенных при производстве сборочными операциями, но предназначенных для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций. Данный термин рекомендован также экспертами Федеральной службы по интеллектуальной собственности Российской Федерации.

Благодаря вмонтированным видеокамерам у БКХРГ есть возможность производить мониторинг развивающейся ситуации на химически зараженных участках, что позволяет оперативно принимать решения по проведению исследовательского мониторинга зараженных участков местности непосредственно у эпицентра, либо прилегающих территорий к месту возникновения чрезвычайных ситуаций. Таким образом, использование комплекса позволяет организовать оперативный дистанционный мониторинг объемных участков местности в режиме реального времени с наименьшими экономическими затратами.

Анализ применяемых технологий ведения воздушной химической и радиационной разведки показал, что в настоящее время имеется целый ряд нерешенных проблем. Органы управления Министерства чрезвычайных ситуаций и воинские подразделения не обеспечены в полной мере оперативной информацией о химической обстановке на участках местности. Это обусловлено тем, что существующая в данный момент система располагает только техническими средствами для ведения воздушно-радиационной разведки местности, а система дистанционной воздушной химической разведки местности практически не реализована.

Используемая в БКХРГ полезная нагрузка может представлять собой газоанализатор, способный определять наличие в воздухе химически опасных ОВ. Существует также вариант полезной нагрузки, оснащенный полупроводниковым сенсором и устройством отбора проб. Однако в настоящее время наличие ОВ в исследуемом объекте выявляют наземными лабораторными комплексами по изменению окраски наполнителя трубок газоанализатора, что позволяет ориентировочно (с погрешностью до $\pm 30\%$) определять концентрацию ОВ.

При этом основным недостатком существующих мониторинговых комплексов является то, что химическое загрязнение местности определяют по содержанию веществ в воздухе около комплекса, тогда как химические токсиканты переносятся воздушными потоками на значительные расстояния и накапливаются в низинах, на поверхности почв, проникают вглубь, отравляя подземные воды, или, напротив, под воздействием определенных природных условий эмитируют из почв, вторично загрязняя воздух [1].

Прорабатывается вопрос использования БКХРГ с целью осуществления дистанционной химической разведки грунта. Проведенный хронометраж показал, что БКХРГ способен осуществить разведку территории гораздо быстрее комплексов ведения химической, биологической и радиационной разведки, смонтированных на базе специальных машин.

Компоновка БКХРГ может быть осуществлена следующим образом. В качестве носителя предлагается использовать БПЛА мультиторторного типа (МРТ), оборудованный видеокамерой, связанной с пультом управления оператора, газоанализатором на основе сенсоров для определения различных типов ОВ, включающим аналитический модуль, модуль связи с оператором, аналитическую камеру, модуль питания газоанализатора, модули для считывания информации и управления питанием газоанализатора (рис. 1).



Рис. 1. Примерный технический облик БКХРГ в компоновке: БПЛА МРТ с видеокамерой, газоанализатором на основе пьезосенсоров с блоком питания, блоком управления и аналитическим модулем

При формировании технического облика газоанализатора в его составе была предусмотрена аналитическая камера с пьезосенсорами, на рабочую поверхность которых нанесены разнородные адсорбирующие материалы, позволяющие определять различные ОВ в грунте. Также для обеспечения автономной работы газоанализатора в его конструкции предусмотрены собственные блоки питания, блок управления и связи, аналитический модуль. Крепление газоанализатора к БПЛА должно обеспечивать плотное прилегание аналитической камеры к исследуемому грунту. С этой целью в конструкции БКХРГ используется устройство спуска и подъема, соединенное с газоанализатором с помощью шарового шарнира, позволяющего прижимать аналитическую камеру открытого типа к исследуемому грунту под различными углами наклона.

Анализ литературных источников показал, что в настоящее время происходит интенсивное развитие перспективных БПЛА МРТ и вертолетного типа, которые могут быть применены при мониторинге участков местности на наличие химических ОБ [2, 3]. В настоящее время не все имеющиеся типы БПЛА можно использовать для ведения радиационно-химической разведки из-за невозможности осуществлять вертикальный взлет и посадку, а также ввиду недостаточной грузоподъемности.

БПЛА для ведения радиационно-химической разведки должны осуществлять вертикальный взлет и посадку, а также иметь достаточную грузоподъемность.

С целью определения параметров функционирования БПЛА МРТ и проведения инженерных расчетов российскими учеными разработаны и внедрены математические модели, программное обеспечение для ЭВМ, методики проведения расчетов количественных показателей [4, 5]. Они позволили определить экономический эффект применения БКХРГ в сравнении с автомобильным транспортом, используемым в настоящее время для этих целей. Расчеты приведенных удельных затрат на осуществление разведки показывают, что БКХРГ в шесть раз эффективнее наземного комплекса при ведении мониторинга химически зараженных участков местности за один эксплуатационный цикл.

При проведении исследований такие вопросы, как метрологическое обеспечение и обеспечение единства измерений на этапах проектирования, производства, испытания и эксплуатации БКХРГ не рассматривались, что соответственно не исключает возникновения метрологических рисков возникновения негативных ситуаций в процессе применения БКХРГ [6]. В последующем, на этапе конструкторских работ по проектированию БКХРГ, следует решить вопросы оценки адекватности математической модели; проработать метрологические аспекты автономного программного обеспечения (АПО), используемого при решении измерительных задач, относящихся к категории косвенных измерений, в том числе расчетов максимальной взлетной массы БКХРГ, необходимой емкости его аккумуляторной батареи, продолжительности полета и других. Параллельно АПО должно будет пройти сертификацию, аттестацию или тестирование как программное обеспечение, применяемое при измерениях [7–9].

В настоящее время в Российской Федерации имеется только одно запатентованное техническое решение по конструкции БКХРГ, принадлежащее авторам статьи [10]. Однако входящий в его состав газоанализатор содержит известные сенсоры пьезосорбционного типа [11].

Таким образом, проведение научных исследований по разработке БКХРГ является актуальной задачей.

Постановка задачи и структурный синтез БКХРГ

Одной из задач при создании технического облика БКХРГ является определение рационального места крепления полезной нагрузки на БПЛА с целью сохранения его тяговых показателей, создаваемых подъемной силой воздушных винтов, и иных заданных характеристик, а также самой полезной нагрузки при взлете и посадке.

Также комплекс необходимо оснастить устройством горизонтирования при посадке, включающим в себя телескопические опорные стойки, оборудованные датчиками контакта с опорной поверхностью места приземления, и устройством выдвижения штоков, позволяющим производить в автоматическом режиме удлинение опорных стоек при посадке на неровную поверхность анализируемого грунта.

При этом в конструкцию газоанализатора могут входить сенсоры пьезосорбционного типа, устойчивые к вибрации и характеризующиеся малым энергопотреблением и быстрой саморегенерацией, а также аналитическая камера открытого типа с заостренными краями для плотного прилегания к грунту при проведении анализа «на месте». Для этого крепление корпуса

газоанализатора к БПЛА должно обеспечивать спуск газоанализатора на поверхность грунта и подъем после проведения анализа.

Предлагаемый БКХРГ состоит из серийно выпускаемого БПЛА МРТ, с присоединенным к нижней части блоком управления и расположенными по краям двигателями с воздушными винтами. Снизу на БПЛА установлены датчик контакта газоанализатора с опорной поверхностью и демпфирующее устройство, на которое крепится телескопическое устройство спуска и подъема, опускающее газоанализатор до тех пор, пока не активируется датчик. Внизу устройства спуска и подъема на шаровом шарнире закреплен корпус газоанализатора, в котором размещены: аналитический модуль; блок питания газоанализатора; модуль связи с оператором; модули считывания информации и управления питанием газоанализатора, объединенные в блоке управления; аналитическая камера, выполненная без дна и с заостренными краями для обеспечения плотного прилегания к грунту. В верхней части аналитической камеры закреплены пьезосенсоры, соединенные с аналитическим модулем. С целью снижения массы полезной нагрузки возможно запитывание газоанализатора электроэнергией от БПЛА и использование его блока управления для снятия данных с аналитического модуля и передачи их оператору. Для обеспечения устойчивости и горизонтирования при посадке БПЛА МРТ оснащается телескопическими опорными стойками, оборудованными датчиками контакта с опорной поверхностью. Схема БКХРГ представлена на рис. 2.

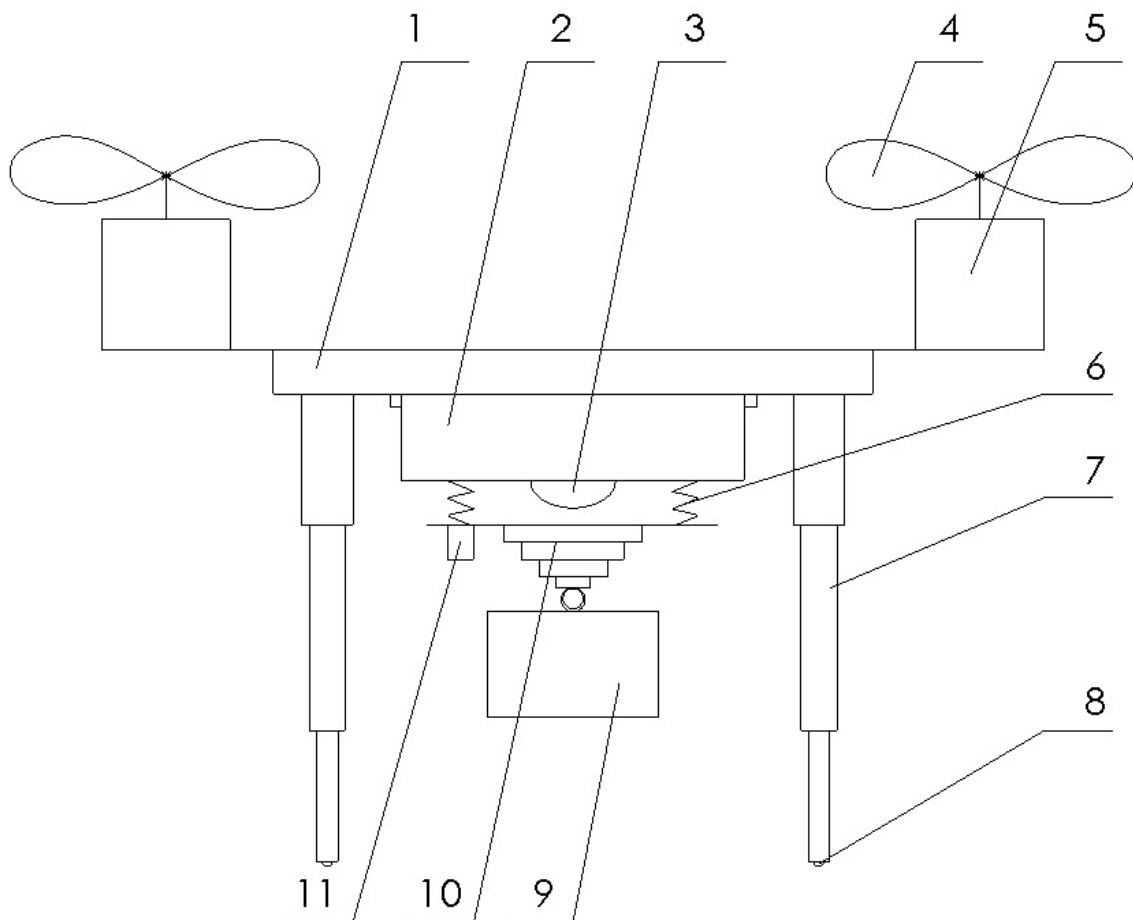


Рис. 2. БКХРГ:

БПЛА МРТ – 1, блок управления – 2, датчик контакта газоанализатора с опорной поверхностью – 3, воздушный винт – 4, двигатель – 5, демпфирующее устройство газоанализатора – 6, телескопические опорные стойки – 7, датчик контакта стойки с опорной поверхностью – 8, газоанализатор – 9, устройство спуска и подъема газоанализатора – 10, видеокамера – 11

Схема телескопической опорной стойки представлена на рис. 3.

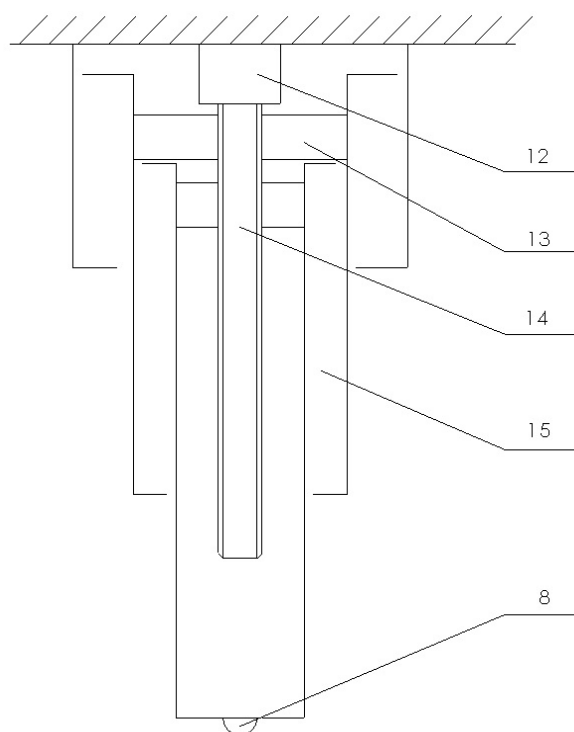


Рис. 3. Телескопическая опорная стойка:
датчик контакта стойки с опорной поверхностью – 8, реверсивный электродвигатель – 12, гайка штоков телескопической опорной стойки – 13, винт выдвижения штоков телескопической опорной стойки – 14, шток телескопической опорной стойки – 15

Схема устройства спуска и подъема газоанализатора представлена на рис. 4.

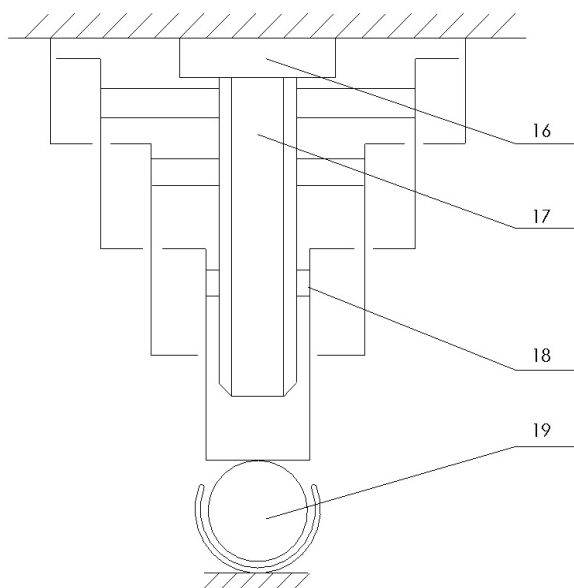


Рис. 4. Устройство спуска и подъема газоанализатора:
реверсивный двигатель выдвижения штоков – 16, винт выдвижения штоков телескопического устройства спуска и подъема газоанализатора – 17, гайка штока устройства спуска и подъема газоанализатора – 18, шаровой шарнир крепления газоанализатора – 19

Схема устройства газоанализатора представлена на рис. 5.

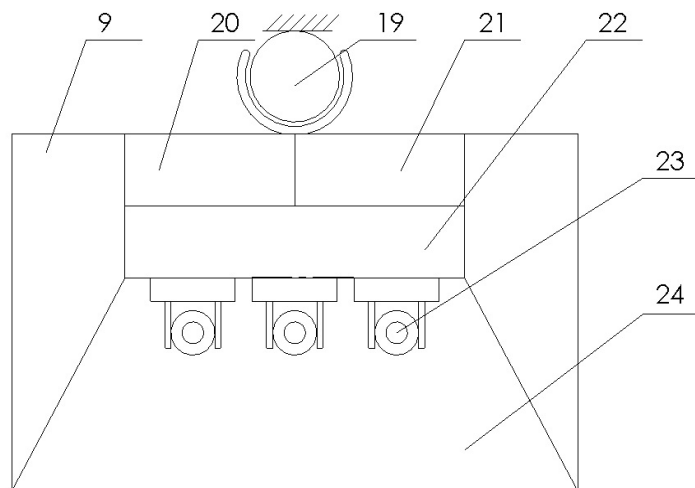


Рис. 5. Устройство газоанализатора:

корпус газоанализатора – 9, шаровой шарнир – 19, блок управления – 20, блок питания – 21, аналитический модуль – 22, пьезосенсоры – 23, аналитическая камера – 24

Подготовка БКХРГ производится следующим образом: оператор производит внешний осмотр устройства (рис. 2, 5), включает пульт управления и БПЛА МРТ 1, проверяет степень заряженности батареи, производит калибровку навигационного оборудования и видеокамеры 11, устанавливает пьезосенсоры 23 в аналитическую камеру 24, включает газоанализатор 9 и проверяет уровень заряженности его аккумулятора, правильность работы сенсоров 23 по их начальной частоте колебания. Далее оператор с помощью устройства 19 прикрепляет корпус газоанализатора 9 к БПЛА, проверяет исправность шарнира 19 и правильность работы устройства спуска и подъема газоанализатора 10. Затем оператор закладывает маршрут полета в систему автоматического управления и отправляет устройство в пункт назначения.

Посадка БКХРГ на исследуемую поверхность производится следующим образом. По прибытии БКХРГ в пункт назначения производится его плавное снижение к исследуемой поверхности под контролем оператора с помощью камеры 11 до срабатывания датчика контакта 8 на одной из опорных стоек 7 (рис. 2). Сформированный датчиком контакта 8 сигнал передается в блок управления 2, который в свою очередь фиксирует высоту, а также формирует и передает сигнал управления на реверсивные электродвигатели 12 (рис. 3) для выдвижения оставшихся телескопических опорных стоек 7 до контакта установленных на них датчиков с опорной поверхностью.

Работа устройства спуска и подъема газоанализатора 10 осуществляется по тому же принципу, что и для телескопических опорных стоек. После посадки БКХРГ оператор дает команду на спуск газоанализатора 9 на исследуемую поверхность, контролируя процесс до момента срабатывания датчика контакта 3. После чего проводится анализ грунта на наличие в нём ОВ путем их адсорбирования на разнородных сорбционных покрытиях пьезосенсорных датчиков 23 (рис. 5). При обнаружении в грунте ОВ происходит изменение частоты колебаний датчиков. Полученная информация в режиме реального времени передается оператору управления для дальнейшей обработки с помощью программного обеспечения, позволяющего визуализировать полученный сигнал в диаграммы [12]. Образец диаграммы хлорсодержащих ОВ показан на рис. 6, а и 6, б.

По площадным параметрам диаграммы при помощи программного обеспечения возможно провести сравнение полученной диаграммы с эталонными отпечатками образцов, таким образом определяется тип ОВ в грунте (рис. 6, а и 6, б) или определяется их отсутствие (рис. 6, в). Также

по площадным параметрам диаграммы можно определить концентрацию ОВ в исследуемой поверхности. Так, при адсорбции хлорсодержащего ОВ площади диаграмм на рисунках 6, б и 6, а разнятся в 1,9 раза, что свидетельствует о концентрации ОВ в анализируемом грунте, равной 0,15 мг/кг.

По команде оператора после завершения исследования грунта БКХРГ производит подъем газоанализатора 9 (рис. 2) и производит перелет на следующий исследуемый участок.

За время перелёта происходит очистка пьезосенсоров и восстановление их первоначальной частоты колебаний, а также осуществляется процесс десорбции под воздействием воздушных потоков и самовосстановления сенсоров, который в обычных условиях не превышает 3 мин.

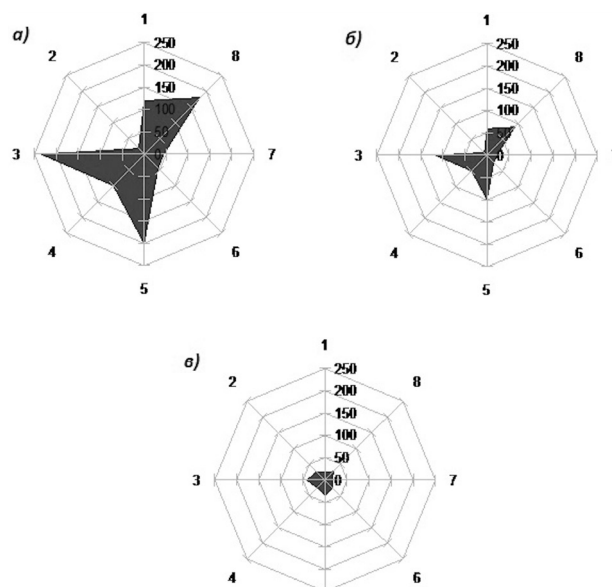


Рис. 6. Пример диаграммы данных, полученных с помощью БКХРГ (расшифровка в тексте)

Изготовление БКХРГ предложенной конструкции возможно из узлов и агрегатов, серийно выпускаемых промышленностью.

Заключение

Результат анализа конструкций имеющихся БПЛА МРТ показал, что их можно применять в качестве носителей предложенной полезной нагрузки в виде газоанализатора, способного определять наличие ОВ в грунте.

Применение беспилотных комплексов для реализации предложенного способа дистанционной воздушной химической разведки грунта зараженной территории является актуальной и экономически эффективной задачей.

Предложенная оригинальная конструкция БКХРГ предусматривает возможность исключения риска воздействия сильнодействующих ОВ на личный состав, повышение эффективности решения задач по оперативности и дальности, уменьшение затрат на проектирование, производство и эксплуатацию комплекса, в отличие от пилотируемых вертолетов, самолетов и специальных машин, сокращение временных показателей на поиски и сбор информации о химическом заражении участков местности и получение более объективных данных.

Для снижения аэродинамического сопротивления встречному воздушному потоку рекомендуется газоанализатору придавать обтекаемую форму или изготавливать в виде цилиндра с диаметром, не допускающим пересечение воздушного потока, создаваемого винтами мультироторного БПЛА.

Список источников

1. Хисматуллина А. Ф., Гасилов В. С., Чижова М. А. Влияние метеорологических условий на распространение токсичных веществ в окружающем пространстве // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. Вып. № 12. С. 152–157.
2. Murray George M. et al., Patent US 20050019218, Polymer based lanthanide luminescent sensors for the detection of organophosphorus compounds, 2005.
3. Бакин Э. Н., Петрикин А. Н., Колесов Д. Г. Применение беспилотных летательных аппаратов вертолетного типа при организации воздушной радиационной и химической разведки // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2017. № 3. С. 7–14.
4. Арзамасцев А. А., Крюков А. А. Математические модели для инженерных расчетов летательных аппаратов мультироторного типа (ч. 1) // Вестник Тамбовского государственного университета. Серия: Естественные и технические науки. 2014. Т. 19. № 6. С. 1821–1828.
5. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019619737 / Л. А. Великанова, С. С. Земцов, А. С. Рыжков, Е. С. Легостаева, Е. А. Лисиченко, В. В. Чернышов, А. В. Яриков // Программы для ЭВМ. Базы данных. ТИМС. № 8. 2019.
6. Богоявленский А. А., Боков А. Е. Постановка задачи разработки методов управления метрологическими рисками негативных ситуаций в авиационной деятельности // Мир измерений. 2013. № 10. С. 3–7. <https://doi.org/10.35400/1813-8667-2013-10-3-7>
7. Богоявленский А. А., Боков А. Е. Аттестация программного обеспечения специальных СИ на воздушном транспорте // Мир измерений. 2012. № 11. С. 14–22. <https://doi.org/10.35400/1813-8667-2012-11-14-22>
8. Богоявленский А. А. Аттестация испытательного оборудования узлов и агрегатов авиационной техники // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 199(1). С. 126–133.
9. Богоявленский А. А., Боков А. Е., Ермолаева О. Л., Матюхин К. Е. О сертификации программного обеспечения средств измерений и информационно-измерительных систем, применяемых в гражданской авиации // Сборник научных трудов ГосНИИ ГА. 2010. Вып. 311. С. 86–90.
10. Пат. РФ № RU 2766308 C1 / А. В. Великанов, Ж. Ю. Кочетова, А. В. Павлович, А. С. Григорян, Д. С. Григорьев, А. В. Шишкин // Изобретения. Полезные модели. 2022. № 8.
11. Пат. РФ № RU 2377558 C2 / В. В. Гришин, С. В. Мензеленко, В. Г. Силаев, В. А. Трофимов // Изобретения. Полезные модели. 2009. № 36.
12. Пат. РФ № RU 2279065 C1 / Т. А. Кучменко // Изобретения. Полезные модели. 2006. № 18.

References

1. Khismatullina A. F., Gasilov V. S., Chizhova M. A., The influence of meteorological conditions on the spread of toxic substances in the surrounding space, *Bulletin of the Technological University*, 2017, vol. 20, no. 12, pp. 152–157. (In Russ.)
2. Murray George M. et al., Patent US 20050019218, Polymer based lanthanide luminescent sensors for the detection of organophosphorus compounds, 2005.
3. Bakin E. N., Petrikin A. N., Kolesov D. G., The use of helicopter-type unmanned aerial vehicles in the organization of aerial radiation and chemical reconnaissance, *Aerospace forces. Theory and practice*, 2017, no. 3, pp. 7–14. (In Russ.)
4. Arzamastsev A. A., Kryukov A. A., Mathematical model for engineering calculations of aircrafts of multi-rotor type (part 1), *Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences*, 2014, vol. 19, no. 6, pp. 1821–1828. (In Russ.)
5. Velikanova L. A., Zemtsov S. S., Ryzhkov A. S., Legostaeva E. S., Lisichenko E. A., Chernyshov V. V., Yarikov A. V., Certificate of registration of the computer program, no. 2019619737, *Computer programs, databases, TIC*, no. 8 (2019). (In Russ.)

6. Bogoyavlensky A. A., Bokov A. E., Statement of the problem of developing metrological risk management methods for negative situations in aviation activity, *The World of Measurements*, 2013, no. 10, pp. 3–7. (In Russ.) <https://doi.org/10.35400/1813-8667-2013-10-3-7>
7. Bogoyavlensky A. A., Bokov A. E., Attestation of special MI software on air transport, *The World of Measurements*, 2012, no. 11, pp. 14–22. (In Russ.) <https://doi.org/10.35400/1813-8667-2012-11-14-22>
8. Bogoyavlensky A. A., Attestation of test equipment of units and assemblies of aviation equipment, *Scientific Bulletin of MSTU CA*, 2014, no. 199(1), pp. 126–133. (In Russ.)
9. Bogoyavlensky A. A., Bokov A. E., Ermolaeva O. L., Matyukhin K. E., On certification of software measuring instruments and information and measuring systems used in civil aviation, *Sbornik nauchnykh trudov GosNII GA*, 2010, no. 311, pp. 86–90. (In Russ.)
10. Velikanov A. V., Kochetova Zh. Yu., Pavlovich A. V., Grigoryan A. S., Grigoriev D. S., Shishkin A. V., Pat. RF no. RU 2766308 C1, *Inventions. Utility models*, 2022, no. 8. (In Russ.)
11. Grishin B. B., Menzelenko S. V., Silaev V. G., Trofimov V. A., Pat. RF no. RU 2377558 C2, *Inventions. Utility models*, 2009, no. 36. (In Russ.)
12. Kuchmenko T. A., Pat. RF no. RU 2279065 C1, *Inventions. Utility models*, 2006, no. 18. (In Russ.)

Информация об авторах

Великанов Алексей Викторович, кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия, Velikanov_AI_V@mail.ru

Шишкин Алексей Викторович, адъюнкт, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия, tehchast55@mail.ru

Кочетова Жанна Юрьевна, доктор географических наук, доцент, доцент кафедры, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Воронеж, Россия, zk_vva@mail.ru

Осипов Вячеслав Сергеевич, ведущий специалист, Научно-исследовательский институт электронной техники, Воронеж, Россия, white_leo@bk.ru

Дьякова Нина Алексеевна, кандидат биологических наук, доцент кафедры, Воронежский государственный университет, Воронеж, Россия, Ninotchka_V89@mail.ru

Authors information

Velikanov Alexey V., Candidate of Sciences (Engineering), Professor, Professor of the Department, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia, Velikanov_AI_V@mail.ru

Shishkin Alexey V., Adjunct, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia, tehchast55@mail.ru

Kochetova Zhanna Yu., Doctor of Sciences (Geography), Associate Professor, Associate Professor of Department, Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin Air Force Academy, Voronezh, Russia, zk_vva@mail.ru

Osipov Vyacheslav S., Leading Specialist, Scientific Research Institute of Electronic Technology, Voronezh, Russia, white_leo@bk.ru

Dyakova Nina A., Candidate of Sciences (Biology), Associate Professor of Department, Voronezh State University, Voronezh, Russia, Ninotchka_V89@mail.ru

Статья поступила в редакцию 07.09.2022; одобрена после рецензирования 20.10.2022 принята к публикации 28.10.2022
The article was submitted 07.09.2022; approved after reviewing 20.10.2022; accepted for publication 28.10.2022.

Научная статья
УДК 004.65

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БЛОКЧЕЙНА В ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА ЛЕТНОЙ ГОДНОСТИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

С. А. ПЕТРУХИН, П. Е. ЧЕРНИКОВ, Г. Е. ГЛУХОВ, В. А. ЕРЕМИН

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. В статье представлено обоснование возможности использования технологии блокчейн в текущей деятельности, исходя из взаимодействия Информационно-аналитического центра ГосНИИ ГА с авиапредприятиями в рамках работы информационно-аналитической системы мониторинга летной годности воздушных судов (ИАС МЛГ ВС). Показаны выгоды, получаемые всеми сторонами, участвующими в информационном обмене, а также возможности распространения этой технологии на смежные сферы авиационной деятельности. Проведен анализ особенностей построения блокчейна ИАС МЛГ ВС с учетом его узкоспециализированной отраслевой направленности и в контексте санкций со стороны недружественных стран. Показано, как ограничения со стороны иностранных IT-компаний могут влиять на возможность построения блокчейна для ИАС МЛГ ВС. Показаны возникающие при этом проблемы, и пути их преодоления. Разработаны принципы построения блокчейна и основные черты архитектуры в условиях ограничений иностранных поставок вычислительной техники и программного обеспечения. Показана необходимость обеспечения независимости создаваемой блокчейн-системы от иностранных технологий.

Ключевые слова: блокчейн, децентрализация, майнинг, алгоритм консенсуса, информационная система, мониторинг летной годности, аутентичность компонентов, единое информационное пространство, компоненты воздушного судна, жизненный цикл

Для цитирования: Петрухин С. А., Черников П. Е., Глухов Г. Е., Еремин В. А. Перспективы использования блокчейна в информационно-аналитической системе мониторинга летной годности воздушных судов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 40. С. 164–172.

PROSPECTS FOR THE USE OF BLOCKCHAIN IN THE INFORMATION AND ANALYTICAL SYSTEM FOR MONITORING THE AIRWORTHINESS OF AIRCRAFT

S. A. PETRUKHIN, P. E. CHERNIKOV, G. E. GLUKHOV, V. A. EREMIN

The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract. The article presents a rationale for the possibility of using blockchain technology in the current activities of the information and analytical center of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation in the light of its interaction with aviation enterprises as part of the work of the information and analytical system for monitoring the airworthiness of aircraft (IAS MLG VS). The benefits received by all parties involved in the information exchange are given, and the possibility of extending this technology to related areas of aviation activity is also indicated. The analysis of the features of building the blockchain of the IAS MLG VS is carried

out, taking into account its highly specialized industry focus and in the context of the current situation of various sanctions from some countries and organizations, which, most likely, will be of a long-term nature. It is shown how restrictions from foreign IT companies directly affect the possibility of building a blockchain for IAS MLG VS, what problems this creates, and ways to overcome them are indicated. The principles of building a blockchain and some important features of the architecture in the face of restrictions on foreign supplies of electronic computers and software have been developed, the importance of the independence of the created blockchain system from foreign technologies is emphasized.

Keywords: blockchain, decentralization, mining, consensus algorithm, information system, airworthiness monitoring, authenticity of aircraft components, common information space, aircraft components, life cycle

For citation: Petrukhin S. A., Chernikov P. E., Glukhov G. E., Eremin V. A., Prospects for the use of blockchain in the information and analytical system for monitoring the airworthiness of aircraft, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 40, pp. 164–172. (In Russ.)

Введение

Разработка прототипа специализированного блокчейна для информационно-аналитической системы мониторинга летной годности воздушных судов (ИАС МЛГ ВС), которая в данный момент находится в начальной стадии, предполагает предварительное рассмотрение некоторых важных концепций, лежащих в основе проектирования этой блокчейн-системы.

Центральным процессом в рамках ИАС МЛГ ВС [1] является проведение работ по оценке аутентичности компонентов воздушных судов (ВС). При проведении таких работ эксплуатанты ВС и уполномоченные эксперты ГосНИИ ГА по оценке аутентичности компонентов ВС осуществляют информационный обмен сведениями об агрегатах и компонентах, также зачастую к оценке аутентичности привлекаются предприятия-изготовители. Информационный обмен в настоящий момент между всеми участниками осуществляется преимущественно одним из следующих трёх способов:

- передача обменных файлов через электронную почту;
- передача обменных файлов посредством электронных носителей (как правило – внешних USB флеш-накопителей памяти);
- передача обменных файлов через специализированный веб-сервис – так называемый сервер обмена [2].

Все эти способы в той или иной степени требуют затрат рабочего времени на подготовку информации, её отправку, последующий анализ, формирование ответа, его обработку, зачастую эти процессы многократно повторяются. Это приводит к значительным расходам рабочего времени на работу с информацией для всех участников обмена. Работа в единой системе передачи и хранения информации могла бы значительно снизить непроизводительные затраты времени участников процесса обмена данными. Самой надёжной системой обмена и хранения информации, риск искажения данных в которой сведён к минимуму, является технология блокчейн [3]. Использование технологии блокчейн в ИАС МЛГ ВС может унифицировать и упростить процессы обмена информацией об агрегатах, снизить непроизводительные затраты на подготовку и пересылку данных, кардинально повысить степень доверия к данным со стороны всех участников процесса информационного обмена.

Преимущества технологии блокчейн для использования в ИАС МЛГ ВС

Кроме организаций, участвующих в оценке аутентичности агрегатов (эксплуатанты, эксперты ГосНИИ ГА и заводы-изготовители), в общей блокчейн-системе потенциально заинтересованы многие организации, которым так или иначе необходимы сведения об авиационных

компонентах, и это прежде всего организации-участники единого информационного пространства (ЕИП) ИАС МЛГ ВС [4].

Общая блокчейн-система даст возможность:

- изготовителям авиационной техники – отслеживать текущее состояние рынка агрегатов, прогнозировать потребности рынка, значительно упростить взаимодействие с экспертами ГосНИИ ГА по вопросам подтверждения аутентичности агрегатов;
- эксплуатантам – значительно упростить отправку сведений об агрегатах и получение результатов оценки аутентичности, исключить многократную пересылку и исправление ошибочных данных (за счет внедренных механизмов валидации данных), получать информацию о подозрительных агрегатах, исключив рискованные траты бюджета;
- предприятиям по техническому обслуживанию и ремонту – получать информацию о количестве агрегатов, для которых приближается плановый ремонт, что позволит лучше планировать свою производственную деятельность;
- поставщикам авиационно-технического имущества и лизинговым компаниям – оперативно реагировать на текущие потребности авиапредприятий и точно прогнозировать будущие потребности;
- государственным органам – моментально получать точную статистику по рынку оборота агрегатов, что позволит установить над ним надежный контроль [5];
- экспертам ГосНИИ ГА – упростить взаимодействие с эксплуатантами и предприятиями-изготовителями.

Перечисленные возможности блокчейна актуальны уже в настоящий момент. В дальнейшем сфера применения блокчейн-системы может быть существенно расширена. Например, назрела задача создания механизма прозрачного обмена агрегатами между авиапредприятиями (рынок продажи/аренды агрегатов), что является особенно актуальным в текущих условиях ограничения поставок запчастей для ВС со стороны иностранных компаний, и в случае наличия действующего блокчейна, содержащего сведения об агрегатах, логично было бы использовать его и для решения этой задачи [6].

Сама идея использования блокчейна в авиационной отрасли отнюдь не нова. Для авиатранспортной отрасли было выявлено несколько вариантов: возможность использования «умных контрактов» для совместного управления данными авиакомпаниями и аэропортами, идентификация личности в аэропортах и т. д. Ряд авиапредприятий успешно применяет технологию блокчейн в своей работе уже в течение нескольких лет, в этой связи стоит отметить успехи авиакомпании S7, которая применяет блокчейн, в частности, для продажи билетов и моментальной оплаты топлива непосредственно при заправке ВС [7–8].

Уже сегодня во многих аэропортах происходит внедрение технологии самообслуживания и самоидентификации личности без контролеров, примером является аэропорт Дубай, в котором обработка багажа пассажиров происходит на основе технологии блокчейн. Это позволяет значительно повысить производительность труда, сократить влияние человеческого фактора и повысить уровень авиационной безопасности [9]. Система FlightChain, которую уже применяют British Airways, аэропорты Хитроу, Женева и Майами, позволяет авиакомпаниям и аэропортам решать вопросы качества данных о статусе рейсов. Система хранит информацию о рейсах в блокчейне, обеспечивая единый достоверный источник данных [10]. Применение технологии блокчейн возможно практически во всех сферах авиационной системы, в которых ведутся и обновляются сложные и критически важные для безопасности полетов записи, например, выдача свидетельств авиационному персоналу, техническое обслуживание ВС, эксплуатационные утверждения или грузовые ведомости [11].

Децентрализация

В блокчейн-системах одно из центральных мест занимает процесс майнинга [12] – создание новых блоков данных участниками сети, который сопровождается получением вознаграждения

за поддержание работы блокчейна. Обычно вознаграждением является некоторая доля информационных ресурсов сети блокчейн (как правило, это криптовалюта). В блокчейне ИАС МЛГ ВС вознаграждением можно считать саму возможность использования блокчейна заинтересованными организациями для информационного обмена. В связи с этим отпадает необходимость процессов создания вознаграждения, его распределения, подтверждения, что может заметно снизить алгоритмическую и программную сложность блокчейна ИАС МЛГ ВС.

При построении блокчейн-систем декларируется принцип децентрализации [13], поскольку справедливо считается, что равноправие участников позволяет свести к минимуму возможность искажения информации, т. к. точная копия данных всего блокчейна есть у каждого участника. Также считается, что увеличение количества участников повышает устойчивость всей блокчейн-системы, т. к. злоумышленникам придется подделывать большое количество копий, хранящихся у всех участников, что технически весьма трудно реализуемо, так называемая «атака 51 %» [14].

На практике же мы наблюдаем постоянное изменение алгоритмов и отдельных параметров работающих блокчейн-систем, что влечет за собой необходимость обновления программного кода узлов участниками блокчейн-системы из единого источника.

Это позволяет утверждать, что хотя сама работа узлов блокчейн децентрализована, тем не менее, необходимость обновления программного обеспечения (ПО) можно рассматривать как некоторое отступление от принципа децентрализации, а также как фактическое управление работой всей блокчейн-системы из единого центра, ведь со сменой алгоритмов меняется и поведение блокчейн-системы в целом, что по сути является ее администрированием [13].

Для блокчейна ИАС МЛГ ВС количество участников (по сравнению с массово используемыми блокчейн-системами, например такими, как Ethereum (Эфириум) будет весьма небольшим. Все они будут являться юридическими лицами, а на этапе первоначального запуска количество узлов для поддержания блокчейна ИАС МЛГ ВС, по-видимому, будет исчисляться единицами.

На начальном этапе внедрения и при последующей эксплуатации блокчейн-системы необходимо будет обеспечить, как минимум, следующие процессы:

- разворачивание стартового опорного узла;
- гарантированное хранение эталонной копии блокчейна;
- администрирование блокчейн-системы;
- разрешение конфликтов в случае возникновения ошибок и сбоев в системе;
- развитие и совершенствование системы;
- координацию взаимодействия различных предприятий в рамках блокчейн-системы;
- управление ключами шифрования (создание и распространение).

Следует особо отметить важность администрирования блокчейна и исправления возможных ошибок и коллизий, от которых не застрахован никто. Даже коммерческие организации – создатели блокчейн-систем, располагающие значительными ресурсами, как вычислительными, так и людскими (математики, программисты и администраторы), привлекавшие на этапе разработки специалистов, имевших значительный опыт работы с блокчейном, и проводившие широко-масштабное тестирование своих систем перед запуском, зачастую сталкиваются с ошибками в работе, устранять которые приходится в «ручном» режиме [15–17].

В условиях сильно выраженной специализации блокчейн-системы ИАС МЛГ ВС, небольшого количества участников и необходимости обеспечения процессов разработки и внедрения важно наличие единого административного центра, которому бы доверяли все участники обмена данными; разумным выглядит отказ от абсолютной децентрализации. Таким ведущим административным центром может выступать ГосНИИ ГА, как наиболее заинтересованная на первоначальном этапе разработки и внедрения специализированного отраслевого блокчейна организация в свете необходимости улучшения процессов передачи и хранения информации для задач оценки аутентичности и мониторинга компонентов ВС в рамках ЕИП ИАС МЛГ ВС.

Минимизация ресурсов

Создание и поддержание работы блокчейн-системы является ресурсоемкой задачей, что в текущих условиях ограничения поставок вычислительной техники создает дефицит вычислительных мощностей, с которым в настоящий момент сталкиваются даже крупные российские компании. По этой причине крайне важно вести проектирование будущей блокчейн-системы с учетом минимизации затрачиваемых ресурсов, как на этапе разработки и внедрения, так и при дальнейшей эксплуатации системы.

Экономия вычислительных мощностей возможна прежде всего за счет минимизации ресурсоемких вычислений:

- минимизация тяжелых вычислительных задач (например шифрации/дешифрации);
- отказ от механизмов вознаграждений майнинга;
- упрощение алгоритма консенсуса (за счет ослабления принципа децентрализации).

Экономное расходование памяти возможно за счет:

- хранения только минимально необходимого набора данных;
- компактного описания хранимых данных;
- использования экономных протоколов обмена данными;
- хранения некоторыми узлами системы неполной копии данных всего блокчейна.

Независимость от иностранных поставщиков

В свете недружественного отношения со стороны ряда ведущих IT-компаний, имеющих иностранную юрисдикцию, в том числе производителей ПО, например таких, как Microsoft, IBM, Oracle, SAP, Apple, Autodesk, Adobe, VMware, прекративших поставки и/или обслуживание уже поставленной продукции, или даже полностью ушедших с рынка Российской Федерации, блокчейн ИАС МЛГ ВС необходимо строить на отечественном или имеющем открытый исходный код ПО. В блокчейне ИАС МЛГ ВС недопустима зависимость от неконтролируемого кода (закрытого кода, исходные тексты которого недоступны), зависимость от обновления каких-либо компонент, имеющих иностранное происхождение, зависимость от иностранных облачных сервисов. Также невозможно использовать готовые блокчейн-платформы, позволяющие развернуть блокчейн на уже работающей специализированной системе по причине тотальной зависимости от иностранного ПО и отсутствия контроля над кодом и данными узлов блокчейн-сети, которые фактически находятся на иностранных облачных ресурсах.

Некоторые общие черты архитектуры

Отказ от принципа полной децентрализации блокчейна ИАС МЛГ ВС влечет за собой необходимость разделения узлов блокчейна на несколько типов. Необходимы опорные узлы, т. е. осуществляющие основные функции по поддержанию работы системы; стандартные узлы в этом случае могут нести существенно меньшую нагрузку и лишь частично участвовать в поддержании работы системы. Логичным шагом выглядит добавление в систему примитивного типа узлов (терминалов), не участвующих в поддержании работы сети, однако позволяющих получить доступ к информации, хранящейся в блокчейне ИАС МЛГ ВС. На базе таких узлов можно строить различные облегченные клиенты, например для таких функций, как простое получение статистики по агрегатам, мониторинг работы системы.

Возможности хранения отдельными узлами частичной копии блокчейна предполагают, что опорные узлы должны хранить полную копию данных; стандартные, в этом случае, могут хранить лишь частичную копию, терминальные могут не хранить никаких данных, обращаясь за ними к опорным и стандартным узлам. Описанный способ разделения узлов на типы

и возможность хранения ими копий различной полноты данных блокчейна позволяет реализовать заявленный авторами принцип минимизации ресурсов, необходимых для работы системы. Введение, помимо опорных узлов, узлов упрощённого типа (стандартных и терминальных) также значительно снизит технические требования для подключения участников к блокчейну ИАС МЛГ ВС и позволит участвовать в информационном обмене предприятиям, не обладающим серьёзной информационной инфраструктурой.

Другим важным моментом при проектировании системы является определение минимального набора данных для хранения в блокчейне и их компактное описание. Блокчейн ИАС МЛГ ВС проектируется в первую очередь для поддержки процессов оценки аутентичности и мониторинга компонентов ВС, поэтому именно идентификационные данные компонентов ВС будут фигурировать в блокчейне чаще всего, как минимум – на первых этапах работы системы. В дальнейшем эти идентификационные данные также будут широко использоваться, т. к. они фактически будут являться ключом для большинства других типов данных в блокчейне. Поэтому при описании идентификационных данных особенно важна компактность в написании и исключение дублирования таких данных. Для этого в системе для идентификации компонентов ВС должно присутствовать два словаря. Первый должен определять абстрактный тип агрегата, второй – конкретный агрегат, что позволит вести более компактную запись данных о компонентах ВС. Также наличие этих двух словарей позволит использовать только ключи в записях о компонентах, что также поможет исключить дублирование информации при описании каждого конкретного компонента. Подобный подход использования словарей логично распространить и на описание всех прочих повторяющихся видов данных в блокчейне ИАС МЛГ ВС для их более компактного описания.

Протоколы передачи символьных данных просты и понятны, они могли бы упростить разработку и отладку блокчейна ИАС МЛГ ВС, однако в общем случае при передаче таких данных трафик возрастает в несколько раз по сравнению с их передачей в бинарном виде. Символьные данные можно сжимать перед отправкой, но это входит в противоречие с принципом минимизации затрачиваемых для функционирования блокчейна вычислительных ресурсов, поэтому для штатной работы блокчейн-системы должно быть отдано предпочтение бинарным протоколам передачи данных. Однако на стадиях разработки, тестирования и внедрения системы допустимо вести передачу в символьном виде. Кроме того, с целью минимизации затрат вычислительных ресурсов, формат данных, передаваемых через двоичные протоколы, и формат данных, хранящихся в блокчейне, должны по возможности совпадать, что позволит снизить или даже полностью избавиться от вычислительных операций, необходимых для конвертирования данных.

Заключение

Показана возможность использования технологии блокчейн как составляющей ИАС МЛГ ВС в процессе подтверждения аутентичности компонентов ВС. Выработаны принципы построения блокчейна ИАС МЛГ ВС и показаны основные черты архитектуры, включая:

- минимизацию вычислительных ресурсов, необходимых для работы системы;
- компактное описание данных с опорой на словари для повторяющихся видов данных;
- преимущественное использование бинарных протоколов информационного обмена;
- хранение и передачу данных в едином формате;
- иерархическое разделение узлов сети блокчейн на различные типы;
- независимость от иностранных технологий и сервисов.

Применение технологии блокчейн позволит вывести авиационную отрасль на более высокий уровень в задачах обеспечения безопасности авиационной деятельности. К примеру, блокчейн может быть использован в качестве виртуального журнала, где будет записываться и храниться вся информация об обслуживании всех агрегатов ВС. А это обеспечит прозрачность жизненного цикла авиационной техники и позволит решить многие проблемы аутентичности компонентов ВС.

Список источников

1. Брусникин В. Ю., Глухов Г. Е., Черников П. Е. Жизненный цикл авиационной техники на этапе эксплуатации в информационно-аналитической системе мониторинга летной годности воздушных судов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2016. № 15. С. 33–39.
2. Еремин В. А., Глухов Г. Е., Петрухин С. А., Шарыпов А. Н., Коньков А. Ю. Модульный подход в разработке информационной системы мониторинга жизненного цикла компонентов воздушных судов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2021. № 35. С. 80–88.
3. Мелани Свон. Блокчейн. Схема новой экономики. Москва: Олимп-Бизнес, 2018. 240 с.
4. Гаранин С. А., Глухов Г. Е., Брусникин В. Ю., Черников П. Е., Карапетян А. Г., Коваль С. В. Об алгоритмах обработки информации при мониторинге жизненного цикла и оценке аутентичности компонентов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2020. № 31. С. 30–40.
5. Шарыпов А. Н., Брусникин В. Ю., Коваль С. В., Коньков А. Ю., Семин А. В., Карапетян А. Г. Особенности оценки аутентичности компонентов вертолётов типа Ми-8/17, эксплуатируемых за рубежом // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2021. № 35. С. 50–58.
6. Черников П. Е., Шарыпов А. Н., Брусникин В. Ю., Глухов Г. Е., Коньков А. Ю., Карапетян А. Г. Формирование эталонной эксплуатационной документации на этапе производства изделий авиационной техники как элемент мониторинга жизненного цикла компонентов воздушного судна // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2020. № 32. С. 65–75.
7. «Газпром нефть» и S7 Airlines переводят авиазаправку на технологию блокчейн. URL: <https://ria.ru/20180824/1527188541.html> (дата обращения: 24.08.2018).
8. Гаранин С. А., Коньков А. Ю., Брусникин В. Ю., Шарыпов А. Н., Коваль С. В. Системы искусственного интеллекта в рамках современных задач гражданской авиации // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 38. С. 84–91.
9. Тюкалов Н. М., Разувакин А. А. Современная концепция цифровой идентификации пассажиров // Научный вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21. № 4. С. 39–47. <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2018-21-4-39-47>
10. FlightChain: 'smart contracts' for shared control of data? URL: <https://www.sita.aero/resources/Whitepapers/flightchain-shared-control-of-data/> (дата обращения: 17.05.2022).
11. ИКАО изучает потенциал технологии «блокчейн» для авиации. URL: <https://avianews.info/ikao-izuchaet-potentsial-tehnologii-blokchejn-dlya-aviatsii/> (дата обращения: 17.05.2022).
12. Александр Табернакулов, Ян Койфманн. Блокчейн на практике. Москва: Альпина Паблишер, 2019. 260 с.
13. Лоран Лелу. Блокчейн от А до Я. М.: Издательство «Эксмо», 2018. 256 с.
14. Нараян Прасти. Блокчейн. Разработка приложений. СПб.: БХВ-Петербург, 2018. 256 с.
15. Криптовбиржи приостановили вывод средств из-за сбоя в сети Ethereum. URL: <https://www.rbc.ru/crypto/news/5fabb4f49a79476351be00cc> (дата обращения: 11.11.2020).
16. Ethereum: разделение на блокчейн Виталика Бутерина. URL: <https://ru.bitcoinethereumnews.com/blockchain/ethereum-split-on-vitalik-buterins-blockchain/> (дата обращения: 11.11.2020).
17. Блокчейн Эфириума столкнулся с массовым сбоем в работе. URL: <https://2bitcoins.ru/blokchejn-eth-perezhil-sboj/> (дата обращения: 13.09.2021).

References

1. Brusnikin V. Yu., Gluhov G. E., Chernikov P. E., The life cycle of aviation equipment at the operational stage in the information and analytical system for monitoring the airworthiness of aircraft, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2016, no. 15, pp. 33–39. (In Russ.)
2. Eremin V. A., Glukhov G. E., Petrukhin S. A., Sharypov A. N., Konkov A. Yu., Modular approach to the development of an information system for monitoring the life cycle of aircraft components, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2021, no. 35, pp. 80–88. (In Russ.)

3. Melani Swan, *Blockchain: Blueprint for a New Economy*, O'Reilly Media, Inc. 2015, 226 p.
4. Garanin S. A., Glukhov G. E., Brusnikin V. Yu., Chernikov P. E., Karapetyan A. G., Koval S. V., About algorithms of information processing in monitoring the life cycle and assessing the authenticity of components, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2020, no. 31, pp. 30–40. (In Russ.)
5. Sharypov A. N., Brusnikin V. Yu., Koval S. V., Konkov A. Yu., Semin A. V., Karapetyan A. G., Features of assessing the authenticity of components of Mi-8/17 helicopters operated abroad, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2021, no. 35. pp. 50–58. (In Russ.)
6. Chernikov P. E., Sharypov A. N., Brusnikin V. Yu., Glukhov G. E., Konkov A. Yu., Karapetyan A. G., Formation of the standard operational documentation at the stage of production of aeronautical products, as an element for monitoring the life cycle of aircraft components, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2020, no. 32, pp. 65–75. (In Russ.)
7. GazpromNeft and S7 Airlines Transfer refueling to blockchain technology, available at: <https://ria.ru/20180824/1527188541.html> (accessed 24.08.2018).
8. Garanin S. A., Kon'kov A. Yu., Brusnikin V. Yu., Sharypov A. N., Koval S. V., Artificial intelligence systems within the framework of modern problems of civil aviation, *Scientific Bulletin of the State Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 38, pp. 84–91. (In Russ.)
9. Tyukalov N. M., Razuvaikin A. A., *Civil Aviation High Technologies*, 2018, vol. 21, no. 4, pp. 39–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2018-21-4-39-47>
10. FlightChain: 'smart contracts' for shared control of data?, available at: <https://www.sita.aero/resources/White-papers/flightchain-shared-control-of-data/> (accessed: 17.05.2022).
11. Blockchain's aviation potential explored at inaugural ICAO-UAE Summit, available at: <https://www.icao.int/Newsroom/Pages/Blockchains-aviation-potential-explored-at-inaugural-ICAO-UAE-Summit.aspx> (accessed: 17.05.2022).
12. Alexander Tabernakulov, Jan Kaufman, *Blokchejn na praktike [Blockchain in practice]*, Moscow, Alpina Publisher, 2019, 259 p. (In Russ.)
13. Laurent Leloup, *Blockchain: La révolution de la confiance*, Paris, Eyrolles, 2017, 226 p. (In Fr.)
14. Narayan Prasty, *Blokchejn. Razrabotka prilozhenij [Blockchain. Application development]*, St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2018, 252 p. (In Russ.)
15. Crypto exchanges suspended the withdrawal of funds due to a failure in the Ethereum network, available at: <https://www.rbc.ru/crypto/news/5fabb4f49a79476351be00cc> (accessed 11.11.2020).
16. Ethereum: split on Vitalik Buterin's blockchain, available at: <https://bitcoinethereumnews.com/blockchain/ethereum-split-on-vitalik-buterins-blockchain/> (accessed: 11.11.2020).
17. The Ethereum Blockchain Has Faced a Massive Malfunction, available at: <https://2bitcoins.ru/blokchejn-eth-perezhil-sboj/> (accessed 13.19.2021).

Информация об авторах

Петрухин Сергей Александрович, старший инженер, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, e-mail: petruhin@mlgvs.ru

Черников Павел Евгеньевич, кандидат технических наук, заместитель начальника отдела, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, chernikov@mlgvs.ru

Глухов Геннадий Евгеньевич, заместитель директора Научного центра, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, glukhov@mlgvs.ru

Еремин Владимир Александрович, ведущий инженер, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, eremin@mlgvs.ru

Authors information

Petrukhin Sergey A., Senior Engineer, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, petruhin@mlgvs.ru

Chernikov Pavel E., Candidate of Sciences (Engineering), Deputy Head of the Department, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, chernikov@mlgvs.ru

Glukhov Gennady E., Deputy Director of Scientific Centre, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, glukhov@mlgvs.ru

Eremin Vladimir A., Lead Engineer, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, eremin@mlgvs.ru

Статья поступила в редакцию 09.08.2022; одобрена после рецензирования 04.10.2022 принята к публикации 13.10.2022.

The article was submitted 09.08.2022; approved after reviewing 04.10.2022; accepted for publication 13.10.2022.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-61476 от 24 апреля 2015 г.

Подписано в печать 11.11.2022

Печать офсетная
20,6 усл. печ. л.

Формат 60x84 1/8
Заказ № 22-28л

14,0 уч.-изд. л.
Тираж 70 экз.

Изготовлено и оформлено: ООО «Типография Миттель Пресс»

e-mail: mittelpress@mail.ru

Автор верстки: Михеева А. В.