

**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 (№ 362)

№ 51

Юбилейный выпуск

**Москва
2025**

ББК 39.5

НЗ4

Научный вестник ГосНИИ ГА

Основан в 1952 году

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

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

Подписной индекс в Интернет-каталоге
«Пресса России» 70663
© ФГУП Государственный НИИ гражданской авиации, 2025

Редакционная коллегия

Главный редактор	– Д. В. Бобылев, канд. техн. наук, ГосНИИ ГА, Москва, Россия
Зам. главного редактора	– В. С. Шапкин, д-р техн. наук, проф., лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, заслуженный работник транспорта Российской Федерации, ГосНИИ ГА, Москва, Россия
Ответственный секретарь	– А. Н. Городишенин, канд. техн. наук, ГосНИИ ГА, Москва, Россия
Зам. ответственного секретаря	– А. В. Кан, канд. техн. наук, ГосНИИ ГА, Москва, Россия

Члены редакционной коллегии

Н. А. Абдужаббаров, канд. техн. наук, Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Республика Узбекистан

Б. С. Алёшин, д-р техн. наук, академик РАН, проф., Национальный исследовательский центр «Институт им. Н. Е. Жуковского», Москва, Россия

Б. Н. Антипов, д-р техн. наук, проф., РГУ нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, Москва, Россия

А. А. Богоявленский, д-р техн. наук, ГосНИИ ГА, Москва, Россия

М. С. Громов, канд. техн. наук, лауреат Премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, заслуженный работник транспорта Российской Федерации, ГосНИИ ГА, Москва, Россия

С. В. Диогенов, канд. воен. наук, ГосНИИ ГА, Москва, Россия

С. Ю. Желтов, д-р техн. наук, академик РАН, ГосНИИАС, Москва, Россия

Е. Е. Карсыбаев, д-р техн. наук, проф., Академия гражданской авиации, Алматы, Республика Казахстан

А. Я. Книвель, канд. техн. наук, НПП «Аэросила», Ступино, Московская обл., Россия

В. Б. Козловский, д-р техн. наук, проф., ПАНХ, Краснодар, Россия

Г. А. Крыжановский, д-р техн. наук, проф., заслуженный работник науки и техники Российской Федерации, СПбГУ ГА, Санкт-Петербург, Россия

Е. А. Куклев, д-р техн. наук, проф., заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, СПбГУ ГА, Санкт-Петербург, Россия

У. Э. Курманов, канд. техн. наук, доц., Кыргызский авиационный институт им. И. Абдраимова, Бишкек, Кыргызская Республика

А. В. Лапаев, д-р техн. наук, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

О. Ф. Машошин, д-р техн. наук, проф., МГТУ ГА, Москва, Россия

А. А. Пухов, д-р техн. наук, Национальный исследовательский центр «Институт им. Н. Е. Жуковского», Москва, Россия

О. Ю. Страдомский, канд. техн. наук, заслуженный работник транспорта Российской Федерации, ГосНИИ ГА, Москва, Россия

К. И. Сыпало, д-р техн. наук, проф., член-корр. РАН, ЦАГИ, Жуковский, Московская обл., Россия

Н. Б. Топоров, д-р техн. наук, Национальный исследовательский центр «Институт им. Н. Е. Жуковского», Москва, Россия

О. Г. Феокистова, д-р техн. наук, доц., МГТУ ГА, Москва, Россия

С. Л. Чернышев, д-р физ.-мат. наук, проф., академик РАН, ЦАГИ, Жуковский, Московская обл., Россия

тел./факс: 8 (495) 490 9500 (*1016)

e-mail: gosniiga@gosniiga.ru

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

Editorial Board

Chief editor	– D. V. Bobylev, Cand. Sci. (Eng.), GosNII GA, Moscow, Russia
Deputy chief editor	– V. S. Shapkin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., GosNII GA, Moscow, Russia
Responsible secretary	– A. N. Gorodishenin, Cand. Sci. (Eng.), GosNII GA, Moscow, Russia
Deputy Responsible secretary	– A. V. Kan, Cand. Sci. (Eng.), GosNII GA, Moscow, Russia

The members of the Editorial Board

N. A. Abduzhabarov, Cand. Sci. (Eng.), Tashkent State Technical University, Tashkent, Republic of Uzbekistan
B. S. Aleshin, Dr. Sci. (Eng.), Academician of the Russian Academy of Sciences, Prof., National Research Center “Zhukovsky Institute”, Moscow, Russia
B. N. Antipov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russia
A. A. Bogoyavlenskiy, Dr. Sci. (Eng.), GosNII GA, Moscow, Russia
M. S. Gromov, Cand. Sci. (Eng.), GosNII GA, Moscow, Russia
S. V. Diogenov, Cand. Sci. (Mil.), GosNII GA, Moscow, Russia
S. Yu. Zheltov, Dr. Sci. (Eng.), Academician of the Russian Academy of Sciences, GosNIIAS, Moscow, Russia
E. E. Karsybaev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Academy of Civil Aviation, Almaty, Republic of Kazakhstan
A. Ya. Knivel, Cand. Sci. (Eng.), Aerosila, Stupino, Moscow region, Russia
V. B. Kozlovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., PANH Helicopters, Krasnodar, Russia
G. A. Kryzhanovskiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof., St. Petersburg State University of Civil Aviation, Saint Petersburg, Russia
E. A. Kuklev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., St. Petersburg State University of Civil Aviation, Saint Petersburg, Russia
U. Eh. Kurmanov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Kyrgyz Aviation Institute named after I. Abdraimov, Bishkek, Kyrgyzstan
A. V. Lapaev, Dr. Sci. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia
O. F. Mashoshin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., MSTU CA, Moscow, Russia
A. A. Pukhov, Dr. Sci. (Eng.), National Research Center “Zhukovsky Institute”, Moscow, Russia
O. Yu. Stradomskiy, Cand. Sci. (Eng.), GosNII GA, Moscow, Russia
K. I. Sypalo, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovsky, Moscow region, Russia
N. B. Toporov, Dr. Sci. (Eng.), National Research Center “Zhukovsky Institute”, Moscow, Russia
O. G. Feoktistova, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., MSTU CA, Moscow, Russia
S. L. Chernyshev, Dr. Sci. (Phys.-Mat.), Prof., Academician of the Russian Academy of Sciences, Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovsky, Moscow region, Russia

tel./fax: 8 (495) 490 9500 (*1016)

e-mail: gosniiga@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

№ 51

2025

СОДЕРЖАНИЕ

Государственному научно-исследовательскому институту гражданской авиации – 95 лет 9

Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники

Приваленко А. Н., Мариничев В. И., Ершов М. А., Шарин Е. А., Махова У. А., Буров Н. О., Ильин А. В. Устойчивое авиационное топливо (SAF). Мировая практика и перспективы внедрения в Российской Федерации 11

Приваленко А. Н., Морозова Н. В., Поплетеев С. И., Горская Н. В. Исследование влияния примесей реагентов химико-технологической защиты оборудования, применяемых при нефтепереработке, на показатели качества авиационного топлива 22

Спрысков В. Б., Шувалова Е. В., Кузнецов С. В. Оценка фактических навигационных параметров точности самолётовождения в зоне ответственности системы обслуживания воздушного движения по информации её системы наблюдения 35

Спрысков В. Б., Шувалова Е. В., Кузнецов С. В., Кормилицына И. Н. Погрешности определения фактического положения воздушного судна и плотность вероятности, оценённая посредством статистической обработки измеренных погрешностей 43

Мусин С. М., Калий В. А., Мисютин Р. Ю., Кондрашов Д. А., Попов Ю. В. Результаты испытаний ветроэнергетической установки авиационной системы электроснабжения 50

Гаспарян Г. А., Чехов И. А., Драченко Е. А. Прогнозирование входящего потока воздушных судов на основе графовых свёрточных сетей 59

Тоиров И. С., Самуленков Ю. И. Управление организационно – технологическими процедурами поддержания лётной годности беспилотных авиационных систем 71

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

Глухов Г. Е. О необходимости гармонизации национального авиационного законодательства с международными стандартами ИКАО: требования и последствия несоответствия .. 83

Савостин Д. С., Попов Д. П., Ковалевский С. А. Эффективность систем управления безопасностью полётов на воздушном транспорте	93
---	----

Горяшко Г. С., Марихин С. В. Анализ применения мультимодального подхода в области управления рабочей нагрузкой членов лётного экипажа	100
--	-----

Интеллектуальные транспортные системы

Автин И. В., Карачин С. В., Лунев Е. М., Худошин В. В. Об особенностях системной архитектуры системы предупреждения столкновения при интеграции беспилотных воздушных судов в воздушное пространство Российской Федерации	110
--	-----

Барсук В. Е., Гласов В. В., Зыбин Е. Ю., Косьянчук В. В., Платошин Г. А., Смирнов Д. Н., Шапкин В. С. Лётные экспериментальные исследования при разработке технологий интеллектуализации бортового оборудования перспективных воздушных судов	122
--	-----

SCIENTIFIC BULLETIN OF THE STATE SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE OF CIVIL AVIATION

No. 51

2025

CONTENTS

The State Scientific Research Institute of Civil Aviation – 95 years 9

Navigation and operation of aircraft

Privalenko A. N., Marinichev V. I., Ershov M. A., Sharin E. A., Mahova U. A., Burov N. O., Ilin A. V. Sustainable Aviation Fuel (SAF). Global practice and prospects of implementation in the Russian Federation 11

Privalenko A. N., Morozova N. V., Popleteev S. I., Gorskaya N. V. Investigation of the effect of additives of chemical and technological protection of equipment used in oil refining on the quality of aviation fuel 22

Spryskov V. B., Shuvalova E. V., Kuznetsov S. V. Assessment of actual navigation parameters of aircraft navigation accuracy in the area of responsibility of the air traffic service system based on information from its surveillance system 35

Spryskov V. B., Shuvalova E. V., Kuznetsov S. V., Kormilitsyna I. N. Errors in determining the actual position of an aircraft and probability density assessed through statistical processing of measured errors 43

Musin S. M., Kaliy V. A., Misyutin R. Yu., Kondrashov D. A., Popov Yu. V. Test results of the wind power plant of the aviation power supply system 50

Gasparyan G. A., Chekhov I. A., Drachenko E. A. Sector entry traffic forecast based on graph convolutional networks 59

Toirov I. S., Samulenkoy Yu. I. Management of organizational and technological procedures for maintaining the airworthiness of unmanned aircraft systems 71

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

Glukhov G. E. Necessity of harmonization of national aviation legislation with ICAO international standards: requirements and consequences of non-compliance 83

Savostin D. S., Popov D. P., Kovalevskii S. A. Effectiveness of safety management systems in air transport	93
---	----

Goryashko G. S., Marikhin S. V. Analysis of the application of a multimodal approach in flight crew workload management	100
--	-----

Intelligent transport systems

Avtin I. V., Karachin S. V., Lunev E. M., Khudoshin V. V. About the features of the system architecture of the collision warning system when integrating unmanned aircraft into the airspace of the Russian Federation	110
---	-----

Barsuk V. E., Glasov V. V., Zybin E. Yu., Kosyanchuk V. V., Platoshin G. A., Smirnov D. N., Shapkin V. S. Flight experimental research in the development of intellectualization technologies for avionics of prospective aircraft	122
---	-----

ГОСУДАРСТВЕННОМУ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМУ ИНСТИТУТУ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ – 95 ЛЕТ

4 октября 2025 года Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации (ГосНИИ ГА), являясь головной научно-исследовательской организацией отечественной гражданской авиации и признанным центром отраслевой науки, отмечает 95-летие со дня своего основания.

Наш Институт традиционно находится на острие научного прогресса в отечественной авиационной отрасли и вносит весомый вклад в развитие гражданской авиационной техники, обеспечение её конкурентоспособности, а также в обеспечение транспортной доступности для населения, в том числе в удалённых и труднодоступных регионах нашей страны.

ГосНИИ ГА под руководством Федерального агентства воздушного транспорта проводит комплекс исследований и разработок в широкой кооперации с эксплуатантами, аэропортами, организациями по техническому обслуживанию, разработчиками и изготовителями авиационной техники, другими НИИ гражданской авиации и авиационной промышленности, сохраняя и приумножая лучшие достижения в области науки, техники и технологий. Всё это способствует гармоничному переходу от новейших прикладных исследований к практическим достижениям.

Свой юбилей ГосНИИ ГА отмечает в условиях беспрецедентного санкционного давления на нашу страну со стороны правительств недружественных государств, что напрямую оказывает влияние на сопровождение эксплуатации воздушных судов иностранных типов. Сегодня ГосНИИ ГА, аккредитованный Росавиацией в качестве Разработчика авиационной техники, совместно с российскими авиакомпаниями решает вопросы поддержания лётной годности иностранных воздушных судов в условиях отсутствия актуализированной информации (бюллетеней и директив).

Успешная работа в этих условиях возможна только при условии наличия специалистов высочайшей квалификации, которых Институт за годы своей деятельности вырастил не одно поколение. В первую очередь это – учёные, лётно-испытательный и инженерный составы.

В настоящее время в ГосНИИ ГА работает около 40 специалистов, имеющих стаж работы в Институте более 50 лет. Придя на работу сразу после студенческой скамьи, окончив один из известных московских вузов (МАИ, МГТУ ГА (ранее МИИГА), МФТИ, МГУ) или другой вуз нашей страны, они, передавая свой опыт и знания, тем самым являются неформальным фундаментом повышения квалификации приходящих в ГосНИИ ГА молодых специалистов.

Самоотверженным трудом многих поколений лётчиков-испытателей, научных, технических и других работников Института дана путёвка в жизнь и обеспечено научное сопровождение эксплуатации всех типов отечественных и некоторых зарубежных гражданских воздушных судов. Можно без преувеличения сказать, что самолёты и вертолёты гражданской авиации, которые эксплуатировались и эксплуатируются сегодня отечественными авиакомпаниями, прошли лётные испытания и подконтрольную эксплуатацию, проводимые Институтом.

ГосНИИ ГА на протяжении всей своей истории, начиная с даты создания, сохраняет статус государственной организации, ныне является многопрофильным центром авиационной науки и, обладая уникальным кадровым потенциалом и развитой экспериментальной базой, продолжает отвечать современным вызовам, прогнозирует и создаёт будущее отечественного воздушного транспорта.

Для решения актуальных задач на базе ГосНИИ ГА функционируют 12 научных центров, обладающих мощным научным потенциалом и соответствующими компетенциями в областях эксплуатации и технического обслуживания воздушных судов, авиационных горюче-смазочных материалов и спецжидкостей, безопасности полётов и авиационной безопасности, поддержания лётной годности, сертификации и стандартизации, навигации и управления воздушным

движением, создания информационных систем, экономики на воздушном транспорте, развития транспортной инфраструктуры, объектов авиатранспортной системы России.

Находясь на вершине взаимодействия воздушного транспорта и авиастроения, ГосНИИ ГА принимает активное участие в разработке научных основ авиатранспортной стратегии и комплексной программы развития гражданской авиации (КПГА) Российской Федерации. Идёт активная работа по формированию долгосрочных прогнозов развития гражданской авиации до 2050 года.

Переход к принципам технологического суверенитета и технологического превосходства российского авиастроения и воздушного транспорта предусматривает возврат к системе научно-технического сопровождения развития авиатранспортной и авиастроительной отраслей как единого механизма реализации транспортных стандартов Российской Федерации, включая подвижность населения и транспортную доступность регионов.

Организация решения данной важной задачи предполагает эффективную и системную работу ГосНИИ ГА в тесном взаимодействии с институтами авиационной промышленности.

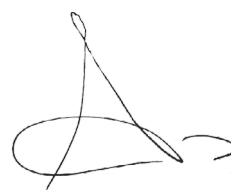
Как известно, наиболее значимые труды работников Института и коллег по авиационной отрасли публикуются в нашем сборнике «Научный вестник ГосНИИ ГА». Сборник издаётся с 1952 года, в разные годы он выходил под разными названиями: «Сборник статей НИИ ГВФ», «Труды НИИ ГВФ СССР», «Труды ГосНИИ ГА», «Сборник научных трудов ГосНИИ ГА», а с 2011 года он носит название «Научный вестник ГосНИИ ГА». Авторы статей – известные учёные отрасли, инженерно-технические работники с многолетним опытом, аспиранты, соискатели, специалисты Института и других организаций авиатранспортного и авиастроительного комплекса России, организаций академической и прикладной науки.

На протяжении многих лет сборник «Научный вестник ГосНИИ ГА» является одним из ведущих печатных изданий отрасли. В юбилейный выпуск сборника включены статьи, в которых представлены результаты исследований ведущих специалистов научных центров ГосНИИ ГА, а также авторов из других организаций, по основным проблемам гражданской авиации и предложены рекомендации по их решению.

От имени руководства ГосНИИ ГА и от себя лично сердечно поздравляю ветеранов и работников Института, коллег и друзей из взаимодействующих организаций с 95-летним юбилеем, с этой очередной яркой вехой в славной истории ГосНИИ ГА – истории, которая ковалась вашим самоотверженным трудом, научными и производственными успехами. Выражаю вам искреннюю признательность за многолетний добросовестный труд, высокий профессионализм и ответственное отношение к делу.

Желаю крепкого здоровья, благополучия, неиссякаемой энергии для реализации задуманного и претворения в жизнь самых смелых идей и планов, достижения ярких побед на благо дальнейшего развития отечественной гражданской авиации.

Генеральный директор ФГУП ГосНИИ ГА,
Главный редактор сборника
«Научный вестник ГосНИИ ГА»,
кандидат технических наук



Д. В. Бобылев

Обзорная статья
УДК 665.753.2

УСТОЙЧИВОЕ АВИАЦИОННОЕ ТОПЛИВО (SAF). МИРОВАЯ ПРАКТИКА И ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

А. Н. ПРИВАЛЕНКО¹, В. И. МАРИНИЧЕВ¹, М. А. ЕРШОВ², Е. А. ШАРИН³, У. А. МАХОВА²,
Н. О. БУРОВ², А. В. ИЛЬИН²

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

² Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, Москва, Россия

³ Институт проблем экологии и эволюции имени А. Н. Северцова РАН, Москва, Россия

Аннотация. В статье рассмотрена мировая практика внедрения систем по снижению выбросов углекислого газа в авиационном секторе и обеспечения углеродно-нейтрального роста под эгидой ИКАО. Показаны механизмы реализации различных программ, направленных на достижение цели по декарбонизации как в техническом, так и в экономическом плане. Представлены сертифицированные технологии производства синтетических компонентов для устойчивого авиационного топлива (SAF) и анализ их перспективности и реализуемости. Проанализированы возможные пути интеграции Российской Федерации в систему по снижению выбросов углекислого газа в авиационном секторе и обеспечения углеродно-нейтрального роста. Обозначен ряд проблемных вопросов, связанных с направлениями сертификации SAF согласно принятым мировым шаблонам. Представлен анализ сырьевых источников производства синтетических компонентов SAF в нашей стране, а также разрабатываемых технологий по их получению.

Ключевые слова: снижение выбросов углекислого газа, устойчивое авиационное топливо (SAF), реактивные двигатели, сертификация, критерии устойчивости, выбросы, технология HEFA, углеродные единицы, воздушное судно, эксплуатация авиационной техники

Для цитирования: Приваленко А. Н., Мариничев В. И., Ершов М. А., Шарин Е. А., Махова У. А., Буров Н. О., Ильин А. В. Устойчивое авиационное топливо (SAF). Мировая практика и перспективы внедрения в Российской Федерации // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 51. С. 11–21.

SUSTAINABLE AVIATION FUEL (SAF). GLOBAL PRACTICE AND PROSPECTS OF IMPLEMENTATION IN THE RUSSIAN FEDERATION

A. N. PRIVALENKO¹, V. I. MARINICHEV¹, M. A. ERSHOV², E. A. SHARIN³, U. A. MAHOVA²,
N. O. BUROV², A. V. ILIN²

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

² Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, Russia

³ Severtsov Institute of Ecology and Evolution Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. The article examines the global practice of implementing systems to reduce carbon dioxide emissions in the aviation sector and ensure carbon-neutral growth under the auspices of ICAO. It shows the mechanisms for implementing various programs aimed at achieving the goal of decarbonization, both technically

and economically. The article presents certified technologies for producing synthetic components for inclusion in sustainable aviation fuel (SAF), analyzing their prospects and feasibility. Possible ways of integrating the Russian Federation into the system of reducing carbon dioxide emissions in the aviation sector and ensuring carbon-neutral growth have been analyzed. A number of problematic issues related to the areas of SAF certification according to the adopted global templates have been identified. An analysis of the raw materials sources for the production of synthetic SAF components in our country, as well as the technologies being developed for their production, has been presented.

Keywords: reduction of carbon dioxide emissions, sustainable aviation fuel (SAF), jet engines, certification, sustainability criteria, emissions, HEFA technology, carbon units, aircraft, operation of aircraft

For citation: Privalenko A. N., Marinichev V. I., Ershov M. A., Sharin E. A., Mahova U. A., Burov N. O., Ilin A. V. Sustainable Aviation Fuel (SAF). Global practice and prospects of implementation in the Russian Federation. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2025, no. 51, pp. 11–21. (In Russ.)

Введение

Под понятием «устойчивое авиационное топливо (Sustainable aviation fuel, SAF)» в мировой практике понимается экологически чистое авиационное топливо, используемое в реактивных двигателях авиационной техники и сертифицированное на соответствие определённым критериям устойчивости [1]. Критерии устойчивости определяются тем, насколько топливо не оказывает негативного влияния на окружающую среду, жизнь и благополучие человечества. Они в целом схожи в разных существующих законодательных нормах, но различаются по степени строгости, например, с точки зрения требований к снижению углеродного следа.

В 2016 году под эгидой Международной организации гражданской авиации (ИКАО) в целях повышения усилий по снижению выбросов углекислого газа в авиационном секторе и обеспечения углеродно-нейтрального роста была принята схема (программа) компенсации и сокращения выбросов углерода для международной авиации (Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, CORSIA) [2].

Мировая практика

Деятельность по снижению выбросов углекислого газа в авиационном секторе ведётся в нескольких направлениях, включая более эффективное использование топлива и стимулирование производства и применения SAF. Схема CORSIA подразделяется на фазы: добровольная пилотная фаза (2021–2023 гг.), первая фаза (2024–2026 гг.) и обязательная вторая фаза (2027–2035 гг.), участие в которой будет принимать весь мир [3]. Существуют исключения для некоторых островных государств и развивающихся стран, а также стран, чьи авиакомпании выполняют незначительное количество международных рейсов (<0,5 % от общемирового объёма). Россия не относится к исключениям.

Согласно данным ИКАО [4] по состоянию на 1 января 2025 года в CORSIA принимают участие 129 стран, а в некоторых странах уже разработаны стратегии по переходу на SAF. В частности, в США в 2021 году анонсировали SAF Grand Challenge, а в 2022 – опубликовали дорожную карту, в рамках которой поставили цель по производству 3 млрд галлонов устойчивого топлива к 2030 г. и 35 млрд галлонов к 2050 г., что, как ожидается, должно полностью удовлетворить спрос на авиационное топливо в стране [5]. SAF Grand Challenge – это добровольная, «рамочная» инициатива без юридически обязательных квот, требований к выпуску топлива и без штрафов. Вместо «кнутов» применяются «пряники»: налоговые кредиты, гранты, гарантии займов и т. п.

В отличие от этой системы обязательное использование SAF предполагается в европейской программе ReFuel Aviation [6]. В соответствии с этой программой, основывающейся на RED III (Renewable Energy Directive III) [7], критерием устойчивости является снижение парниковых выбросов в течение жизненного цикла топлива минимум на 65 %, а в качестве сырья для SAF могут быть использованы только закреплённые директивой RED III «передовые» типы сырья. Одобрённое программой сырьё ограничено следующими типами: отработанные пищевые масла и непригодный животный жир, сырое талловое масло, талловый пек, сырой глицерин, шелуха и прочая сельскохозяйственная биомасса, древесные остатки и опилки, картон, микроводоросли, пластиковые и бытовые отходы, а также уловленный из атмосферы углекислый газ. Целевые показатели по ReFuel Aviation формулируются по доле SAF и е-топлив, т. е. топлив, полученных путём синтеза Фишера-Тропша из зелёного водорода и уловленного CO₂, в общем балансе топлив для реактивных двигателей (табл. 1). Первой цели в 2 % ЕС собирается достичь уже в 2025 году.

Таблица 1

Целевые показатели по ReFuel Aviation

Доля в общем объёме потребляемых авиатоплив, %	Годы ввода мандата					
	2025	2030–2034	2035	2040	2045	2050
SAF	2	6	20	34	42	70
е-топливо	–	0,7–2,0	5	10	15	35

CORSIA устанавливает следующую цель: компенсировать рост выбросов CO₂ от международного авиационного сектора относительно базовой линии, за которую принято 85 % от выбросов 2019 года (эквивалентно примерно 500 млн т CO₂). Каждый год, исходя из полученной от правительств стран мира информации о фактических значениях выбросов, ИКАО рассчитывает коэффициент роста выбросов CO₂ по авиаотрасли, который далее применяется к выбросам каждой авиакомпании в странах, участвующих в CORSIA. Таким образом, даже если выбросы авиакомпании относительно 2019 года не изменились, её компенсационные обязательства будут рассчитаны исходя из общемирового роста, а эксплуатант воздушного судна должен компенсировать «избыточные» выбросы. Компенсация возможна:

- путём приобретения углеродных единиц¹; углеродные единицы, приемлемые для выполнения обязательств по CORSIA, должны быть выпущены в утверждённых ИКАО системах и при условии соблюдения ряда требований к проектам, в которых такие единицы выпускаются;
- за счёт использования топлив с уменьшенным углеродным следом – SAF или LCAF (Lower-Carbon Aviation Fuel, обычное нефтяное авиационное топливо, но с пониженным за счёт уменьшения выбросов в жизненном цикле, при добыче сырья, переработке, транспортировке углеродным следом).

К категории SAF CORSIA относит топливо, использование которого снижает выбросы в течение жизненного цикла минимум на 10 % относительно среднемирового значения углеродоемкости (89 г CO₂-экв./МДж) и которое не производится из биомассы, выращенной на землях с высоким биоразнообразием. Производство SAF не должно ухудшать качество воды, почвы, биоразнообразия экосистем, оказывать существенного негативного влияния на воздух, оно должно способствовать социально-экономическому развитию регионов и обеспечивать

¹ 1 углеродная единица – объём парниковых газов, эквивалентный одной тонне CO₂. Купить углеродные единицы можно на товарных биржах или напрямую у исполнителей климатических проектов, на счета которых в реестре углеродных единиц зачислены верифицированные результаты реализации климатических проектов. Реестр углеродных единиц – информационная система, в которой регистрируют климатические проекты и ведут учёт этих единиц и операций с ними. В России обращение углеродных единиц регулируется Федеральным законом от 2 июня 2021 года № 296-ФЗ «Об ограничении выбросов парниковых газов», реестр углеродных единиц ведётся с 1 сентября 2022 года.

их продовольственную безопасность. Также при производстве должны соблюдаться различные права человека, в том числе трудовые права и права на земле- и водопользование. В CORSIA установлены менее строгие требования к сырью по сравнению с ReFuelAviation, и его природа не ограничена ничем, кроме вышеупомянутых критериев устойчивости. В соответствующих документах приводятся рассчитанные значения углеродоемкости разных типов сырья, но список сырья может быть расширен и дополнен по утверждённому в CORSIA механизму.

Ещё один важный аспект – принципиальная возможность производства топлива из определённого типа сырья по разработанным технологиям. В настоящее время технологии производства и свойства синтетических топлив (синтетическими топливами в данной статье будем называть все топлива, получаемые из альтернативного сырья) регулируются в основном документами ASTM D1655 [8], в котором закреплены подходы к совместной переработке нефтяного и альтернативного сырья, и ASTM D7566 [9], в котором описаны свойства полностью синтетических компонентов, пределы их процентного содержания в нефтяном топливе и требования к такому топливу. На данный момент разработаны и сертифицированы 11 технологий получения синтетического керосина². Информация о них приведена в табл. 2, также указан их уровень технологической готовности³ (TRL).

Таблица 2

Сертифицированные технологии получения синтетических компонентов

Технология	Продукт и процесс	Тип сырья	Максимальный % содержания в топливе	TRL
FT-SPK	Синтетический парафиновый керосин, процесс Фишера-Тропша	Твёрдая биомасса (твёрдые бытовые отходы, лигноцеллюлозная биомасса)	50	7–8
FT-SKA	Синтетический парафиновый керосин с ароматическими соединениями, алкилирование лёгких ароматических соединений не нефтяного происхождения	Твёрдая биомасса (твёрдые бытовые отходы, лигноцеллюлозная биомасса)	50	6–7
HEFA-SPK	Синтетический парафиновый керосин, гидропереработка жирных кислот и их эфиров	Жиродержащие отходы, остатки, побочные продукты, в т. ч. отработанное кулинарное масло, животный жир; энергетические масличные культуры	50	9
HC-HEFA-SPK	Синтетический парафиновый керосин, гидропереработка жирных кислот и их эфиров, углеводов растительного происхождения	Микроводоросли	10	5
CHJ	Синтетический керосин, метод каталитического гидро-термолиза	Жиродержащие отходы, остатки, побочные продукты, в т. ч. отработанное кулинарное масло, животный жир; энергетические масличные культуры	50	5–6

² Термин, используемый в документах [8, 9] в широком смысле для всех не нефтяных топлив.

³ Уровни технологической готовности оценивают зрелость технологии на этапах её концептуализации, разработки и применения по шкале от одного до девяти. Один балл – самый низкий уровень, девять – самый высокий.

Окончание таблицы 2

Технология	Продукт и процесс	Тип сырья	Максимальный % содержания в топливе	TRL
SIP	Синтетический изопарафиновый керосин, гидрогенолиз ферментированных сахаров	Сахаросодержащее сырьё	10	5–6
ATJ-SPK	Синтетический парафиновый керосин, процесс «спирт в топливо»	Сахаро- или крахмалосодержащее сырьё, лигноцеллюлозная биомасса	50	7–8
ATJ-SKA	Синтетический парафиновый керосин с ароматическими соединениями, процесс «спирт в топливо»	Сахаро- или крахмалосодержащее сырьё, лигноцеллюлозная биомасса	50	6–7
Co-processing Oil	Совместная переработка жирных кислот и эфиров и ископаемого сырья	Жиросодержащие отходы, остатки, побочные продукты, в т. ч. отработанное кулинарное масло, животный жир; энергетические масличные культуры	5	9
Co-processing FT	Совместная переработка сырья из отходов методом Фишера-Тропша и ископаемого сырья	Твёрдая биомасса (твёрдые бытовые отходы, лигноцеллюлозная биомасса)	5	7–8
Co-processed HEFA	Совместная переработка углеводов, полученных гидрогенизацией жирных кислот и эфиров	Гидрообработанные жирные кислоты и эфиры	10	9

Каждая из одобренных технологий представляет собой определённую химико-технологическую цепочку с использованием различного сырья (твёрдые отходы, жиры и масла, энергетические культуры, спирты и др.). Следует отметить, что ASTM⁴ удостоверяет только технологию и качество топлива, но никак не регулирует устойчивость, то есть экологичность топлива. Описание технологии в ASTM D1655 и D7566 не гарантирует получение топлива, которое будет сертифицировано как устойчивое.

Синтетические керосины по своему химическому составу очень похожи на традиционное нефтяное авиационное топливо, но могут отличаться по соотношению различных углеводородных групп в зависимости от технологии.

В соответствии с международными требованиями для оценки и возможности использования синтетического компонента, выпускаемого по новой технологии, необходимо провести его исследование в соответствии со стандартом ASTM D4054 [10].

В соответствии с данным стандартом существуют два пути сертификации: обычный и ускоренный. Процесс сертификации представляет собой комплекс испытаний и процедур в соответствии с программой ASTM D4054 и состоит из трёх основных этапов: первоначальный скрининг, в результате которого определяются базовые свойства нового типа топлива – технические характеристики топлива и характеристики назначения; тестирование нового топлива на стендах и компонентах топливной системы и на реальном двигателе; голосование участников технического комитета и утверждение для внесения изменений в нормативную документацию ASTM. Ускоренный путь позволяет сократить продолжительность и снизить стоимость процесса

⁴ American Society for Testing and Materials – Американское общество испытаний и материалов.

сертификации. Химический состав нового компонента при этом должен иметь сходство с уже допущенными компонентами или с традиционным реактивным топливом. Доля компонента, проходящего процесс утверждения по ускоренной процедуре, ограничивается в смеси на уровне 10 %. После прохождения сертификации компонент вносится в два основополагающих стандарта: ASTM D1655 и ASTM D7566. Таким образом, готовый синтетический компонент должен удовлетворять требованиям обоих стандартов.

Несколько различных технологических процессов находятся в стадии сертификации (рис. 1 и рис. 2). Их успешная сертификация позволит как расширить перечень сырья для переработки, так и добиться большего разнообразия в углеводородном составе синтетических керосинов.

Из всех технологий наибольший потенциал имеет гидрообработка эфиров и жирных кислот (HEFA), как развитая и наиболее дешёвая, потенциальные мощности которой в мире могут производить порядка 85 млн тонн в год при снижении выбросов парниковых газов на 60–85 % относительно нефтяного топлива. Именно эта технология уже выведена на коммерческий уровень, ожидается её доминирование на рынке в ближайшей перспективе. Серьёзный недостаток этой технологии – ограниченные ресурсы устойчивого сырья. Соответствующие регулирующие органы во всём мире строго следят за тем, чтобы не допустить переориентацию пищевых и кормовых масел на энергетические ресурсы. Соответственно, к устойчивому масложировому сырью относятся отходы: отработанные кулинарные масла, животные жиры и др., количество которых очевидно ограничено.



Рис. 1. Разрабатываемые технологии производства синтетического компонента из липидов (рисунок основан на [11, с. 110])



Рис. 2. Разрабатываемые технологии производства синтетического компонента из лигноцеллюлозы, спиртов и сахаров (рисунок основан на [11, с. 110])

Другие технологии (FT и ATJ) обладают большей по сравнению с HEFA капиталоемкостью и технологической сложностью переработки, хотя для их реализации потенциальные объёмы устойчивого сырья значительно выше, чем у масел (порядка 400 млн тонн в год). Достижимое при этом снижение выбросов – до 90 %.

Все разработанные технологии позволяют получать только компонент авиационного топлива, который далее смешивается с традиционным авиационным топливом Jet A-1. Использование полностью синтетического керосина практически невозможно, так как его технические характеристики отличаются от характеристик традиционного нефтяного топлива. Это определяется сырьём и технологиями получения синтетических компонентов. Единственным исключением является синтетический керосин Sasol, возможность использования которого в 100 % виде закреплена в спецификации Министерства обороны Великобритании на топливо Jet A-1 (один из ключевых мировых документов, по которому выпускают авиатопливо в ЕС и во многих странах мира) Def Stan 91-091.

Перспективы внедрения SAF в Российской Федерации

Согласно данным ИКАО в 2023 году выбросы от международных рейсов, вылетающих с территории Российской Федерации, составили около 4,1 млн т CO₂, что эквивалентно сжиганию 1,3 млн т авиационного топлива. По прогнозу, приведённому в периодическом обзоре CORSIA за 2025 год, во второй фазе действия схемы (2027–2029 гг.) коэффициент роста выбросов CO₂ по авиаотрасли ожидается на уровне 23 %. При сохранении текущих объёмов перевозок это даёт оценку компенсационных обязательств, возникающих в обязательной фазе за трёхлетний период, на уровне 943 тыс. углеродных единиц в год. Для их покрытия потребуется порядка 3 млн т LCAF или 353 тыс. т SAF, произведённого на основе использованных кулинарных масел. При этом в данном расчёте учитывается потребность в авиационном топливе только внутри России на заправку самолётов для перелётов из России в другие страны. При расчётах компенсационных обязательств российских авиакомпаний нужно будет учитывать необходимость заправки таким топливом в зарубежном аэропорту вылета.

Действительный объём спроса на альтернативные виды топлива (LCAF/SAF) в дальнейшем будет определяться стоимостью углеродных единиц, доступных авиаперевозчикам для исполнения компенсационных обязательств.

Налаживание промышленного производства LCAF и SAF к 2027 году в России в требуемых объёмах авторам статьи представляется затруднительным ввиду отсутствия национальной системы сертификации и технологического допуска подобных топлив, в нашей стране ещё только ведутся разработки в данной сфере. Потенциальные производственные мощности по SAF к 2030 году могут составить до 150 тыс. т. при использовании наиболее доступных технологий и лёгкого в переработке масляного сырья. В свою очередь производство LCAF требует меньших капитальных вложений, а его основным ограничением выступает отсутствие сертификации, вследствие чего по оценке авторов статьи прогнозируемый объём к 2030 году может достигать 500 тыс. т.

Наиболее перспективными типами сырья для производства SAF в нашей стране являются жиродержащие отходы, а именно отработанное кулинарное масло, животные технические жиры, сырое талловое масло (табл. 3). Данное сырьё удовлетворяет самым строгим требованиям к устойчивости и имеет достаточно большой потенциал производства и сбора в России. Так, текущий сбор отработанного кулинарного масла составляет порядка 40–50 тыс. т/год, а выработка технических животных жиров – до 60 тыс. т/год. Большая часть данного сырья экспортируется в ЕС и может быть переориентирована на внутренний рынок для производства биотоплив. Объём производства талловых масел значительно выше – около 195 тыс. т/год, однако только 40–50 % данного сырья может быть конвертировано в целевой компонент SAF. На данный момент только

половина производимого таллового масла перерабатывается, оставшаяся часть уходит на экспорт в Китай и ЕС, в том числе для производства биотоплив.

Таблица 3

Сырьё для производства SAF в Российской Федерации

Вид сырья	Примеры допустимого сырья	Годовой объём производства/сбора в РФ в 2022 г.
Масложировое сырьё	Подсолнечное масло*	6,0 млн т
	Соевое масло*	0,8 млн т
	Рапсовое масло*	1,0 млн т
	Отработанные кулинарные масла и жир	47,8 тыс. т
	Талловые масла	84,2 тыс. т
	Биомасса из водорослей	—
Лигноцеллюлозная биомасса	Отходы деревообрабатывающей промышленности: опилки, стружка, кора и др.	2,3 млн т
	Агропромышленные отходы: солома, стебли, шелуха, скорлупа и др.	3,1 млн. т

**Растительные масла не признаны устойчивыми по RED II, но соответствуют критериям устойчивости программы CORSIA.*

Перспективными по объёмам производства, но менее применимыми с технологической стороны являются лигноцеллюлозные отходы производства древесины и растительных масел. Объём производства древесных опилок и лузги (в форме пеллет) составляет примерно 2,3 и 3,1 млн т/год соответственно. Данное сырьё является наиболее низкоуглеродным и соответствует всем критериям устойчивости, однако на данный момент нет экономически обоснованных способов его переработки в SAF.

Пищевые растительные масла: подсолнечное, соевое, рапсовое по устойчивости не соответствуют требованиям ReFuel Aviation, но удовлетворяют программе CORSIA – до 2035 года в соответствии с текущей редакцией данной программы можно будет использовать растительные масла в качестве сырья SAF. Рынок масел в РФ сильно профицитен, при объёме производства около 10,8 млн т на экспорт отправляется примерно 8,5 млн т (около 80 %).

Нефтеперерабатывающими компаниями в РФ проводятся работы по адаптации к требованиям CORSIA и ReFuel Aviation, оцениваются риски и возможности по производству как SAF и его отдельных компонентов, так и совместной переработки сырья SAF с традиционным нефтяным сырьём. Однако необходимо преодолеть ряд законодательных и технологических барьеров для того, чтобы производство не только воплотилось в реальность, но и было признано на международном уровне.

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина совместно с ФГУП ГосНИИ ГА в процессе разработки новой редакции ГОСТ 10227 готовят введение положений о применении SAF компонентов в составе топлив для реактивных двигателей в нашей стране. Отдельно идёт работа по разработке предстандарта на синтетический компонент авиационного топлива.

Крайне важным аспектом остаётся доступ российских компаний к международным, признаваемым CORSIA рынкам углеродных единиц с возможностью для авиакомпаний использовать именно российские углеродные единицы для зачёта своих обязательств. Это позволит авиакомпаниям покупать углеродные единицы на российском рынке, тем самым стимулируя деятельность по разработке и внедрению климатических проектов, исполнители которых получают углеродные единицы. Таким образом, если производство SAF потребует проведения

широкого круга исследований, технического допуска, сертификации углеродного следа, то система CORSIA могла бы уже сейчас лечь в основу финансирования деятельности по снижению выбросов в России.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Критерии устойчивости CORSIA для топлива, отвечающего требованиям CORSIA. ИКАО, 2025. 12 с.
2. ИКАО. Резолюция А39-3: Сводное заявление о постоянной политике и практике ИКАО в области охраны окружающей среды. Глобальная система рыночных мер (PM) рыночных мер (PM). ИКАО, 2016. 8 с.
3. Приложение 16 к Конвенции о международной гражданской авиации. Охрана окружающей среды. Том IV. Система компенсации и сокращения выбросов углерода для международной авиации (CORSIA). 2-е изд. ИКАО, 2024. 128 с. URL: <https://аэростандарт.рф/ru/icao/book/аннекс-16-т-4-охрана-окружающей-среды-том-iv-система-компенсации-и-сокращения-выбросов-ру-конс> (дата обращения: 15.08.2025).
4. CORSIA: пары государств, указанных в главе 3. 5-е изд., перераб. ИКАО, 2024, 4 р.
5. Основные принципы реализации дорожной карты по устойчивому использованию авиационного топлива. Вашингтон, округ Колумбия: Министерство энергетики США. 2024. 72 с.
6. Regulation (EU) 2023/2405 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 on ensuring a level playing field for sustainable air transport (ReFuelEU Aviation Regulation). *Official Journal of the European Union*, 31.10.2023, 45 p.
7. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (RED II), as amended by Directive (EU) 2023/2413 (RED III). *Official Journal of the European Union*, 31.10.2023, 56 p.
8. Международный стандарт ASTM D1655-24a. Стандартная спецификация на топливо для авиационных турбин. ASTM International, 2024. 23 с.
9. Международный стандарт ASTM D7566-24a. Стандартная спецификация на топливо для авиационных турбин, содержащее синтезированные углеводороды. ASTM International, 2024. 41 с.
10. Международный стандарт ASTM D4054-24a. Стандартная практика оценки новых видов топлива для авиационных турбин и присадок к топливу. ASTM International, 2024. 49 с.
11. Ершов М. А., Савеленко В. Д., Махова У. А., Буров Н. О. SAF: новые возможности для России или новые проблемы? // Нефтегазовая вертикаль. 2022. № 4. С. 102–113. URL: <https://www.ngv.ru/upload/iblock/4d7/4d70abadb47a6148e6711a384b5e9388.pdf> (дата обращения: 27.08.2025).

References

1. CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels. ICAO, 2025, 12 p. Available at: <https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Eligible%20Fuels/ICA0-document-05-Sustainability-Criteria-June-2025.pdf> (accessed: 20.08.2025).
2. ICAO Resolution A39-3. Consolidated statement of continuing ICAO policies and practices related to environmental protection – Global Market-based Measure (MBM) scheme (CORSIA). ICAO, 2016, 8 p. Available at: https://www2023.icao.int/environmental-protection/documents/resolution_a39_3.pdf (accessed: 20.08.2025).
3. Annex 16 to the Convention on International Civil Aviation. Environmental Protection. Volume IV: Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA). 2nd ed. ICAO, 2023, 124 p. Available at: <https://www.icao.int/CORSIA/sarps-annex-16-volume-iv> (accessed: 15.08.2025).

4. International Civil Aviation Organization. CORSIA States for Chapter 3 State Pairs. 5th ed., Rev. ICAO, 2024, 4 p. Available at: https://www.icao.int/sites/default/files/2025-06/CORSIA-States-for-Chapter-3-State-Pairs_5Ed_Rev_web.pdf (accessed: 17.08.2025).
5. Sustainable Aviation Fuel Grand Challenge Roadmap Implementation Framework. Washington, DC, U.S. Department of Energy, 2024, 72 p. Available at: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-11/SAF-Implementation-Framework-Nov-2024.pdf> (accessed: 22.08.2025).
6. Regulation (EU) 2023/2405 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 on ensuring a level playing field for sustainable air transport (ReFuelEU Aviation Regulation). *Official Journal of the European Union*, 31.10.2023, 45 p. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023R2405> (accessed: 23.08.2025).
7. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (RED II), as amended by Directive (EU) 2023/2413 (RED III). *Official Journal of the European Union*, 31.10.2023, 56 p. Available at: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023L2413> (accessed: 23.08.2025).
8. ASTM D1655-24a. Standard Specification for Aviation Turbine Fuels. ASTM International, 2024, 23 p. Available at: <https://www.astm.org/d1655-24a.html> (accessed: 25.08.2025).
9. ASTM D7566-24a. Standard Specification for Aviation Turbine Fuel Containing Synthesized Hydrocarbons. ASTM International, 2024, 41 p. Available at: <https://www.astm.org/d7566-24a.html> (accessed: 25.08.2025).
10. ASTM D4054-24a. Standard Practice for Evaluation of New Aviation Turbine Fuels and Fuel Additives. ASTM International, 2024, 49 p. Available at: <https://www.astm.org/d4054-24a.html> (accessed: 27.08.2025).
11. Ershov M. A., Savelenko V. D., Makhova U. A., Burov N. O. SAF: new opportunities for Russia or new problems? *Neftegazovaya Vertikal*, 2022, no. 4, pp. 102–113. (In Russ.)

Информация об авторах

Приваленко Алексей Николаевич, кандидат технических наук, доцент, заместитель директора Научного центра, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, privalenko_AN@gosniiga.ru

Мариничев Владимир Игорьевич, директор Научного центра, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, marinichev@gosniiga.ru

Ершов Михаил Александрович, доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, Москва, Россия, ershovma@ntwc.ru

Шарин Евгений Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова Российской академии наук, Москва, Россия, shea06@yandex.ru

Махова Ульяна Александровна, аспирант, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, Москва, Россия, u_mahova@ntwc.ru

Буров Никита Олегович, инженер, аспирант, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, Москва, Россия, n_burov@ntwc.ru

Ильин Андрей Всеволодович, студент, Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, Москва, Россия, a_ilin@ntwc.ru

Authors information

Privalenko Alexey N., Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Deputy Director of the Science Center, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, privalenko_AN@gosniiga.ru

Marinichev Vladimir I., Director of Science Center, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, marinichev@gosniiga.ru

Ershov Mihail A., Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Deputy Head of Department, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, Russia, ershovma@ntwc.ru

Sharin Evgeniy A., Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher, Severtsov Institute of Ecology and Evolution Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, shea06@yandex.ru

Mahova Uliana A., Postgraduate Student, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, Russia, u_mahova@ntwc.ru

Burov Nikita O., Engineer, Postgraduate Student, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, Russia, n_burov@ntwc.ru

Ilin Andrei V., Student, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, Russia, a_ilin@ntwc.ru

Статья поступила в редакцию 16.07.2025; одобрена после рецензирования 28.07.2025; принята к публикации 05.09.2025.

The article was submitted 16.07.2025; approved after reviewing 28.07.2025; accepted for publication 05.09.2025.

Научная статья
УДК 662.75

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИМЕСЕЙ РЕАГЕНТОВ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ОБОРУДОВАНИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКЕ, НА ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА АВИАЦИОННОГО ТОПЛИВА

А. Н. ПРИВАЛЕНКО, Н. В. МОРОЗОВА, С. И. ПОПЛЕТЕЕВ, Н. В. ГОРСКАЯ

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. В статье показана необходимость исследования влияния качества авиационного топлива на работу топливных систем воздушных судов (ВС) гражданской авиации (ГА) и газотурбинных двигателей при расследовании авиационных событий. Рассмотрены случаи накопления в авиатопливе нехарактерных примесей, наличие которых привело к возникновению неисправностей и отказов в работе авиационной техники. Рассмотрены вопросы, связанные с загрязнением топлива в ходе производства и технологических операций. Особое внимание уделено загрязнениям реагентами химико-технологической защиты оборудования. Приведены результаты экспериментальных исследований на модельных смесях, на основании которых проведена оценка динамики изменения эксплуатационных показателей топлива при увеличении концентрации примесей реагентов и дана оценка их влияния на качество авиатоплива.

Ключевые слова: гражданская авиация, авиационное топливо, эксплуатация авиационной техники, нехарактерные примеси, реагенты химико-технологической защиты оборудования

Для цитирования: Приваленко А. Н., Морозова Н. В., Поплетеев С. И., Горская Н. В. Исследование влияния примесей реагентов химико-технологической защиты оборудования, применяемых при нефтепереработке, на показатели качества авиационного топлива // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 51. С. 22–34.

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ADDITIVES OF CHEMICAL AND TECHNOLOGICAL PROTECTION OF EQUIPMENT USED IN OIL REFINING ON THE QUALITY OF AVIATION FUEL

A. N. PRIVALENKO, N. V. MOROZOVA, S. I. POPLETEEV, N. V. GORSKAYA

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

Abstract. The article shows the need to study changes in the quality of aviation fuel during the investigation of aviation events. It examines cases where atypical impurities accumulate in aviation fuel, leading to the failure of civil aviation aircraft. The article also addresses the issues of fuel contamination caused by production factors and technological operations. Special attention is given to the side effects of chemical and technological equipment protection agents. The article presents the results of experimental studies on model mixtures, which are used to assess the dynamics of changes in fuel performance as the concentration of reagent impurities increases. The impact of these substances on the quality of aviation fuel and the operation of aircraft fuel systems has been assessed.

Keywords: civil aviation, jet fuel, operation of aircraft, uncharacteristic impurities, equipment chemical protection reagents

For citation: Privalenko A. N., Morozova N. V., Popleteev S. I., Gorskaya N. V. Investigation of the effect of additives of chemical and technological protection of equipment used in oil refining on the quality of aviation fuel. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2025, no. 51, pp. 22–34. (In Russ.)

Введение

ФГУП ГосНИИ ГА (далее – Институт) в ходе своей деятельности проводит исследования изменения качества авиационного топлива (далее – топлива) в процессе его подготовки в топливной системе ВС ГА, а также оценку рисков влияния таких изменений на надёжность работы газотурбинных двигателей ВС и технических средств их наземного обслуживания.

Результаты исследований, проведённых при расследовании причин авиационных событий (происшествий), показали, что изменение качества топлива может являться результатом как производственных факторов, так и технологических операций. При этом к наиболее значимым производственным факторам относятся такие как изменение качества сырья, неконтролируемое изменение технологии производства, использование новых присадок и катализаторов, а также отсутствие единого порядка допуска топлив к производству и применению на ВС. В процессе технологических операций, таких как транспортировка, хранение, налив заправочных средств и заправка баков ВС, идёт загрязнение топлива механическими примесями и водой, контакт с конструкционными материалами и антикоррозионными покрытиями, микробиологическими загрязнениями, смешение с другими марками ГСМ. При этом примеси могут попасть в топливо как извне, так и в результате взаимодействия компонентов топлива с различными материалами, что зачастую затрудняет однозначную интерпретацию источников появления примесей.

При этом из-за накопительного эффекта даже малое количество примесей может вызвать проблемы в условиях эксплуатации ВС. Так, в 2000 году из-за попадания в топливо эпоксидных соединений, входящих в состав лакокрасочных покрытий резервуаров (ЛКП), произошёл инцидент с самолётом Ту-154. При заходе на посадку произошло залипание золотниковых пар насосов-регуляторов, что привело к последовательному отказу трёх двигателей¹. Для оценки риска попадания в топливо компонентов ЛКП Институт в 2003 году разработана и внедрена в практику испытаний «Методика исследования воздействия антикоррозионного покрытия на эксплуатационные свойства топлива для реактивных двигателей», в соответствии с которой предприятиям авиатопливообеспечения (АТО) рекомендуется после нанесения ЛКП на поверхность ёмкостей для хранения и транспортировки топлива проводить оценку их пригодности к дальнейшей эксплуатации.

В 2009 году на самолётах Ту-204 произошли два инцидента, связанных с засорением топливных фильтров двигателей. При этом в топливе были обнаружены компоненты биотоплива (FAME), которые могли явиться источником загрязнения фильтров, возможными инициаторами окисления топлива и процессов коррозии.

В 2018 году при расследовании инцидента, связанного с забивкой топливного фильтра двигателя самолёта А-320, установлено, что в топливную систему ВС попали посторонние вещества, которые были идентифицированы как полисилоксановые соединения; подобные соединения были обнаружены при техническом обслуживании (сливе отстоя) самолёта А-321. Оба события были квалифицированы как инциденты, по результатам расследования которых Росавиацией была разработана «Информация по безопасности полётов № 18».

Кроме технологических примесей возможным источником загрязнения топлива могут быть примеси, попадающие в топливо при его производстве – следы катализаторов и других

¹ О результатах расследования серьёзного инцидента с самолётом ТУ-154М, произошедшего 12.01.2000 в аэропорту «Толмачево»: Распоряжение Министерства транспорта РФ от 16.11.2000 № 75-р.

веществ, применяемых при производстве топлива. Результаты испытаний опытно-промышленных партий и товарных топлив, вырабатываемых нефтеперерабатывающими заводами (НПЗ) в период 2009–2020 гг., показали, что присутствия металлов, таких как W, V, Ni, Co, Al, входящих в состав катализаторов, в топливе не обнаружено. В этот же период было установлено присутствие в топливе посторонних примесей, которые идентифицированы как азотсодержащие соединения, одним из источников которых могут быть реагенты химико-технологической защиты оборудования (ХТЗ). Реагенты ХТЗ используются в процессе производства топлива: деэмульгаторы применяются на стадии подготовки нефти в процессе её обессоливания и обезвоживания, ингибиторы и нейтрализаторы используются для защиты нефтезаводского оборудования от коррозии. Вовлечённые в процесс производства на НПЗ реагенты ХТЗ в следовых количествах могут попадать в топливо. Согласно международным представлениям по вопросам применения топлива, изложенным в стандарте DEF STAN 91-091, наличие в топливе примесей ингибиторов коррозии может явиться причиной нарушения работы топливных систем ВС. Учитывая, что используемые реагенты представляют собой, как правило, гетероатомные соединения, с высокой вероятностью присутствие подобных примесей может оказывать влияние как на фазовые переходы воды, так и на её растворимость в топливе, тем самым препятствуя выпадению «свободной» воды в виде отстоя [1].

В нормативной документации на топливо, выпускаемое на территории России, ГОСТ 10227², ТР ТС 013/2011³ установлены требования об отсутствии «поверхностно-активных и других химических веществ в количестве, ухудшающем его свойства», при этом нормы наличия поверхностно-активных веществ (ПАВ), методы их идентификации и определения отсутствуют. Международный опыт показывает, что содержание такого рода побочных примесей в топливе должно контролироваться. Так, в зарубежных спецификациях DEF STAN 91-091, ASTM D 1655⁴ установлены нормы на содержание посторонних материалов, таких как FAME (Fatty Acid Methyl Esters - метиловые эфиры жирных кислот) и антитурбулентной присадки, указаны методы их определения и максимально разрешённый уровень, наличие загрязнений в топливе механическими примесями регламентируется на месте производства по гранулометрическому составу. Также отмечено, что такие вещества «как ингибиторы коррозии, могут в незначительных количествах попадать в авиационное топливо в процессе производства. В некоторых случаях это приводило к проблемам в работе топливных систем самолётов».

Ввиду того, что данные по воздействию примесей реагентов ХТЗ на эксплуатационные характеристики топлива отсутствуют, изучение их воздействия на свойства топлива позволит установить допустимое количество их присутствия в топливе, также определить нормы их содержания.

Постановка задачи и методика исследования

Исследование динамики изменения эксплуатационных показателей топлива при увеличении концентрации реагентов проводилось на модельных смесях прямогонных керосиновых фракций, не содержащих присадок и ПАВ, с добавлением наиболее широко применяемых при производстве на отечественных НПЗ реагентов ХТЗ в концентрациях 5, 10, 20, 50 и 100 мг/кг.

При проведении экспериментальных исследований оценивались следующие показатели:

- межфазное натяжение на границе раздела фаз топливо-вода по ASTM 1331 методом кольца Нуи на автоматическом тензиометре «Lauda TD 3». Сущность метода заключается в измерении

² ГОСТ 10227-86. Топлива для реактивных двигателей. Технические условия (с изменениями 1–6).

³ О требованиях к автомобильному и авиационному бензину, дизельному и судовому топливу, топливу для реактивных двигателей и мазуту: Технический регламент Таможенного союза. ТР ТС 013/2011.

⁴ ASTM Standard Specification D 1655-16c for Aviation Turbine Fuels “Jet A-1”, URL: <https://www.astm.org>

максимальной силы, которую необходимо применить для отрыва кольца с поверхности раздела фаз, что характеризует силу взаимодействия контактирующих жидкостей;

- оценка светопропускания топлива микросепарометром по ASTM D 3948 (режим А). Данный метод служит критерием наличия в топливе поверхностно-активных веществ, которые могут ухудшить процесс отделения эмульсионной воды при прохождении через фильтр-сепаратор в реальных условиях эксплуатации;

- вспениваемость топлива по методике ГосНИИ ГА. Характеристика вспениваемости оценивалась по объёму и времени исчезновения столба пены после аэрации топлива воздухом;

- физико-химические показатели: плотность, показатель преломления, удельная электрическая проводимость, концентрация фактических смол, взаимодействие с водой, содержание водорастворимых кислот и щелочей (определялись методами ГОСТ).

Анализ структурно-группового состава исходных реагентов ХТЗ и модельных смесей проводился методом инфракрасной (ИК) спектроскопии с использованием однолучевого ИК-спектрометра Nicolet iS10 в режиме пропускания. Все спектры подвергались автоматической коррекции базовой линии и мягкому шумоподавлению.

Результаты исследования модельных смесей с примесями деэмульгатора

Деэмульгаторы – реагенты на основе ПАВ, применяемые для повышения эффективности разрушения водонефтяных эмульсий в процессе обессоливания и обезвоживания нефти. Проводились испытания двух типов деэмульгатора: тип I – на основе алкилфенолоформальдегидных смол, и тип II – на основе блоксополимеров оксидов алкиленов [2].

Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты исследований модельных смесей с добавлением деэмульгатора

Наименование показателя	Концентрация деэмульгатора, мг/кг											
	на основе алкилфенолоформальдегидных смол (тип I)						на основе блоксополимеров оксидов алкиленов (тип II)					
	0	5	10	20	50	100	0	5	10	20	50	100
Удельная электрическая проводимость при 20 °С, пС/м	3	3	5	14	54	46	3	1	1	1	3	3
Взаимодействие с водой, балл:												
- состояние поверхности раздела фаз	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1
- состояние разделённых фаз	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Вспениваемость:												
- объём пены, см ³	4	6	6	5	6	4	3	4	4	4	4	3
- время исчезновения пены, с	5	6	6	5	5	5	4	5	5	4	4	4
Межфазное натяжение на границе вода-топливо, мН/м	42,9	37,2	37,0	35,2	28,4	4,0	43,2	40,3	36,8	26,4	19,6	14,0
Оценка светопропускания топлива микросепарометром	100	74	51	0	0	0	100	99	95	85	50	46
Содержание водорастворимых кислот и щелочей	отсутствие											

Анализ данных, представленных в табл. 1, показывает, что с увеличением концентрации деэмульгатора наблюдается устойчивая динамика уменьшения величин показателей «межфазное натяжение на границе топливо-вода» и «светопропускание топлива микросепарометром».

С учётом данных статистической базы Института, пороговая величина для межфазного натяжения штатных топлив при нормальных условиях эксплуатации составляет не менее 37 мН/м. Экспериментальные данные показывают, что снижение межфазного натяжения до предельного уровня отмечается при концентрации деэмульгатора 10 мг/кг для обоих типов. При этом величина светопропускания топлива для деэмульгатора первого типа значительно снизилась уже при добавлении 5 мг/кг; для второго типа снижается при концентрации 20 мг/кг.

Увеличение концентрации реагента на основе алкилфенолоформальдегидных смол увеличивает удельную электрическую проводимость, а при концентрации 50 мг/кг и выше топливо не проходит испытание по показателю «взаимодействие с водой». Подобного эффекта при добавлении деэмульгатора на основе блоксополимеров оксидов алкиленов не наблюдается.

Наличие в топливе примесей деэмульгатора в количестве до 100 мг/кг не вызывает изменений плотности, показателя преломления, концентрации фактических смол и характеристик вспениваемости топлива.

Анализ структурно-группового состава деэмульгаторов как первого, так и второго типа, полученный методом ИК-спектроскопии, показывает, что в ИК-спектрах присутствуют: широкий пик в области 3450 см^{-1} , обусловленный наличием -ОН групп; пики в области $3000\text{--}2870\text{ см}^{-1}$, $1458\text{--}1455\text{ см}^{-1}$ и $1379\text{--}1373\text{ см}^{-1}$, характерные для валентных и деформационных колебаний групп -CH₃, -CH₂; пики в области $1607\text{--}1505\text{ см}^{-1}$, характерные для связи C=C; интенсивная толстая полоса в области 1110 см^{-1} , характерная для колебаний -C-O-. ИК-спектры деэмульгаторов представлены на рис. 1 и рис. 2.

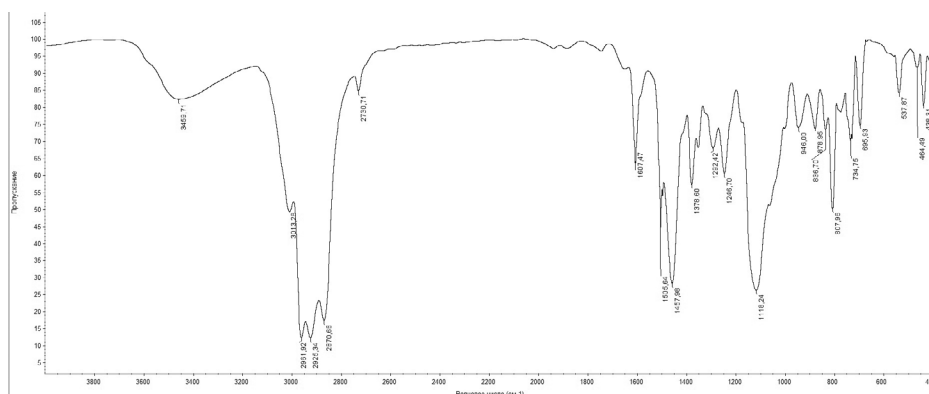


Рис. 1. ИК-спектр деэмульгатора на основе алкилфенолоформальдегидных смол (тип I)

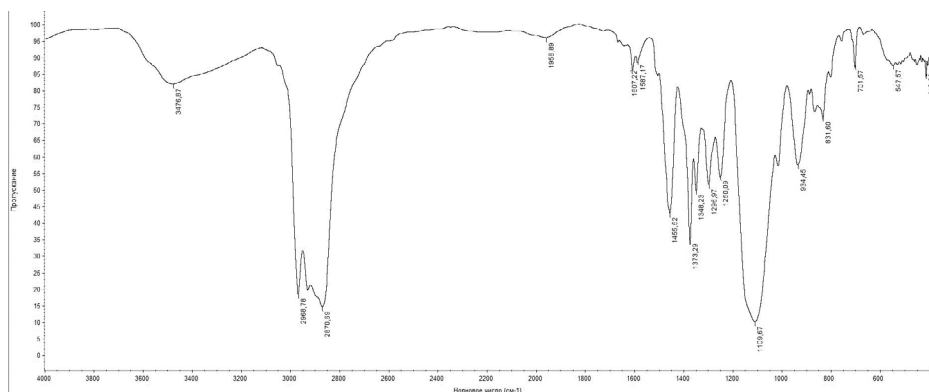


Рис. 2. ИК-спектр деэмульгатора на основе блоксополимеров оксидов алкиленов (тип II)

В ИК-спектрах модельных смесей с добавлением деэмульгаторов типов I и II отмечен рост пиковой интенсивности полосы 1110 см^{-1} . Пик этой полосы (рис. 3, рис. 4) хорошо идентифицируется уже для концентрации в количестве 5 мг/кг . Данная полоса не является избирательной и характерна для других классов соединений, содержащих функциональную группу $-C-O-$.

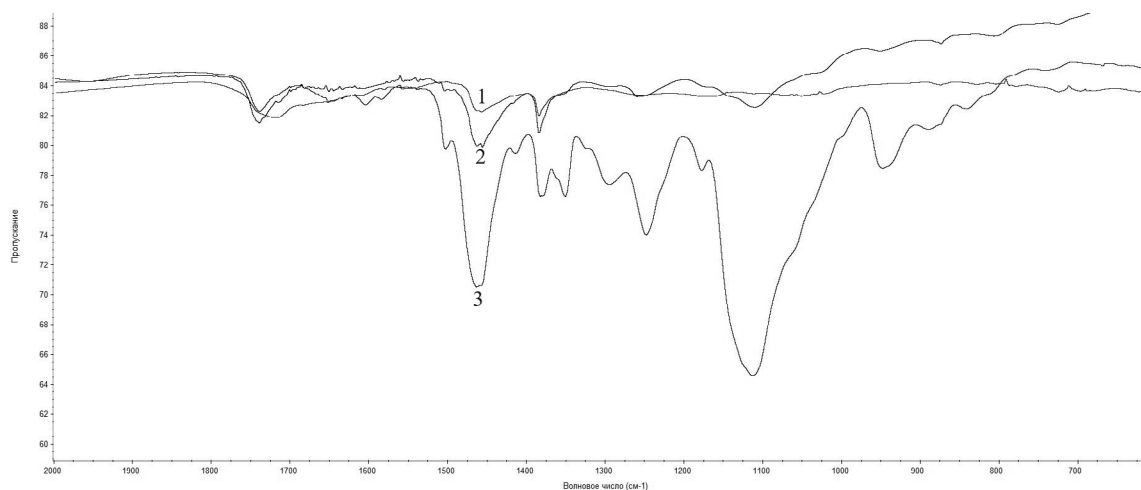


Рис. 3. ИК-спектры: 1 – исходное топливо, 2, 3 – модельные смеси, деэмульгатор тип I, концентрации 2 – 5 мг/кг , 3 – 100 мг/кг

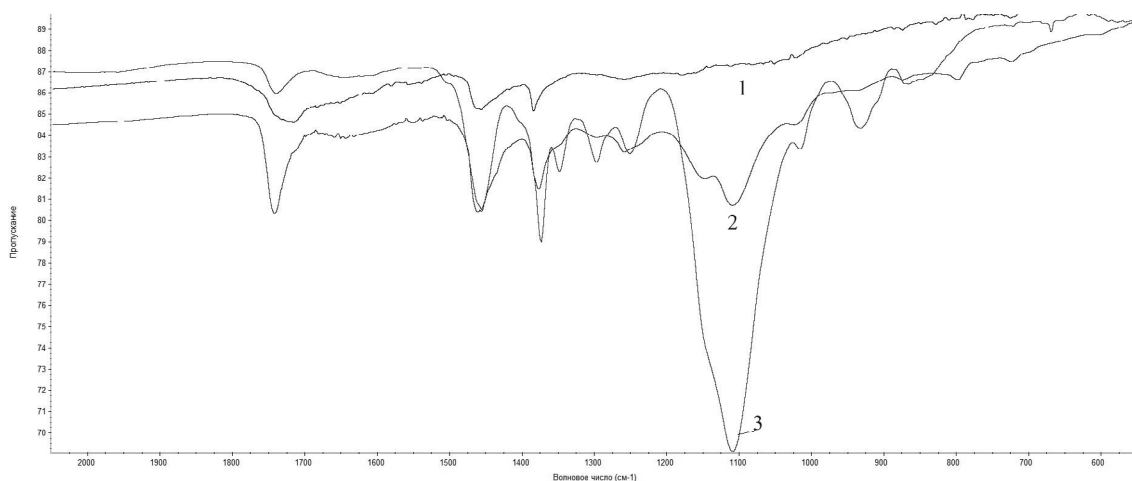


Рис. 4. ИК-спектры: 1 – исходное топливо, 2, 3 – модельные смеси, деэмульгатор тип II, концентрации 2 – 5 мг/кг , 3 – 100 мг/кг

Таким образом, анализ данных, представленных в табл. 1 и рис. 1–4 показывает, что присутствие деэмульгатора в керосиновой фракции может быть идентифицировано с использованием методов определения межфазного натяжения, оценки светопропускания топлива микросепарометром и подтверждено методом ИК-спектроскопии.

Результаты исследования модельных смесей с примесями нейтрализаторов коррозии

Нейтрализаторы коррозии предназначены для контроля среды в верхних потоках колонн на НПЗ и, как правило, представляют собой низкомолекулярные амины [3]. Проводились испытания двух типов нейтрализатора: на основе метоксипропиламина и диметиэтаноламина. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний модельных смесей с добавлением нейтрализатора

Наименование показателя	Концентрация нейтрализатора, мг/кг											
	на основе метоксипропиламина						на основе диметиэтаноламина					
	0	5	10	20	50	100	0	5	10	20	50	100
Удельная электрическая проводимость при 20 °С, пС/м	3	1	1	1	1	6	1	1	1	1	1	1
Взаимодействие с водой, балл:												
- состояние поверхности раздела фаз	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
- состояние разделённых фаз	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Вспениваемость:												
- объём пены, см ³	4	6	4	6	6	5	3	4	6	6	6	4
- время исчезновения пены, с	5	7	5	5	5	5	4	3	4	3	4	4
Межфазное натяжение на границе вода-топливо, мН/м	42,9	39,5	38,1	37,1	36,9	36,3	43,2	44,0	44,0	43,6	43,5	43,2
Оценка светопропускания топлива микросепарометром	100	100	100	97	57	50	100	100	100	100	98	96
Содержание водорастворимых кислот и щелочей	Отсутствие										Присутствие	

Анализ данных, представленных в табл. 2, показывает, что в модельных смесях при концентрациях нейтрализатора на основе диметиэтаноламина в 50 мг/кг и более получен браковочный результат по показателю «содержание водорастворимых кислот и щелочей»: согласно ГОСТ 6370⁵ за браковочный результат принимается значение pH водной вытяжки выше 8,0 ед. pH. Значение водородного показателя водной вытяжки из топлива при увеличении концентрации до 50 мг/кг составило 8,1 ед. pH, при концентрации 100 мг/кг – 9,4 ед. pH. При добавлении нейтрализатора на основе метоксипропиламина также наблюдалось смещение водородного показателя водной вытяжки в щелочную сторону с 6,0 ед. pH для исходной смеси до 7,6 ед. pH для концентрации 100 мг/кг, что, согласно ГОСТ 6370, не является браковочным результатом.

Нейтрализатор коррозии на основе метоксипропиламина в количестве 50 мг/кг и более снижает межфазное натяжение и светопропускание топлива ниже предельных значений. Нейтрализатор на основе диметиэтаноламина в концентрациях от 5 до 100 мг/кг практически не влияет на данные показатели.

Изменение значений остальных физико-химических показателей качества модельных смесей с использованием данных реагентов не выявлено.

Анализ структурно-группового состава, полученный методом ИК-спектроскопии, показал в ИК-спектре нейтрализатора на основе метоксипропиламина полосы поглощения, характерные для первичных аминов: сигналы 3370 и 3300 см⁻¹, соответствующие валентным колебаниям N-H; 1580 см⁻¹ – деформационным ножничным колебаниям N-H scis, а также интенсивную полосу в области 1117 см⁻¹, показывающую наличие группы C-O-C. Диметиэтаноламин является третичным амином, для которого характерно отсутствие сигналов связи N-H в средней ИК-области. При этом в ИК-спектре данного нейтрализатора проявляется полоса поглощения 1572 см⁻¹, которую

⁵ ГОСТ 6307-75. Нефтепродукты. Метод определения наличия водорастворимых кислот и щелочей (с изменением № 1).

можно отнести к колебанию связи N-H. Это может быть обусловлено тем, что нейтрализующие амины, как правило, представляют собой смесь аминов в растворителях, и в их ИК-спектрах проявляются полосы поглощения отдельных компонентов смеси (рис. 5, 6).

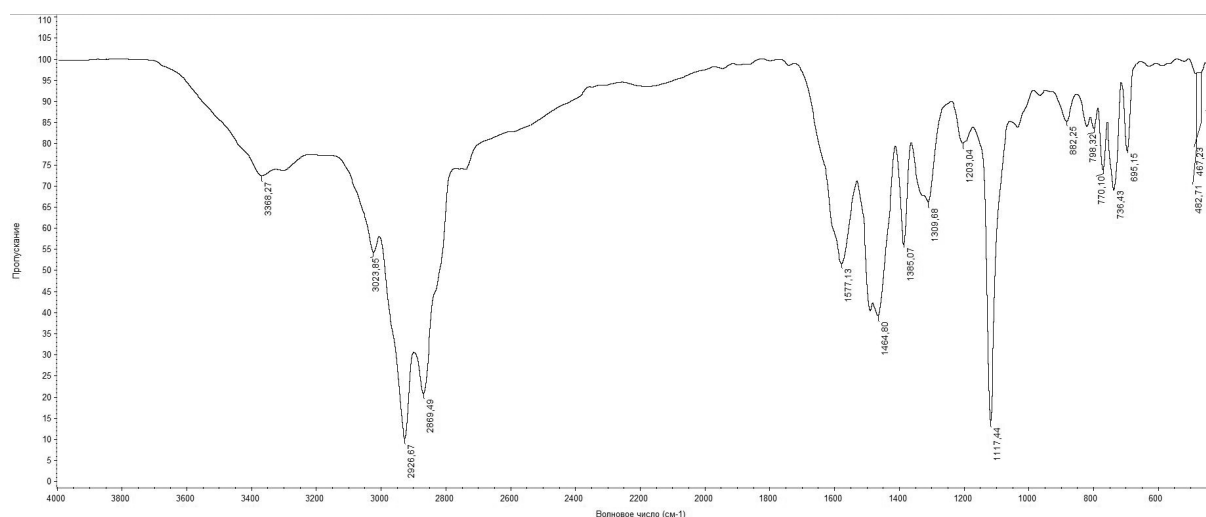


Рис. 5. ИК-спектр нейтрализатора коррозии на основе метоксипропиламина

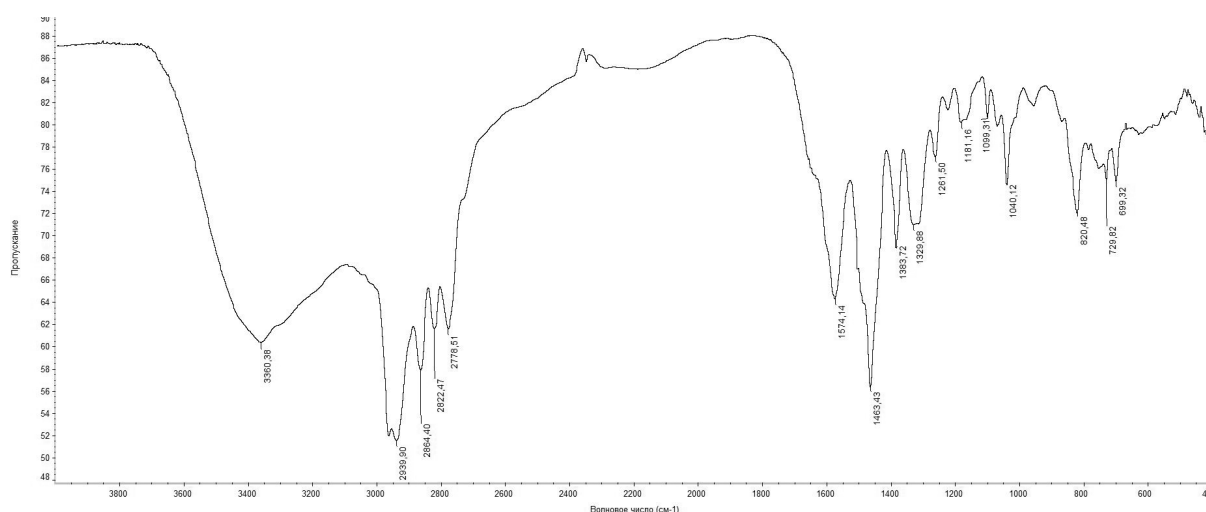


Рис. 6. ИК-спектр нейтрализатора коррозии на основе диметиэтаноламина

ИК-спектральный анализ модельных смесей при введении нейтрализаторов на основе низкомолекулярных аминов (в концентрациях от 5 до 100 мг/кг) не показал изменения состава топлива в средней ИК-области.

Из приведённых данных следует, что присутствие разных типов нейтрализаторов коррозии не всегда даёт сопоставимые результаты, что свидетельствует о необходимости дополнительного исследования влияния на качество топлива конкретных марок нейтрализаторов.

Результаты исследования модельных смесей с примесями ингибиторов коррозии

Применяемые для защиты нефтезаводского оборудования от коррозии ингибиторы, как правило, представляют собой азотсодержащие соединения с длинной углеводородной цепью. Наиболее часто встречающимися группами в структуре ингибиторов коррозии являются имидазолиновые соединения, амины и их соли [4, 5]. Исследовались две марки (А и В) ингибиторов

коррозии на основе производных имидазолиновых соединений и одна марка на основе ароматических аминов. Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты исследований модельных смесей с добавлением ингибиторов коррозии

Наименование показателя	Концентрация ингибитора коррозии, мг/кг																
	на основе имидазолиновых соединений											на основе ароматических аминов					
	марка А						марка В										
	0	5	10	20	50	100	0	5	10	20	50	100	0	5	10	20	50
Удельная электрическая проводимость при 20 °С, пС/м	1	1	1	1	1	1	3	1	1	2	2	4	3	3	2	2	1
Взаимодействие с водой, балл: - состояние поверхности раздела фаз - состояние разделённых фаз	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2
	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Вспениваемость: - объём пены, см ³ - время исчезновения пены, с	4	4	4	4	4	4	4	6	8	8	8	12	5	8	8	6	6
	5	5	5	6	5	5	4	4	5	8	6	35	5	7	6	5	5
Межфазное натяжение на границе вода-топливо, мН/м	43,2	35,8	35,7	24,3	19,4	11,9	43,2	41,9	39,8	29,7	27,8	23,0	43,2	38,5	39,3	39,7	37,3
Оценка светопропускания топлива микро-сепарометром	100	87	86	45	0	0	100	100	98	97	87	69	100	97	95	90	79
Содержание водорастворимых кислот и щелочей	Отсутствие																

Анализ данных, представленных в табл. 3, показывает, что с увеличением концентрации ингибитора коррозии в модельных смесях уменьшаются показатели «межфазное натяжение на границе фаз» и «взаимодействие с водой». При концентрации ингибиторов коррозии на основе имидазолиновых соединений до 20 мг/кг межфазное натяжение ниже предельного уровня. Для марки В установлено изменение показателя «вспениваемость», который снизился до уровня минимального значения статистических величин. Для ингибиторов коррозии на основе аминов снижение межфазного натяжения до предельного значения достигается при больших концентрациях. При концентрации ингибитора коррозии на основе имидазолиновых соединений (марка А) 20 мг/кг и для двух других марок при концентрации 100 мг/кг величина показателя взаимодействия с водой не соответствует ГОСТ 10227-86.

На рис. 7 и рис. 8 представлены ИК-спектры ингибиторов коррозии на основе производных имидазолиновых соединений и ароматических аминов соответственно.

В ИК-спектрах ингибиторов коррозии на основе производных имидазолиновых соединений можно выделить следующие полосы поглощения: 1650 см⁻¹ (в данном случае колебания С-N связи в кольце), колебания -NH- связи (1545 см⁻¹). В ИК-спектре ингибитора коррозии на основе ароматических аминов можно выделить полосы 1640 см⁻¹ (N-H), 1248 см⁻¹ (C-N) и узкую интенсивную полосу 1510 см⁻¹.

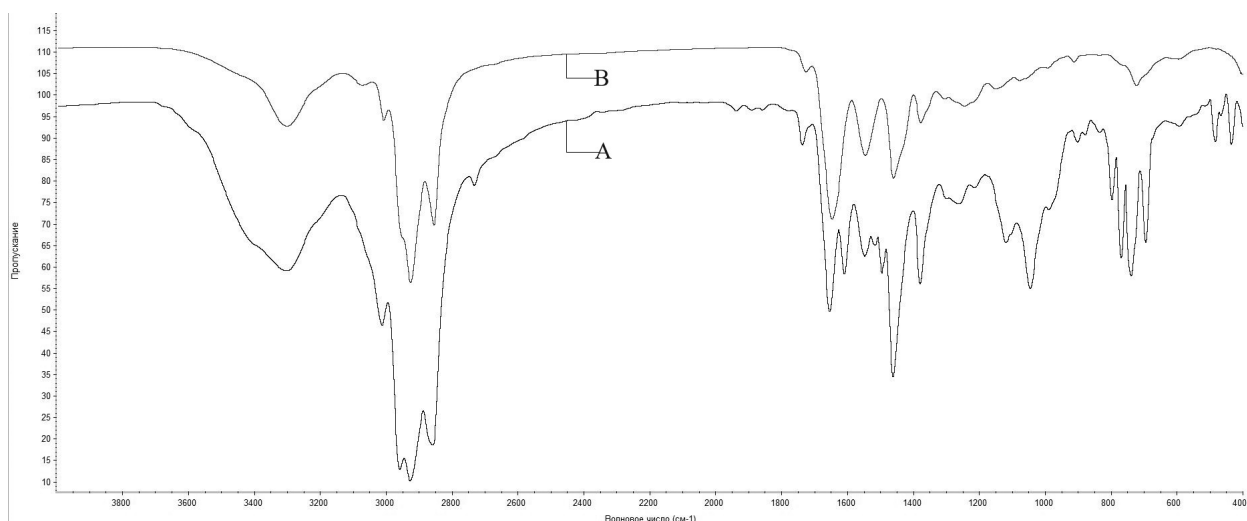


Рис. 7. ИК-спектры ингибиторов коррозии на основе имидазолиновых соединений марок А и В

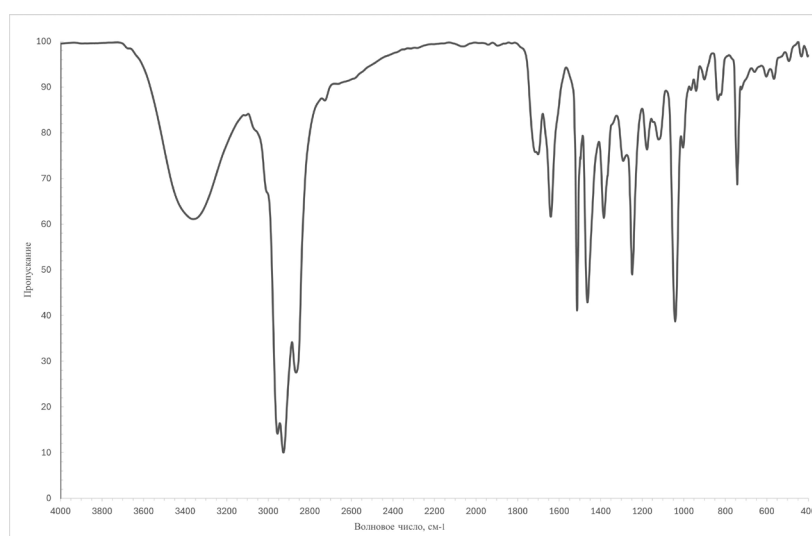


Рис. 8. ИК-спектр ингибитора коррозии на основе аминов

В ИК-спектрах модельных смесей (рис. 9, 10) определяющими полосами, характеризующими наличие следов ингибитора коррозии на основе имидазолиновых соединений, являются полосы 1650 см^{-1} и 1545 см^{-1} , на основе ароматических аминов – 1640 , 1510 и 1249 см^{-1} , интенсивность которых возрастает с увеличением концентрации реагента. Концентрации ингибиторов коррозии 5 мг/кг определяются как следовые количества.

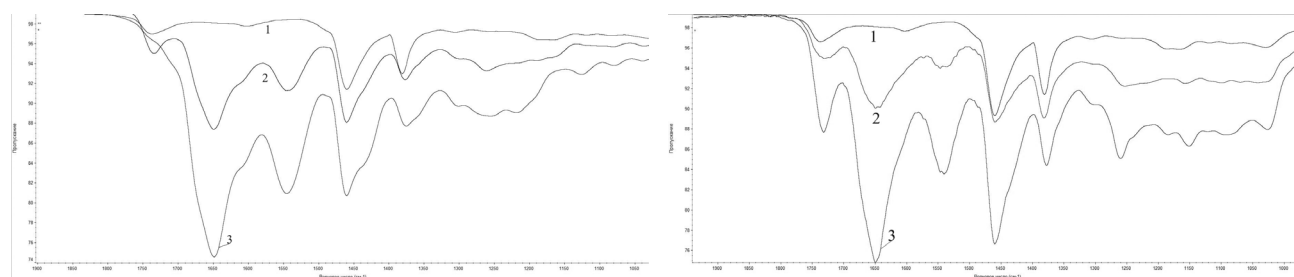


Рис. 9. ИК-спектры: 1 – исходное топливо, 2, 3 – модельные смеси, имидазолиновые соединения марок А (слева) и В (справа), концентрации 2 – 5 мг/кг , 3 – 100 мг/кг

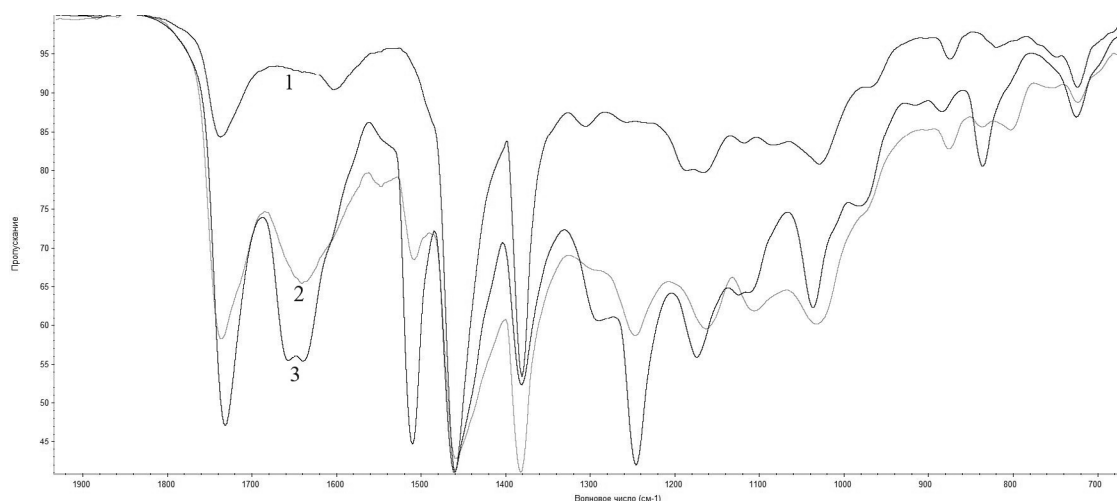


Рис. 10. ИК-спектры: 1 – исходное топливо, 2, 3 – модельные смеси, ингибитор на основе аминов, концентрации 2 – 5 мг/кг, 3 – 100 мг/кг

Данные табл. 3 и рис. 7–10 показывают, что наличие примесей ингибиторов коррозии в керосиновой фракции может быть установлено при использовании методов определения межфазного натяжения, оценки светопропускания топлива микросепарометром и подтверждено методом ИК-спектроскопии.

Заключение

Экспериментальные исследования показали, что присутствие следов реагентов ХТЗ (деэмульгаторов, ингибиторов и нейтрализаторов коррозии) может оказывать негативное влияние на эксплуатационные характеристики топлива:

- наличие в топливе примесей деэмульгаторов ведёт к снижению поверхностного натяжения и светопропускания топлива. Содержание в топливе деэмульгатора на основе алкилфенолоформальдегидных смол в концентрации 50 мг/кг и выше приводит к несоответствию топлива требованиям ГОСТ 10227-86 по показателям «взаимодействие с водой» и «удельная электрическая проводимость»;

- наличие в топливе примесей ингибиторов и нейтрализаторов коррозии на основе азотсодержащих соединений оказывает разное воздействие на его качество. Исследуемые ингибиторы коррозии уже в количестве 5–20 мг/кг снижают межфазное натяжение и светопропускание топлива ниже пороговых значений, установленных Институтом с учётом статистической базы. При дальнейшем увеличении концентрации ингибиторов коррозии топливо перестаёт соответствовать требованиям ГОСТ 10227-86 по показателю «взаимодействие с водой». Нейтрализаторы коррозии на основе низкомолекулярных аминов оказывают заметное влияние на характеристики топлива только в количестве более 50 мг/кг. При этом снижение межфазного натяжения и светопропускания топлива было установлено для одной из двух испытуемых марок. В лабораторных условиях было установлено также влияние нейтрализаторов на смещение водородного показателя водной вытяжки топлива в щелочную сторону.

Результаты лабораторных исследований показывают, что стандартные методы испытаний, такие как «взаимодействие с водой», «содержание водорастворимых кислот и щелочей», «удельная электрическая проводимость» не обладают достаточной чувствительностью для выявления значимых количеств реагентов ХТЗ. Для контроля их присутствия целесообразно дополнительно к стандартным методам оценки качества топлива использовать такие методы, как определение межфазного натяжения на границе фаз топливо-вода, оценка светопропускания топлива микросепарометром и методы спектрального анализа.

Таким образом, по результатам исследования установлено, что присутствие реагентов ХТЗ в первую очередь оказывает влияние на эксплуатационные показатели топлива, характеризующие эффективность водоотделения топлива. При прочих равных условиях при использовании топлива с пониженными показателями межфазного натяжения и/или светопропускания могут возникнуть проблемы, связанные с эффективностью удаления эмульсионной воды из топлива, что в свою очередь создаёт риск заправки обводнённым топливом ВС.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Ковба Л. В., Морозова Н. В., Азжеурова О. Б., Горская Н. В. Некоторые аспекты обеспечения безопасности полётов при подготовке, заправке и применении авиационного топлива // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 42. С. 87–96.
2. Фазулзянов Р. Р., Елпидинский А. А., Гречухина А. А., Башкирцева Н. Ю. Применение реагентов на установках первичной переработки нефти // Вестник Казанского технологического университета. 2013. № 6. С. 192–195.
3. Сулейманов С. М., Ямалетдинова А. А. Применение реагентов на установках первичной переработки нефти // Бухарский инженерно-технологический институт. 2016. № 3(4). С. 40–41.
4. Фархутдинова А. Р., Мукалдисов Н. И., Елпидинский А. А., Гречухина А. А. Изучение влияния ингибиторов коррозии на эффективность реагентов-деэмульгаторов // Вестник Казанского технологического университета. 2012. № 18. С. 85–87.
5. Агамалиева Д. Б., Бабаева В. Д. Имидазолины и их комплексы в качестве ингибиторов коррозии // Вестник Башкирского государственного педагогического университета им. М. Акмуллы. 2022. № 3(64). С. 23–37.

References

1. Kovba L. V., Morozova N. V., Azzheurova O. B., Gorskaya N. V. Some aspects of aviation safety in the preparation, fueling and use of aviation fuel. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2023, no. 42, pp. 87–96. (In Russ.)
2. Fazulzyanov R. R., Elpidinsky A. A., Grechukhina A. A., Bashkirtseva N. Yu. Application of reagents in primary oil refining plants. *Bulletin of Kazan Technological University*, 2013, no. 6, pp. 192–195. (In Russ.)
3. Suleymanov S. M., Yamaletdinova A. A. Application of reagents in primary oil refining plants. *Bukhara Institute of Engineering and Technology*, 2016, no. 3(4), pp. 40–41. (In Russ.)
4. Farhutdinova A. R., Mukatdisov N. I., Elpidinsky A. A., Grechukhina A. A. Study of the effect of corrosion inhibitors on the efficiency of deemulsifier reagents. *Bulletin of Kazan Technological University*, 2012, no. 18, pp. 85–87. (In Russ.)
5. Agamaliyeva D. B., Babaeva V. D. Imidazolines and their complexes as corrosion inhibitors. *Bulletin of the Bashkir State Pedagogical University named after M. Akmulla*, 2022, no. 3(64), pp. 23–37. (In Russ.)

Информация об авторах

Приваленко Алексей Николаевич, кандидат технических наук, доцент, заместитель директора центра авиатопливообеспечения и аэропортовой деятельности, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, privalenko_AN@gosniiga.ru

Морозова Наталья Валерьевна, заместитель начальника испытательной лаборатории, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, lab.gsm@gosniiga.ru

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

Горская Наталья Владимировна, научный сотрудник испытательной лаборатории, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, lab.gsm@gosniiga.ru

Authors information

Privalenko Alexey N., Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Deputy Director of the Center for Aviation Fuel Supply and Airport Activities, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, privalenko_AN@gosniiga.ru

Morozova Natalia V., Deputy Head of the Test Laboratory, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, lab.gsm@gosniiga.ru

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

Gorskaya Natalya V., Researcher of the Test Laboratory, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, lab.gsm@gosniiga.ru

Статья поступила в редакцию 30.06.2025; одобрена после рецензирования 08.08.2025 ; принята к публикации 16.08.2025.

The article was submitted 30.06.2025; approved after reviewing 08.08.2025; accepted for publication 16.08.2025.

Научная статья
УДК 656.7.052

ОЦЕНКА ФАКТИЧЕСКИХ НАВИГАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ТОЧНОСТИ САМОЛЁТОВОЖДЕНИЯ В ЗОНЕ ОТВЕТСТВЕННОСТИ СИСТЕМЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ ПО ИНФОРМАЦИИ ЕЁ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ

В. Б. СПРЫСКОВ¹, Е. В. ШУВАЛОВА², С. В. КУЗНЕЦОВ¹

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

² ООО «Антей», Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены характеристики точности самолётовождения, основанные на навигации (PBN). В любой зоне ответственности обслуживания воздушного движения (ОВД) применяют минимальные интервалы горизонтального эшелонирования, основанные на расстоянии и/или минимальные интервалы горизонтального эшелонирования, основанные на времени. Для обеспечения безопасности применения указанных интервалов должны выполняться минимальные требования к фактическим характеристикам системы наблюдения ОВД, в том числе требования к точности определения координат воздушного судна (ВС). Это известная задача ОВД, и существует положительная практика её решения. Менее известной задачей является оценивание фактического навигационного параметра точности самолётовождения в зоне ответственности ОВД, без которого невозможно вычислить полный риск катастроф ВС при применении установленных минимумов горизонтального эшелонирования в ситуациях отказов составных частей связи, навигации, наблюдения и автоматизации обслуживания воздушного движения. Предложен и обоснован способ оценивания параметров PBN на основе анализа информации наблюдения.

Ключевые слова: аэронавигация, точность навигации, обслуживание воздушного движения, система наблюдения ОВД, отказ связи, отказ навигации, отказ наблюдения обслуживания воздушного движения, отказ автоматизации обслуживания воздушного движения, фактическая траектория полёта ВС, среднеквадратическое нецентрированное отклонение

Для цитирования: Спрысков В. Б., Шувалова Е. В., Кузнецов С. В. Оценка фактических навигационных параметров точности самолётовождения в зоне ответственности системы обслуживания воздушного движения по информации её системы наблюдения // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 51. С. 35–42.

ASSESSMENT OF ACTUAL NAVIGATION PARAMETERS OF AIRCRAFT NAVIGATION ACCURACY IN THE AREA OF RESPONSIBILITY OF THE AIR TRAFFIC SERVICE SYSTEM BASED ON INFORMATION FROM ITS SURVEILLANCE SYSTEM

V. B. SPRYSKOV¹, E. V. SHUVALOVA², S. V. KUZNETSOV¹

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

² LLC “Antey”, Moscow, Russia

Abstract. The paper examines the accuracy characteristics of aircraft navigation based on navigation systems. In any air traffic service (ATS) responsibility area, minimum horizontal separation intervals based on distance and/or time are applied. To ensure the safety of linear separation intervals, minimum requirements for the actual performance of the ATS surveillance system must be met, including requirements for the accuracy of aircraft position determination. This is a well-known ATS task, and there is proven experience in solving it. A less-known task is assessing the actual navigation performance parameter of aircraft navigation within the ATS responsibility area. Without this assessment, it is impossible to calculate the total risk of aircraft catastrophes when applying established minimum horizontal separation intervals in cases of failures in communication, navigation, surveillance, and air traffic management automation components. A method for evaluating PBN parameters based on surveillance data analysis is proposed and justified.

Keywords: air navigation, navigation accuracy, air traffic services, air traffic control surveillance system, communication failure, navigation failure, surveillance failure, air traffic management failure, actual flight trajectory of an aircraft, root mean square unbiased deviation

For citation: Spryskov V. B., Shuvalova E. V., Kuznetsov S. V. Assessment of actual navigation parameters of aircraft navigation accuracy in the area of responsibility of the air traffic service system based on information from its surveillance system. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2025, no. 51, pp. 35–42. (In Russ.)

Введение

При использовании минимальных интервалов горизонтального эшелонирования, основанных на времени¹, главным требованием является обеспечение самолётовождения в зоне с навигационными спецификациями не хуже заданных [1]. Тема навигации, основанной на характеристиках (PBN), появилась более 50 лет назад и хорошо изучена. На практике некоторая часть воздушного пространства после проведённых организационно-технических мероприятий объявляется пригодной для полётов ВС, удовлетворяющих определённой навигационной характеристике PBN. При этом подразумевается, что реальная навигационная характеристика будет не хуже. Однако фактические навигационные параметры самолётовождения в зоне ответственности ОВД остаются неизвестными. Требуется разработать подход к оценке фактических навигационных параметров точности самолётовождения в зоне ответственности системы обслуживания воздушного движения.

Описание навигационных параметров точности самолётовождения в зоне ответственности системы ОВД и дополнительное требование для их определения помимо наличия информации наблюдения

При полётах в океаническом, удалённом воздушном пространстве, по маршруту и в районе аэродрома навигационные спецификации обозначают либо RNP X, либо RNAV X [2]. В этих спецификациях «X» указывает на точность навигации в морских милях (м.м.), которая должна выдерживаться, по крайней мере, в течение 95 % полётного времени всеми ВС в пределах рассматриваемого воздушного пространства. Точность боковой навигации этим определением задаётся следующим образом.

Пусть $f_{NAV}(y, \sigma_y)$ – плотность вероятностей погрешностей выдерживания линии заданного пути (ЛЗП) в направлении (координата y), перпендикулярном ЛЗП; σ_y – среднеквадратическое отклонение погрешностей выдерживания ЛЗП ($\sigma_y = \sqrt{D_y}$), или точность боковой навигации.

¹ Федеральные правила использования воздушного пространства Российской Федерации: Приложение к Постановлению Правительства Российской Федерации от 11 марта 2010 г. № 138.

Тогда значение точности полностью определяется выражением

$$\int_{-X}^{+X} f_{\text{NAV}}(y; \sigma_y) dy = 0,95, \quad (1)$$

где X – числовой параметр спецификаций RNP X или RNAV X .

Определить величину σ_y из выражения (1) невозможно без задания аналитического описания функции $f_{\text{NAV}}(y, \sigma_y)$.

Пусть она описывается плотностью распределения Гаусса (G):

$$f_{\text{NAV}}(y; \sigma_y) = f_G(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right).$$

Тогда выражение (1) определяет параметр σ_y в виде [3]:

$$\sigma_y = \frac{X}{1,96} \text{ [м.м]} = \frac{X \cdot 1,852}{1,96} \text{ [км]}. \quad (2)$$

Пусть теперь $f_{\text{NAV}}(y, \sigma_y)$ описывается как двусторонняя экспоненциальная плотность (DE):

$$f_{\text{NAV}}(y; \sigma_y) = f_{\text{DE}}(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(-\frac{\sqrt{2}}{\sigma_y}|y|\right). \quad (3)$$

Тогда выражение (3) согласно (1) определяет параметр σ_y в виде [5, 6]:

$$\sigma_y = -\frac{\sqrt{2} \cdot 1,852}{\ln 0,05}. \quad (4)$$

В формулах (2) и (4) параметр σ_y выражен в километрах, а параметр X безразмерный.

Плотности вероятностей

$$f_G(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right), \quad f_{\text{DE}}(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(-\frac{\sqrt{2}}{\sigma_y}|y|\right)$$

навигационных отклонений по координате y ВС от ЛЗП, хотя и удовлетворяют определению точности навигации (1) при соблюдении условий (2) и (4), но обладают различными свойствами. Величины DE плотности существенно превосходят значения G плотности при больших значениях аргумента y . Поэтому на основе DE плотности, как правило, выполняют расчёты рисков столкновений ВС в горизонтальной плоскости, связанных с навигационным фактором. Для большинства других задач, связанных с учётом навигационного фактора, используют нормальную плотность (G).

Для плотностей $f_G(y)$ и $f_{\text{DE}}(y)$ существует правило: для любого значения X из выражения (1) при соблюдении условий (3) и (5) справедливы следующие утверждения:

$$\begin{aligned} f_{\text{DE}}(y) &> f_G(y), \text{ если } |y| \leq y_1 \text{ или } |y| \geq y_2; \\ f_G(y) &> f_{\text{DE}}(y), \text{ если } y_1 < |y| < y_2; \\ y_1 &= 0,4824X \text{ [км]}; \\ y_2 &= 2,4065X \text{ [км]}. \end{aligned} \quad (5)$$

$$(6)$$

Формулы (5) и (6) не требуют дополнительных корректировок, так как перевод из морских миль в километры учтён при выводе коэффициентов 0,4824 и 2,4065.

На рис. 1 представлены навигационные плотности $f_G(y)$ и $f_{DE}(y)$, которые соответствуют спецификациям RNP 2, RNP 4 или RNAV 2, RNAV 4.

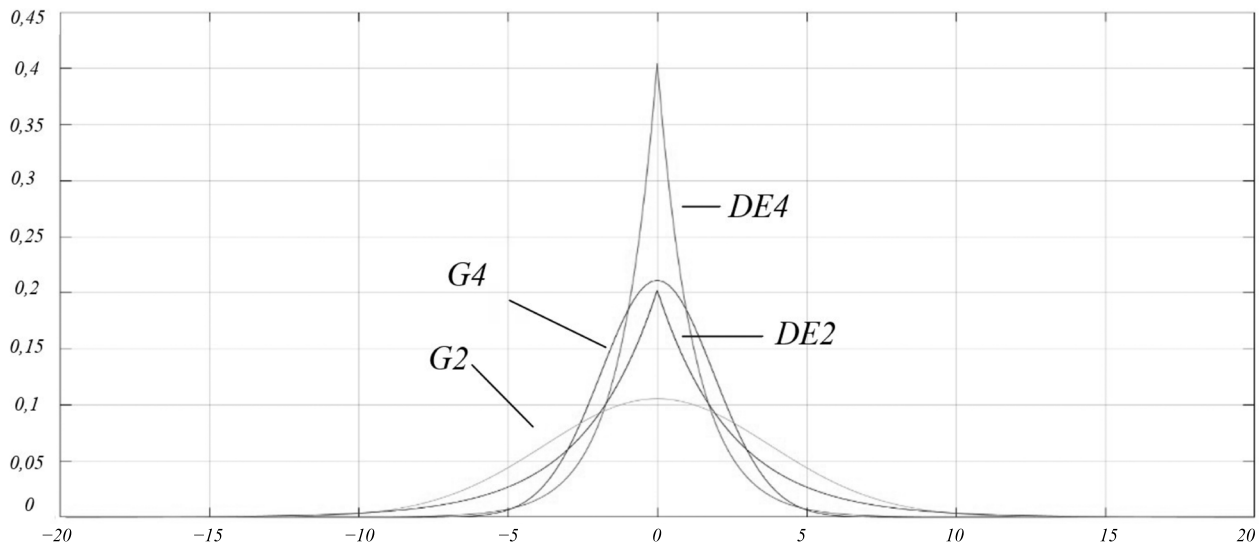


Рис. 1. Графики плотностей $f_G(y)$ и $f_{DE}(y)$, соответствующие навигационным спецификациям RNP 2 (RNAV 2) и RNP 4 (RNAV 4)

Исторически в международной гражданской авиации существовал подход, при котором наиболее широко используемым методом определения требуемой навигационной возможности характеристики (RNP X) является обязательное наличие на борту ВС и на земле определённого оборудования. Однако более 30 лет назад ИКАО установила, что навигационные возможности и навигационные характеристики являются разными параметрами, а планирование воздушного пространства, обеспечение безопасности полётов и другие функции организации воздушного движения зависят от фактических параметров навигации, а не от заложенных в структуру (конструкцию) воздушного пространства возможностей [3–5]. Поэтому параметр точности σ_y надо измерять, а не конструировать.

При наличии информации системы наблюдения ОВД в некоторой зоне ответственности достаточным условием для реализации процесса измерения σ_y является накопление значений фактических траекторий полётов ВС относительно ЛЗП, определяемой частью ортодромии между исходной точкой маршрута (ИПМ) и конечной точкой маршрута (КПМ).

Информация системы наблюдения ОВД определяет в горизонтальной плоскости фактическую траекторию полёта ВС, координаты широты (φ) и долготы (λ). ИПМ (φ_1, λ_1) и КПМ (φ_2, λ_2) задают идеальную траекторию полёта, а невязки между фактической траекторией и ЛЗП позволяют оценивать фактические навигационные отклонения от ЛЗП и количество (в %) полётного времени, в течение которого поток ВС находится внутри границ $\pm X$, как того требуют навигационные спецификации.

Оценка навигационных невязок по данным информации системы наблюдения ОВД

Высокая точность и большая частота измерений положения ВС современными системами наблюдения ОВД дают возможность соответственно точно и часто измерять навигационные невязки. Максимальная частота определения навигационных невязок может быть равна частоте определения координат ВС системой наблюдения. Максимальная точность определения навигационной невязки может совпадать с точностью системы наблюдения ОВД. Однако навигационные невязки не оценивают в момент изменения положения ВС, в основном по двум причинам:

- для момента времени измерения горизонтальной координаты ВС системой наблюдения ОВД не определено идеальное положение ВС на ЛЗП, и, следовательно, отсутствует возможность вычислить навигационное отклонение конкретного ВС;

- для разных траекторий полёта ВС система наблюдения измеряет горизонтальные координаты в разное время, и, следовательно, отсутствует возможность контроля навигационных отклонений всех ВС, выполняющих полёты в пределах рассматриваемой зоны ответственности ОВД, как того требует [3].

Традиционно навигационные невязки фиксируют в специальных точках (сечениях) на ЛЗП, например, как описано в [6]. При пролёте ВС с каждым сечением относительно ЛЗП может быть связана одна навигационная погрешность. При пролёте M раз относительно одной и той же ЛЗП в каждом сечении могут быть вычислены M навигационных погрешностей.

Для статистического оценивания точности навигации выбирают несколько ЛЗП, относительно которых фиксируют практически все полёты ВС, тем самым обеспечивая достоверный контроль точности самолётовождения в рассматриваемом воздушном пространстве.

Сечения ЛЗП, в которых оцениваются навигационные отклонения от ЛЗП, расположены на ЛЗП через равные расстояния.

Для определения значений (φ, λ) в сечениях ЛЗП поступают следующим образом:

- определяют линейное расстояние между точками ИПМ и КМП ЛЗП по координатам (φ_1, λ_1) и (φ_2, λ_2) , для этого вначале вычисляют длину дуги ортодромии между ИПМ и КМП, используя известное соотношение [7]:

$$\cos(S) = \sin\varphi_1 \sin\varphi_2 + \cos\varphi_1 \cos\varphi_2 \cos(\lambda_2 - \lambda_1). \quad (7)$$

где S – угловая длина ортодромии. Чтобы получить длину дуги ортодромии в километрах, необходимо выразить S в минутах дуги и умножить на коэффициент сферы В. В. Каврайского, равный 1,853:

$$S_{xy} = 60 \arccos(\cos(S)) \cdot 1,853; \quad (8)$$

- назначают расстояние ΔS_{xy} между сечениями ЛЗП, исходя из конкретных условий сбора информации о навигационных погрешностях выдерживания ЛЗП;

- определяют приращения (в градусах, deg) широты и долготы конкретной ЛЗП, заданной точками (φ_1, λ_1) и (φ_2, λ_2) , на 1 км пути по дуге ортодромии:

$$\Delta\varphi_{ЛЗП} = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{S_{xy}} \left[\frac{\text{deg}}{\text{км}} \right]; \quad \Delta\lambda_{ЛЗП} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{S_{xy}} \left[\frac{\text{deg}}{\text{км}} \right];$$

- определяют число N особых точек (сечений) ЛЗП, в которых будут собираться навигационные отклонения потока ВС относительно рассматриваемой линии и координаты сечений:

$$\begin{aligned} N &= \lfloor S_{xy} / \Delta S_{xy} \rfloor; \\ \varphi_{bet}(i) &= \varphi_1 + i \Delta S_{xy} \Delta\varphi_{ЛЗП}; \\ \lambda_{bet}(i) &= \lambda_1 + i \Delta S_{xy} \Delta\lambda_{ЛЗП}; \\ i &= 1, N, \end{aligned}$$

где $\lfloor \rfloor$ означает целую часть (антье); $\varphi_{bet}(i), \lambda_{bet}(i)$ – координаты i -го сечения рассматриваемой ЛЗП;

- вычисляют N значений путевых углов $\beta_{bet}(i)$ ортодромии в точках $\varphi_{bet}(i)$, используя формулу [5]:

$$\operatorname{ctg}(\beta_{bet}(i)) = \cos \varphi_{bet}(i) \operatorname{tg} \varphi_2 \operatorname{cosec}(\lambda_2 - \lambda_{bet}(i)) - \sin \varphi_{bet}(i) \operatorname{ctg}(\varphi_2 - \varphi_{bet}(i)), \quad i = \overline{1, N};$$

- вычисляют линейную боковую невязку между ЛЗП (некоторым сечением ЛЗП) и фактической траекторией полёта ВС, существующей в виде дискретных измерений координат ВС относительно ЛЗП; для этого для каждого сечения ЛЗП находят такую пару измеренных системой наблюдения ОВД точек траектории полёта ВС, для долгот $\lambda(j)$, $\lambda(j+1)$ которых справедливо неравенство:

$$\lambda(j) < \lambda_{bet}(i) < \lambda(j+1).$$

Рассчитывают среднюю для $\lambda(j)$, $\lambda(j+1)$ измеренную долготу траектории полёта и, соответственно, среднюю широту траектории полёта для этих точек:

$$\lambda_{cp}(j) = \frac{\lambda(j) + \lambda(j+1)}{2};$$

$$\varphi_{cp}(j) = \frac{\varphi(j) + \varphi(j+1)}{2}.$$

Оценивают линейное расстояние $\Delta y(i)$ между точками $(\varphi_{cp}(i), \lambda_{cp}(i))$ и $(\varphi_{bet}(i), \lambda_{bet}(i))$, вычисляя его по формулам (7) и (8).

Наконец, вычисляют проекцию $y_{NAV}(i)$ величины $\Delta y(i)$ на направление на север (истинный), перпендикулярное к ЛЗП в точке с координатами $\varphi_{bet}(i)$, $\lambda_{bet}(i)$:

$$y_{NAV}(i) = \Delta y(i) \cos(90^\circ - \beta_{bet}(i)); \quad i = \overline{1, N}.$$

Пример расчёта навигационных погрешностей

Для описания примера используем часть измеренной системой наблюдения аэропорта Внуково траектории захода на посадку. В качестве ЛЗП выберем ортодромию, построенную для точек ИПМ с координатами $(\varphi_1 = 55,56^\circ, \lambda_1 = 32,31^\circ)$, и КМП с координатами $(\varphi_2 = 55,95^\circ, \lambda_2 = 37,44^\circ)$. Линейная длина дуги заданной ортодромии равна $S_{xy} = 151,4795$ км. Измеренная системой наблюдения ОВД траектория полёта ВС и её ЛЗП показаны на рис. 2.

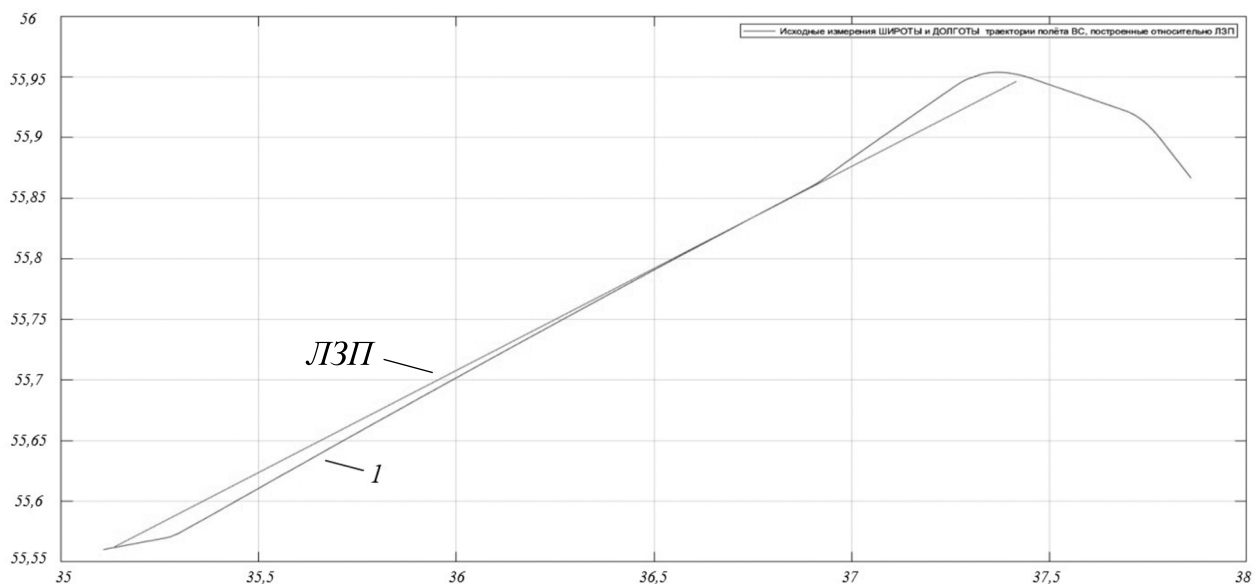


Рис. 2. Фактическая траектория 1 полёта ВС и ЛЗП, для которых были получены оценки (1) точности навигации по данным системы наблюдения

Выполним для представленной измеренной траектории полёта ВС относительно ЛЗП расчёты величины среднеквадратического нецентрированного отклонения (rms_n) для различных значений ΔS_{xy} , N . Результаты представлены в таблице.

Оценка rms_n для траектории полёта ВС относительно ЛЗП, представленной на рис. 2

ΔS_{xy} [км]	0,25	0,5	1,0	5,0	10,0	15,0
N	605	302	151	30	15	10
rms_n , [км]	1,0747	1,0716	1,0714	1,0987	1,0775	1,0535

Анализ таблицы показывает, что увеличение расстояний между сечениями на ЛЗП и, как следствие, уменьшение числа сечений ЛЗП, которые предназначены для накопления навигационных отклонений при полётах ВС относительно ЛЗП, практически не влияет на величину rms_n . Поэтому нет особого смысла выбирать микроскопические масштабы (применительно для полётов ВС) для расстояний ΔS_{xy} при проведении работ по сбору значений навигационных отклонений.

Заключение

Разработаны основы использования информации систем наблюдения ОВД для оценки фактических параметров точности навигации.

Во всех случаях, когда решается задача определения фактической точности системы наблюдения ОВД, может быть решена задача оценки фактической точности навигации.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. ИКАО Doc 4444 ATM/501. Правила аэронавигационного обслуживания. Организация воздушного движения. Изд.16. ИКАО, 2016. 546 с.
2. ИКАО Doc 9613. Руководство по навигации, основанной на характеристиках (PBN). Изд. 5. ИКАО, 2023. 468 с.
3. ИКАО Doc 9689 AN/953. Руководство по методике планирования воздушного пространства для определения минимумов эшелонирования. Изд. первое с поправкой № 1. ИКАО, 2002. 230 с.
4. ИКАО Cir 319 AN/181. Единые принципы моделирования риска столкновения в обоснование Руководства по методике планирования воздушного пространства для определения минимумов эшелонирования (Doc 9689). ИКАО, 2009. 74 с.
5. ИКАО Cir 120-AN/89/2. Методика определения минимумов эшелонирования, применяемых для разделения параллельных линий пути в структурах маршрутов ОВД. Издание второе. ИКАО, 1976. 274 с.
6. Справочник лётчика и штурмана / под редакцией В. М. Лавского. Москва: Воениздат. 1974. 511 с.
7. Спрысков В. Б., Шувалова Е. В., Кузнецов С. В. Оценка точности определения горизонтальных координат воздушных судов системой наблюдения обслуживания воздушного движения // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2024. № 48. С. 146–154.

References

1. ICAO Doc 4444 ATM/501. Procedures for air navigation services. Air traffic Management. ICAO, Sixteenth Ed., 2016, 502 p.

2. ICAO Doc 9613. Performance-based Navigation (PBN) Manual. Fifth Ed., ICAO, 2023, 398 p.
3. ICAO Doc 9689 AN/953. Manual on airspace planning methodology for the determination of separation minima. First ed., 1998, 205 p.
4. ICAO Cir 319 AN/181. A unified Framework for Collision Risk Modelling in Support of the Manual on Airspace Planning Methodology for the Determination of Separation Minima (Doc 9689). ICAO, 2009, 70 p.
5. ICAO Cir 120-AN/89/2. Methodology for the derivation of separation minima applied to the spacing between parallel tracks in ATS route structures. Sec. Ed., ICAO, 1976, 270 p.
6. *Pilot and navigator directory*. Ed. V. M. Lavsky, Moscow, Voenizdat SSSR Publ., 1974, 511 p. (In Russ.)
7. Spryskov V. B., Shuvalova E. V., Kuznetsov S. V. Assessment of the accuracy of determination of horizontal coordinates of aircraft by surveillance system air traffic service. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2024, no. 48, pp. 146 –154. (In Russ.)

Информация об авторах

Спрысков Владимир Борисович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, spryskov_vb@gosniiga.ru

Шувалова Екатерина Викторовна, заместитель генерального директора, ООО «Антей», Москва, Россия, shuvalova_e.v@mail.ru

Кузнецов Сергей Вадимович, начальник отдела – директор ЦСТО, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, kuznetsov_sv@gosniiga.ru

Authors information

Spryskov Vladimir B., Doctor of Sciences (Engineering), Chief Scientific Officer, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, spryskov_vb@gosniiga.ru

Shuvalova Ekaterina V., Deputy Director, LLC “Antey”, Moscow, Russia, shuvalova_e.v@mail.ru

Kuznetsov Sergei V., Head of Department – Director of CAET, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, kuznetsov_sv@gosniiga.ru

Статья поступила в редакцию 25.07.2025; одобрена после рецензирования 28.08.2025; принята к публикации 05.09.2025.

The article was submitted 25.07.2025; approved after reviewing 28.08.2025; accepted for publication 05.09.2025.

Научная статья
УДК 656.7.052

ПОГРЕШНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАКТИЧЕСКОГО ПОЛОЖЕНИЯ ВОЗДУШНОГО СУДНА И ПЛОТНОСТЬ ВЕРОЯТНОСТИ, ОЦЕНЁННАЯ ПОСРЕДСТВОМ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРЕННЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

В. Б. СПРЫСКОВ¹, Е. В. ШУВАЛОВА², С. В. КУЗНЕЦОВ¹, И. Н. КОРМИЛИЦЫНА¹

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

² ООО «Антей», Москва, Россия

Аннотация. Рассмотрены аспекты теоретического описания погрешности измерения фактического положения воздушного судна (ВС), понимаемой как величина разности между измеренной величиной фактического положения ВС и значением его истинного положения. В авиации погрешность измерения положения ВС рассматривается как непрерывная случайная величина, имеющая либо распределение Гаусса (G), либо связанное с распределением Гаусса засорённое гауссовское распределение (G_G). Однако любая попытка формализовать плотность вероятности погрешностей измерения фактического положения ВС посредством статистической обработки измеренных погрешностей приводит к тому, что предпочтительными оказываются плотности с признаками двустороннего экспоненциального распределения (DE). Настоящее исследование объясняет такую метаморфозу и даёт рекомендации по выбору для описания погрешности измерения фактического положения плотности Гаусса или плотности DE.

Ключевые слова: аэронавигация, точность наблюдения, обслуживание воздушного движения, система наблюдения ОВД, фактическое положение, истинное положение, плотность вероятности погрешностей

Для цитирования: Спрысков В. Б., Шувалова Е. В., Кузнецов С. В., Кормилицына И. Н. Погрешности определения фактического положения воздушного судна и плотность вероятности, оценённая посредством статистической обработки измеренных погрешностей // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 51. С. 43–49.

ERRORS IN DETERMINING THE ACTUAL POSITION OF AN AIRCRAFT AND PROBABILITY DENSITY ASSESSED THROUGH STATISTICAL PROCESSING OF MEASURED ERRORS

V. B. SPRYSKOV¹, E. V. SHUVALOVA², S. V. KUZNETSOV¹, I. N. KORMILITSYNA¹

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

² LLC “Antey”, Moscow, Russia

Abstract. The error in measuring the actual position of an aircraft (AC) is defined as the difference between the measured value of the aircraft’s actual position and its true position. In aviation, the error in measuring the aircraft’s position is considered a continuous random variable that follows either a Gaussian distribution (G) or a contaminated Gaussian distribution (G_G) associated with the Gaussian distribution. However, any attempt to formalize the probability density of errors in measuring the actual position of an aircraft through statistical

processing of the measured errors shows that the best indicators for the density are those with characteristics of a double-exponential distribution (DE). This study explains such a transformation and provides recommendations on when to use a Gaussian density description for the measurement error of the actual position and when to use a DE density description.

Keywords: air navigation, navigation accuracy, air traffic services, air traffic control surveillance system, actual position, true position, error probability density

For citation: Spryskov V. B., Shuvalova E. V., Kuznetsov S. V., Kormilitsyna I. N. Errors in determining the actual position of an aircraft and probability density assessed through statistical processing of measured errors. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2025, no. 51, pp. 43–49. (In Russ.)

Введение

В 60-х годах XX века в аэронавигационной науке сформировалось понимание связи навигационных отклонений ВС от плановых траекторий полёта с риском их столкновения при выполнении полётов по близко расположенным маршрутам. В этой связи возникло понимание научно обоснованного сокращения расстояний между маршрутами полётов ВС при сохранении высокого приемлемого уровня безопасности полётов, если обосновать величину целевого уровня риска катастроф и использовать при расчётах фактические плотности вероятности навигационных отклонений и другие фактические параметры воздушного движения. К началу 70-х годов XX столетия был предложен приемлемый уровень безопасности воздушного движения в регионе Северной Атлантики (NAT), который соответствовал одному столкновению ВС по причине потери бокового эшелонирования за 200 лет полётов в NAT. В дальнейшем этот уровень риска катастроф распространили на другие регионы ИКАО и затем неоднократно уменьшали. Первые сборы данных об отклонениях от плановых траекторий и их статистическая обработка показали, что гистограммы фактических отклонений имеют существенно более «тяжёлые» оценки частот в областях больших отклонений от планового положения по сравнению с частотами от плотности Гаусса. Сформировалось понимание парадокса, который заключался в том, что отклонения гауссовской случайной величины при любом эксперименте по их сбору и статистической обработке проявляли себя как не гауссовская статистическая плотность вероятности отклонений. Объяснение было найдено в 1979 году D. A. Hsu [1]. Настоящая статья описывает механизм появления DE (двусторонней экспоненциальной) плотности навигационных отклонений при статистической обработке гауссовских отклонений. Практические аспекты применения DE плотности распределения случайных величин в аэронавигации описаны, например, в [2].

Плотности вероятности погрешности измерения положения ВС, измеренные посредством использования информации АЗН-В и формализованные на основе статистической обработки погрешностей ВС в момент касания ВПП

Погрешности измерения положения ВС в горизонтальной плоскости, полученные посредством широкополосного автоматически зависящего наблюдения (АЗН-В), хорошо изучены и описаны, например, в [3, 4]. В [3] они описаны как гауссовские, с крайне маловероятным гауссовским засорением, имеющим большую дисперсию. Документ [4] предписывает сравнивать погрешности АЗН-В и многопозиционной системы наблюдения (МПСН) с погрешностями эталонного радиолокатора [3, 4], имеющего плотность вероятности погрешности типа G_G .

В отчёте по результатам выполнения научно-исследовательской работы [5] решалась задача оценки погрешностей определения местоположения разных приёмников GPS, размещённых на разных ВС. Идея проведения таких измерений появилась при анализе данных АЗН-В на этапе посадки. Выяснилось, что траектории ВС, осуществляющих заходы на посадку, отображаются

на индикаторе воздушной обстановки диспетчера посадки параллельными оси ВПП линиями. На основании того факта, что ВС совершают успешные посадки практически на ось ВПП, можно оценивать погрешность измерения АЗН-В координаты ВС в боковом направлении, принимая за истинное положение ВС ось ВПП.

Всего было зафиксировано 9393 отклонения от оси ВПП за один месяц 2015 года на торцах RWY 14R/32L и RWY 14L/32R аэропорта Домодедово. Статистическую плотность распределения аппроксимировали теоретическими плотностями G, DE, DE-DE. При выборе наилучшего варианта аппроксимации использовали среднеквадратический критерий согласия. В результате обработки 9393 отклонений от оси ВПП для всех параметров качества целостности (Navigation Integrity Category – NIC) от 0 до 11 наилучший результат при аппроксимации показала теоретическая плотность DE-DE с параметрами: $\alpha=0,37$; $\lambda_1=5,3$ м; $\lambda_2=1130$ м, где α – параметр масштаба ($\alpha > 0$), а λ – параметр сдвига ($-\infty < \lambda < +\infty$).

После того, как из общей выборки выделили ВС с удовлетворяющими минимальными требованиями $NIC \geq 4$, наилучшей теоретической плотностью стала плотность DE-DE с параметрами: $\alpha=0,27$; $\lambda_1=1,8$ м; $\lambda_2=29$ м.

Статистическая плотность боковой составляющей погрешности определения координат ВС и её аналитическая аппроксимация для ВС, удовлетворяющим значениям категории навигационной целостности $NIC \geq 4$, графически изображены в [5, рис. 103].

Полученный результат [5] привёл к выводу о том, что погрешность определения пространственного положения ВС системой наблюдения на основе АЗН-В является не гауссовской, а двусторонней экспоненциальной.

Плотности вероятности погрешностей измерения фактического положения ВС в вертикальной плоскости, полученные в процессе мониторинга безопасности полётов ВС в пространстве с сокращёнными интервалами вертикального эшелонирования (RVSM)

В документах ИКАО [6–8] указано, что погрешности измерения фактического положения ВС в вертикальной плоскости, известные как погрешности высотомеров (ASE), имеют гауссовские плотности. Мониторинг безопасности полётов ВС в пространстве с RVSM призван измерять эти погрешности пространственного положения ВС и оценивать статистически их параметры, в том числе формализовать плотности вероятностей погрешностей для ВС с типовым оборудованием стабилизации высоты полёта. В исследованиях [9, 10] представлены плотности вероятностей погрешностей высотомеров для ВС различных мониторинговых групп. В тех случаях, когда количество измеренных погрешностей не превосходит 10, их плотность аппроксимирована плотностью Гаусса. Если количество измеренных погрешностей более 10, плотность вероятности аппроксимируется смешанным распределением с обязательным присутствием DE распределения.

DE плотность вероятности погрешностей измерения пространственного положения ВС как возможная форма предельной смеси гауссовских погрешностей

Теоретическое обоснование типа смешивания гауссовских погрешностей для получения смешанной плотности в форме DE

Пусть плотность вероятности непрерывной случайной величины $f(x; \theta)$ зависит от параметра $\theta \geq 0$. Распределение, образуемое интегрированием по параметру θ , является смешанным, и его плотность записывается как:

$$p(x, \theta) = \int_0^{\infty} f(x; \theta) h(\theta) d\theta. \quad (1)$$

где $h(\theta)$ – плотность смешивания.

В работе [1] Hsu D. A. доказал, что если

$$\begin{cases} f(x; \sigma^2) = G(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right); \\ h(\sigma^2) = \frac{1}{2\lambda^2} \exp\left(-\frac{\sigma^2}{2\lambda^2}\right), \end{cases}$$

где параметр сдвига $\lambda > 0$; σ – стандартное отклонение, $0 < \sigma^2 < \infty$, то смешанная плотность (1) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} p(x, \sigma^2) &= \int_0^\infty f(x; 0, \sigma^2) h(\sigma^2) d\sigma^2 = \\ &= \int_0^\infty \frac{1}{2\lambda^2\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty \frac{1}{\sigma} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2} - \frac{\sigma^2}{2\lambda^2}\right) d\sigma^2 = \frac{1}{2\lambda} \exp\left(-\frac{|x|}{\lambda}\right) = DE(x). \end{aligned} \quad (2)$$

Модель $DE(x)$ в аэронавигации получила широкое распространение главным образом из-за того, что:

- для больших по модулю значений x она описывает существенно более тяжёлые «хвосты» по сравнению с плотностями Гаусса;
- погрешности пространственного положения ВС, порождающие DE плотность, исключительно гауссовские. Они не суммируются, а накапливаются в течение длительного времени, а затем смешиваются в соответствии с экспоненциальной плотностью смешивания.

Эксперимент по формированию DE плотности вероятности погрешностей измерения положения ВС на основе смеси гауссовских плотностей с дисперсиями, имеющими экспоненциальную плотность вероятности

Пусть плотность смешивания $h(\theta)$ является плотностью дискретной случайной величины θ_k , $k=1, K$, $K \in \mathbb{R}$. Выражение смешанного распределения (1) для дискретного случая приводится к виду:

$$p_k(x) = \varepsilon_1 f(x; \theta_1) + \varepsilon_2 f(x; \theta_2) + \dots + \varepsilon_K f_k(x; \theta_k) = \sum_{k=1}^K \varepsilon_k f_k(x; \theta_k), \quad (3)$$

где $\varepsilon_k \geq 0$, $k=1, K$;

$$\sum_{k=1}^K \varepsilon_k = 1. \quad (4)$$

Плотность в форме (3) называют смесью плотностей $f_k(x; \theta_k)$.

Пусть $f_k(x; \theta_k)$ представляют собой плотности Гаусса с дисперсиями, равными θ_k , а ε_k – веса смеси плотностей Гаусса, представляющие собой вероятности, соответствующие экспоненциальной плотности распределения дисперсий θ_k в смеси (3). Для весов ε_k справедливо ограничение (4).

Пусть средняя дисперсия смеси $\bar{\theta}$ равна 4, а плотность вероятности дисперсий, участвующих в смешивании, является экспоненциальной вида

$$h(\theta) = \lambda_\theta \exp(-\lambda_\theta \theta), \quad \theta > 0, \quad (5)$$

где $\lambda_\theta^{-1} = \bar{\theta} = 4$.

Пусть диапазон дисперсий гауссовских плотностей в экспериментальной смеси равен $(0; 8\bar{\theta}=32)$. Разделим диапазон на $n_{bin}=100$ частей. Первое дискретное значение дисперсии будет равно 0,16, второе $0,16 + 0,32 = 0,48$. Последнее дискретное значение дисперсии (θ_{101}) будет равно 32,16. Размах изменений дисперсий $8\bar{\theta}$ был выбран для того, чтобы дисперсия $\bar{\theta} = 4$ попала в середину дискретного диапазона изменения дисперсий.

Веса смеси из 101 гауссовской плотности с разными дисперсиями θ_k определяют как значение плотности (5), умноженное на интервал дисперсий между точками θ_k , равный 0,32,

с последующей регуляцией. В результате всех действий получаем веса смеси ε_k , удовлетворяющие (4):

$$\sum_{k=1}^{101} \varepsilon_k = 1. \quad (6)$$

Рассмотрим формирование функций $f_k(x; \theta_k)$ модели (3). $f_k(x; \theta_k)$ представляет собой гауссовскую плотность с дисперсией, равной θ_k . При этом среднее значение дисперсий в смеси $\bar{\theta} = 4$, а сами дисперсии имеют плотность (4). Будем для получения смеси гауссовских случайных величин с дисперсиями θ_k использовать метод Монте-Карло. Зададим общее число $N=10^7$ симуляций гауссовских величин (с нулевым математическим ожиданием). Выполним $\varepsilon_1 N$ симуляций гауссовских величин с дисперсией, равной θ_1 , $\varepsilon_2 N$ симуляций гауссовских величин с дисперсией θ_2 и так далее. Наконец, выполним $\varepsilon_{101} N$ симуляций гауссовских величин с дисперсией $\theta_{101}=32,16$.

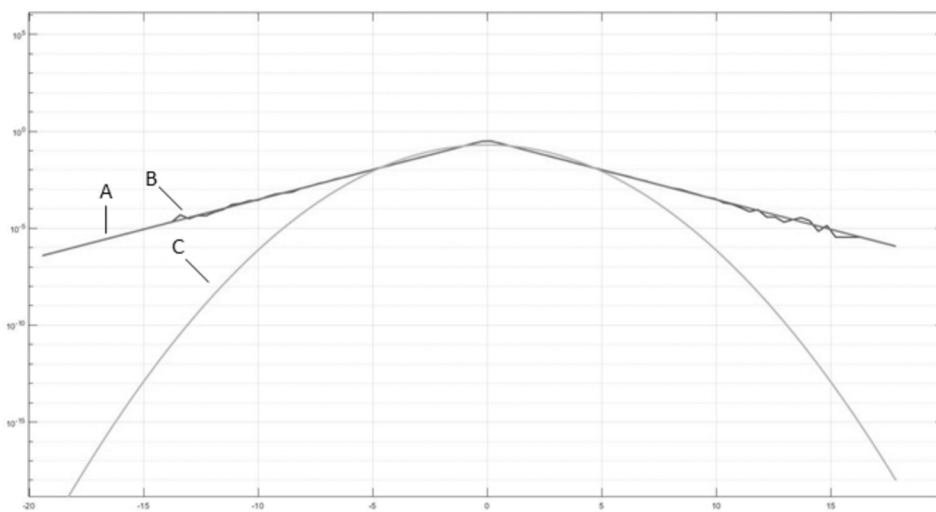
С учётом (6) очевидно, что

$$\sum_{k=1}^{101} \varepsilon_k N = 1.$$

Оценка дисперсии для N значений гауссовских симуляций совпадает с величиной $\bar{\theta} = 4$.

Построим статистическую плотность вероятности случайной величины X на массиве её значений $x_i (i=1, N)$, полученных в результате выполненных симуляций. Получим статистическую плотность, которая соответствует теоретической DE плотности [1] с параметром $\lambda = (\bar{\theta}/2)^{1/2}$.

На рисунке представлены графики теоретической и аналитической (построенной по результатам симуляции) плотностей смеси гауссовских погрешностей для $N=10^7$ и $\bar{\theta}=4$, при использовании экспоненциальной плотности распределения дисперсий смеси с параметром $\lambda_{\theta} = \bar{\theta}^{-1}$. Очевидно, плотность смеси, полученной при симуляции, совпадает с теоретической плотностью DE.



Симуляционная ($N=10^7$) и аналитическая плотности DE, построенные для $\bar{\theta} = 4$ и плотность Гаусса с дисперсией равной 4

На рисунке хорошо видно, что при смешивании гауссовских случайных величин их смесь обладает более тяжёлыми «хвостами» по сравнению с гауссовской плотностью с дисперсией, равной 4. Это явление объясняется следующими соображениями.

При формировании смеси участвовали 6173000 гауссовских величин с дисперсиями, меньшими $\bar{\theta} = 4$ и гауссовские величины с дисперсиями, не меньшими $\bar{\theta} = 4$ (3827000 значений). Среди них учитывались 770190 гауссовских случайных величин с дисперсиями, не меньшими 10, из них

67043 – с дисперсиями, не меньшими 20, из которых 2325 с дисперсиями, не меньшими 30. Именно учёт гауссовских случайных величин с большими и очень большими дисперсиями, имеющими из-за экспоненциального характера убывания значений дисперсий высокий вес в смеси гауссовских плотностей, утяжеляет «хвосты» погрешностей определения пространственного положения ВС.

Заключение

Выполненные исследования позволяют дать обоснованный ответ на вопрос, какой тип плотности следует использовать при описании погрешностей определения пространственного положения ВС.

Если в задачах обеспечения безопасности используют только что измеренные положения ВС, например, при эшелонировании, необходимо использовать гауссовские погрешности с параметром дисперсии, равном оценке дисперсии собранных ранее погрешностей пространственного положения ВС. Например, при эшелонировании ВС с использованием информации АЗН-В в районе аэродрома Домодедово нужно использовать гауссовскую плотность с дисперсией, равной 51,71904 м. кв., что соответствует дисперсии плотности DE_DE для значений категории навигационной целостности $NIC \geq 4$. Во всех случаях, когда используют статистику погрешностей, а по сути смесь погрешностей гауссовских величин с разными дисперсиями, необходимо использовать плотности на основе DE распределения и их смеси.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest

Список источников

1. Hsu D. A. Long-tailed distributions for position errors in navigation. *Journal of the Royal Statistical Society, Series C (Applied Statistics)*, 1979, vol. 28, no. 1, pp. 62–72. <https://doi.org/10.2307/2346812>
2. Сергеев А. В., Спрысков В. Б., Кузнецов С. В. Предельные вероятностные смеси навигационных ошибок при описании фактических координат воздушных судов в прикладных задачах аэронавигации // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 50. С. 20–28.
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.
4. ИКАО Cir 326 AN/188. Оценка наблюдения с использованием систем ADS-B и мультilaterации в целях обеспечения обслуживания воздушного движения и рекомендации по их внедрению. ИКАО, 2013. 46 с.
5. Проведение исследований и разработка методов обеспечения целостности функции наблюдения для различных приложений и технологий реализации АЗН-В: Отчёт о НИР. Москва: Филиал «НИИ Аэронавигации» ФГУП ГосНИИ ГА, 2015. 318 с.
6. Приложение 6 к Конвенции о международной гражданской авиации. Эксплуатация воздушных судов. Часть 1. Международный коммерческий воздушный транспорт. Самолёты. 12 изд. ИКАО, 2022. 254 с.
7. Приложение 6 к Конвенции о международной гражданской авиации. Эксплуатация воздушных судов. Часть 2. Международная авиация общего назначения. Самолёты. Изд. 11. ИКАО, 2022. 194 с.
8. ИКАО Doc 9937. Эксплуатационные правила и практика для региональных мониторинговых агентств в отношении применения минимума вертикального эшелонирования 300 м (1000 ft) между эшелонами полёта 290 и 410 включительно. Издание второе. ИКАО, 2019. 90 с.
9. *The EUROCONTROL RVSM Safety Monitoring Report 2004*. Ed. 02. European Organisation for the Safety of Air Navigation, 2004, 84 p.
10. Moek G. and Smeltink T. W. *Pre Implementation Collision Risk Assessment for RVSM in the Africa Indian Ocean Region*. NLR-CR-2005-443, National Aerospace Laboratory NLR, Amsterdam, 2005, 131 p.

References

1. Hsu D. A. Long-tailed distributions for position errors in navigation. *Journal of the Royal Statistical Society, Series C (Applied Statistics)*, 1979, vol. 28, no. 1, pp. 62–72. <https://doi.org/10.2307/2346812>
2. Sergeev A. V., Spryskov V. B., Kuznetsov S. V. Limiting probabilistic mixtures of navigation errors for describing actual aircraft coordinates in applied aeronavigation tasks. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2025, no. 50, pp. 20–28. (In Russ.)
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.
4. ICAO Cir 326 AN/188. Assessment of ADS-B and Multilateration Surveillance to Support Air Traffic Services and Guidelines for Implementation. ICAO, 2013, 42 p.
5. *Research and development of methods for ensuring the integrity of the observation function for various applications and technologies for the implementation of AZN-V: Research Report*. Moscow, Branch of “Research Institute of Air Navigation” of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, 2015, 318 p. (In Russ.)
6. Annex 6 to the Convention on International Civil Aviation. Operation of Aircraft. Part 1. International Commercial Air Transport – Aeroplanes. Twelfth Ed. ICAO, 2022, 242 p.
7. Annex 6 to the Convention on International Civil Aviation. Operation of Aircraft. Part 2. International General Aviation – Aeroplanes. Eleventh Ed. ICAO, 2022, 182 p.
8. ICAO Doc 9937. Operating Procedures and Practices for Regional Monitoring Agencies in Relation to the Use of a 300 m (1000 ft) Vertical Separation Minimum Between FL 290 and FL 410 Inclusive. Second Ed. ICAO, 2019, 82 p.
9. *The EUROCONTROL RVSM Safety Monitoring Report 2004*. Ed. 02. European Organisation for the Safety of Air Navigation, 2004, 84 p.
10. Moek G. and Smeltink T. W. *Pre Implementation Collision Risk Assessment for RVSM in the Africa Indian Ocean Region*. NLR-CR-2005-443, National Aerospace Laboratory NLR, Amsterdam, 2005, 131 p.

Информация об авторах

Спрысков Владимир Борисович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, spryskov_vb@gosniiga.ru

Шувалова Екатерина Викторовна, заместитель генерального директора, ООО «Антей», Москва, Россия, shuvalova_e.v@mail.ru

Кузнецов Сергей Вадимович, начальник отдела – директор ЦСТО, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, kuznetsov_sv@gosniiga.ru

Кормилицына Ирина Николаевна, ведущий научный сотрудник, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, kormilicina_in@gosniiga.ru

Authors information

Spryskov Vladimir B., Doctor of Sciences (Engineering), Chief Scientific Officer, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, spryskov_vb@gosniiga.ru

Shuvalova Ekaterina V., Deputy Director, LLC “Antey”, Moscow, Russia, shuvalova_e.v@mail.ru

Kuznetsov Sergei V., Head of Department – Director of CAET, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, kuznetsov_sv@gosniiga.ru

Kormilitsyna Irina N., Leading Researcher, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, kormilicina_in@gosniiga.ru

Статья поступила в редакцию 13.08.2025; одобрена после рецензирования 28.08.2025; принята к публикации 09.09.2025.

The article was submitted 13.08.2025; approved after reviewing 28.08.2025; accepted for publication 09.09.2025.

Научная статья
УДК 629.735.064.53

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

С. М. МУСИН¹, В. А. КАЛИЙ², Р. Ю. МИСЮТИН², Д. А. КОНДРАШОВ², Ю. В. ПОПОВ¹

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

² Обособленное конструкторское бюро систем электроснабжения Уфимского агрегатного
производственного объединения, Москва, Россия

Аннотация. Система электроснабжения современного воздушного судна (ВС) представляет собой комплекс систем генерирования и распределения электроэнергии, содержащий взаимодействующие (взаимно влияющие на режимы работы друг друга) электромеханические, электрические и электронные компоненты. Режим работы каждого компонента зависит от режима работы других. Ключевые требования, предъявляемые к системе электроснабжения, – высокие уровни надёжности и отказобезопасности. Для их обеспечения в составе системы предусмотрено применение ветроэнергетической установки, основным компонентом которой является электрогенератор переменного тока. Подтверждение соответствия функциональному назначению – питать приёмники электроэнергией соответствующего качества в предусмотренных режимах работы системы электроснабжения – осуществляется путём проведения полного комплекса полунатурных испытаний в соответствии с требованиями, предъявляемыми стандартами и федеральными авиационными правилами.

Ключевые слова: воздушный транспорт, самолёт, система электроснабжения, электрический генератор, электрическая машина, турбовинтовой авиационный генератор, эксплуатация авиационной техники

Для цитирования: Мусин С. М., Калий В. А., Мисютин Р. Ю., Кондрашов Д. А., Попов Ю. В. Результаты испытаний ветроэнергетической установки авиационной системы электроснабжения // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 51. С. 50–58.

TEST RESULTS OF THE WIND POWER PLANT OF THE AVIATION POWER SUPPLY SYSTEM

S. M. MUSIN¹, V. A. KALIY², R. YU. MISYUTIN², D. A. KONDRASHOV², YU. V. POPOV¹

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

² The Isolated Design Office of the Ufa Aggregate Production Association, Moscow, Russia

Abstract. Power supply system for modern aircraft is a complex of systems for generating and distributing electricity, containing electromechanical, electrical and electronic components that mutually function. The key requirements for the power supply system are high levels of reliability and failure safety. To provide them, the system includes the use of a wind power plant, the main component of which is an alternating current electric generator. Confirmation of compliance with the functional purpose: to supply the receivers with electricity of the appropriate quality in the prescribed modes of operation of the power supply system, is carried out by conducting a full set of semi-routine tests in accordance with the requirements of the standards and federal aviation regulations.

Keywords: air transport, aircraft, system of electro supply, the electric generator, the electric machine, the turbo-propeller aviation generator, operation of aircraft

For citation: Musin S. M., Kaliy V. A., Misyutin R. Yu., Kondrashov D. A., Popov Yu. V. Test results of the wind power plant of the aviation power supply system. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2025, no. 51, pp. 50–58. (In Russ.)

Введение

Система электроснабжения переменного тока ВС при эксплуатации функционирует в нормальном, частичном, ненормальном и аварийном режимах. При функционировании в аварийном режиме питание приёмников электроэнергии (потребителей) осуществляется от аварийного источника электроэнергии типа преобразователь рода электрической энергии и/или ветрогенератора, при этом необходимо обеспечивать высокий уровень надёжности и отказобезопасности источников и регуляторов электроэнергии [1].

На борту ВС широко используются синхронные генераторы электроэнергии в качестве основных и резервных источников электроэнергии. Для обеспечения безопасности полётов помимо вспомогательной силовой установки (ВСУ) на борту пассажирских ВС предусмотрено применение турбовинтовой ветроэнергетической установки, в состав которой входит бесконтактный синхронный генератор [2].

Турбовинтовая ветроэнергетическая установка предназначена для преобразования энергии набегающего потока воздуха в электроэнергию переменного трёхфазного тока номинального напряжения 115/200 В постоянной номинальной частоты 400 Гц для питания приёмников первой категории, отвечающих за безопасное завершение полёта (рис. 1).



Рис. 1. Турбовинтовая ветроэнергетическая установка

Конструкция генератора для ветроэнергетической установки

Ключевой элемент установки – синхронный электрогенератор, выполненный в бесконтактном исполнении за счёт совмещения основного генератора, осуществляющего питание приёмников (потребителей) электроэнергии, возбудителя с блоком вращающихся выпрямителей – электрической машины, предназначенной для питания индуктора основного генератора, и подвозбудителя – магнитоэлектрической машины, необходимой для питания блока управления генератором [1].

Конструкция генератора представлена на рис. 2. Генератор представляет собой трёхмашинный агрегат с воздушным охлаждением внешним набегающим потоком. Статоры трёх электрических машин размещены в едином корпусе 1. Роторы электрических машин находятся на общем валу 7, установленном на двух подшипниковых опорах. Блок вращающихся выпрямителей 12 расположен на специальной ступице, входящей в состав ротора. Данная конструкция обеспечивает исключение скользящих электрических контактов и регулирование выходного напряжения основного генератора с помощью блока управления и регулирования генератором.

Корпус генератора 1 имеет цилиндрическую форму. Выводные провода от обмотки статора основного генератора выведены в узел токоввода, в котором имеется возможность подключения генератора к бортовой сети. Воздушный винт подсоединяется к генератору посредством фланца 8.

Индуктор основного генератора 4 выполнен явнополюсным. Выводы обмотки возбуждения подсоединяются к блоку вращающихся выпрямителей.

Пакет возбудителя с якорной обмоткой 5 размещён на валу ротора, а индуктор возбудителя находится в том же корпусе, что и якорь основного генератора.

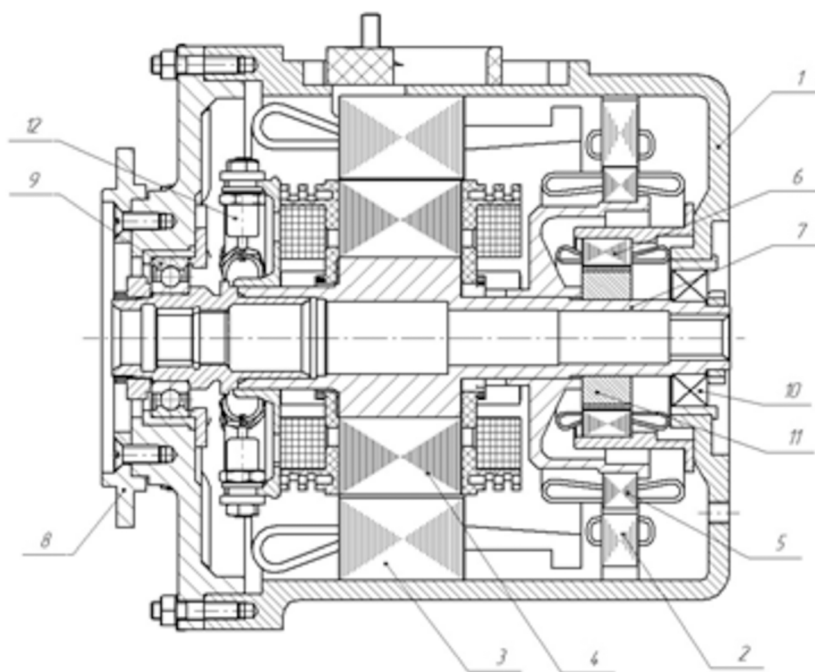


Рис. 2. Конструкция генератора электроэнергии переменного тока ГСР-15ПЧ8 ветроэнергетической установки воздушного судна RRJ-95NEW-100:

- 1 – корпус; 2 – статор возбудителя; 3 – статор основного генератора; 4 – ротор основного генератора; 5 – ротор возбудителя; 6 – статор подвозбудителя; 7 – вал; 8 – щит; 9 – передний подшипник; 10 – задний подшипник; 11 – ротор подвозбудителя; 12 – вращающийся выпрямитель

Подвозбудитель представляет собой синхронный генератор с постоянными магнитами на роторе электрической машины. Конструкция статора 6 подвозбудителя аналогична конструкции

статора возбуждителя. Ротор подвозбудителя 11 представляет собой постоянный магнит неодим-железо-бор типа «звёздочка».

Блок вращающихся выпрямителей собран по двухполупериодной схеме выпрямления из шести кремниевых диодов, обеспечивающих минимальную массу узла.

Охлаждение генератора осуществляется путём продува забортным воздухом через отверстия в корпусе и фланце. Генератор работоспособен при температуре от $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Конструкция генератора для защиты от ледяного инея имеет обмотку обогрева, которая питается от бортовой сети переменного тока номинального напряжения 115 В постоянной номинальной частоты 400 Гц в убранном положении.

Методика проектирования применяемого синхронного генератора

Предварительный проектировочный расчёт выполнялся с применением инженерных формул, представленных в работах [2–4]. Такой расчёт необходим для получения первоначальной геометрии активной зоны электрической машины.

Уточнение геометрии проводилось с применением методов конечно-элементного анализа, позволяющих снизить массу применяемых материалов и увеличить коэффициенты их использования, т. к. для авиационной техники массовые показатели применяемых компонентов играют одну из ключевых ролей [5].

Поскольку геометрия электрической машины известна, её взяли за основу формирования методики поверочного расчёта. Это необходимо для подтверждения ранее полученных результатов, а также позволяет предложить, в случае явных преимуществ, иной способ расчёта.

Преимуществом используемой методики является уменьшенное количество итераций, а следовательно, и меньшие затраты вычислительных мощностей при сохранении необходимой и достаточной точности вычислений методом, основанным на применении конечно-элементных составляющих без уравнений погрешностей. Основными величинами при описании магнитного поля электрических машин служат магнитный поток и падение магнитного напряжения. Для связи этих параметров при описании магнитной цепи необходимо использовать материальное уравнение, характеризующее свойства среды [6]:

$$d\mathbf{B}=\mu_0\mu_\gamma d\mathbf{H},$$

где $d\mathbf{B}$ – вектор магнитной индукции, Тл; μ_0 – магнитная постоянная, [Гн/м]; μ_γ – магнитная проницаемость среды; $d\mathbf{H}$ – вектор напряжённости магнитного поля, [А/м].

В общей схеме замещения магнитной цепи присутствуют линейные звенья в виде постоянных электрических сопротивлений, характеризующие участки с постоянной магнитной проводимостью, нелинейные звенья в виде переменных электрических сопротивлений, величины которых зависят от марки электротехнической стали со своей нелинейной кривой намагничивания, и источники магнитодвижущей силы в виде источников напряжений электрического тока, определяемые параметрами обмотки [6].

На рис. 3 изображена схема замещения магнитной активной зоны основного генератора отдельно для статора и ротора, составленная для применения расчёта методом зубцовых контуров с обозначениями согласно методологии КОМПАС-3D [7].

На рис. 4 представлены графики двух внешних характеристик, полученных разными способами вычислений: методом конечных элементов (МКЭ) и с помощью зубцовых контуров (МЗК). Присутствует расхождение между двумя зависимостями на $\approx 2,5\%$, что соответствует режиму холостого хода генератора.

Время расчёта активной нагрузки основного генератора с помощью МКЭ существенно превысило время расчёта способом МЗК.

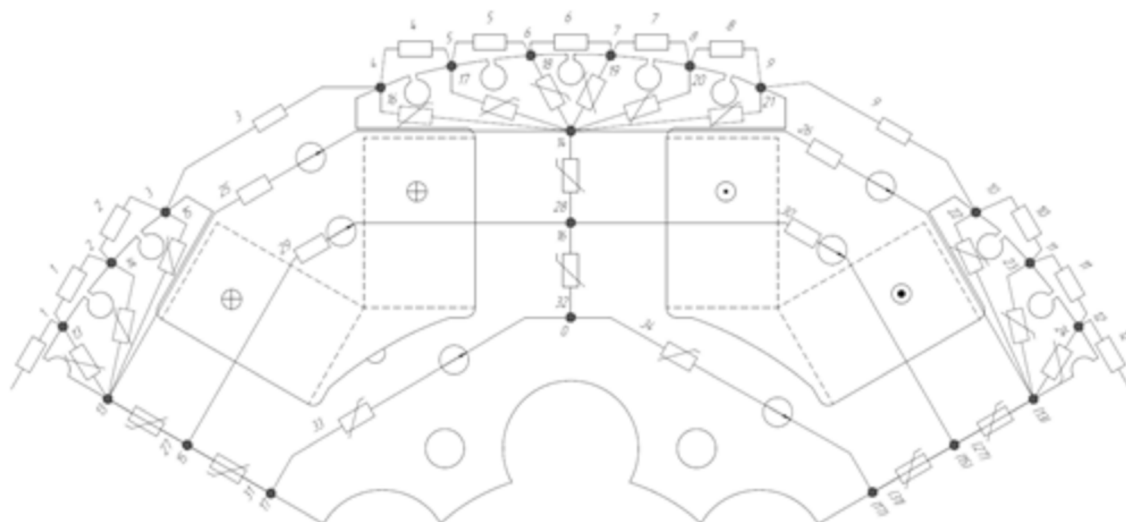


Рис. 3. Схема замещения магнитной цепи ротора основного генератора

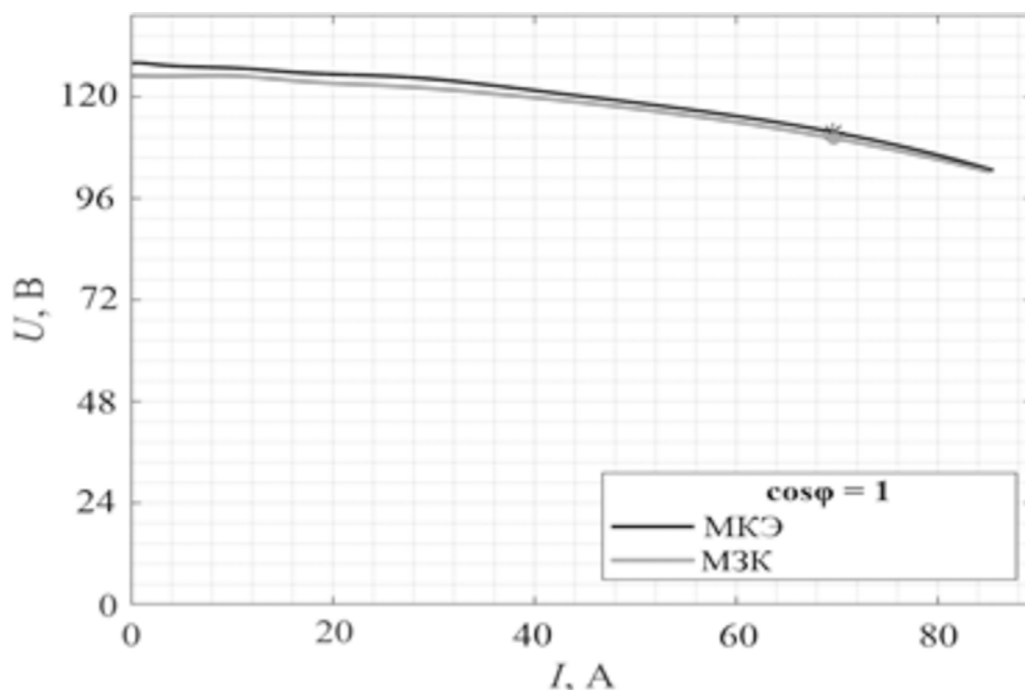


Рис. 4. Внешняя характеристика основного генератора, полученная методом конечных элементов и методом зубцовых контуров при активной нагрузке

Проведение натурных испытаний

Для подтверждения предъявляемых к изделию требований произведён полный цикл его испытаний согласно ГОСТ Р 54073-2017¹ и КТ-160G/14G². Турбовинтовая ветроэнергетическая установка соответствует требованиям, представленным в таблице.

¹ ГОСТ Р 54073-2017. Системы электроснабжения самолётов и вертолётов. Общие требования и нормы качества электроэнергии.

² Квалификационные требования КТ-160G/14G. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования (внешние воздействующие факторы – ВВФ). Требования, нормы и методы испытаний. НИИАО. Межгосударственный Авиационный Комитет. Авиационный Регистр. 2015.

Внешние воздействующие факторы на генератор электроэнергии ГСР-15ПЧ8

Характеристика ВВФ	Раздел, пункт КТ-160G/14G	Категория по КТ-160G/14G
Пониженная температура	4.5.2, 4.5.1	D2
Повышенная температура	4.5.4, 4.5.3	D2
Испытания в условиях, имитирующих отказ системы охлаждения в полёте	4.5.5	X
Высота	4.6	D2
Испытания на воздействие разгерметизации	4.6.2	D2
Испытания на воздействие повышенного давления	4.6.3	D2
Изменение температуры	5.0	A
Влажность	6.3.3	C
Ударные эксплуатационные нагрузки и безопасность разрушения	7.3.3, 7.2.1, 7.3.1	B
Вибрация	8.0	S, H
Взрывобезопасность	9.0	E
Водонепроницаемость	10.0	S
Загрязняющие жидкости	11.0	F
Песок и пыль	12.0	S
Грибоустойчивость	13.0	F
Соляной туман	14.0	S
Магнитное воздействие	15.0	B
Входное электропитание	16.0	AXX
Импульсы напряжения	17.0	A
Восприимчивость к помехам звуковой частоты по проводам питания	18.0	R
Восприимчивость к помехам индукции	19.0	ZCX
Радиочастотная восприимчивость	20.0	WG
Генерация радиочастотной энергии	21.0	M
Восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией	22.0	A4G4L4
Прямое воздействие молнии	23.0	1A1A
Обледенение	24.0	B
Электростатический разряд	25.0	A
Пожар, воспламеняемость	26.0	C

Одним из способов подтверждения соответствия изделия является проведение полунатурных испытаний в аэродинамической трубе. На испытания в высокоскоростной аэродинамической трубе (АДТ-106) предъявлялась турбовинтовая энергетическая установка мощностью 15 кВА. При испытаниях в аэродинамической трубе с помощью технологической рамы было полностью имитировано положение установки как на ВС.

При испытаниях, соответствующих высоте 460 м, осуществлялся выпуск установки в воздушный поток при ступенчатом увеличении индикаторной скорости от 0 до 600 км/ч.

Установка была выпущена при индикаторной скорости 250 км/ч. При этом время выхода на режим после расстопорения турбины составило 7 с.

Включение нагрузки генератора 15 кВА происходило при индикаторной скорости 247 км/ч (имитация потери скорости ВС при выпуске установки). При включении нагрузки и дальнейшем увеличении индикаторной скорости до 600 км/ч установившаяся частота вращения турбины варьировалась в пределах 7400–8100 об/мин. При наборе индикаторной скорости турбина стабильно держит нагрузку 15 кВА на генераторе (рис. 5).



Рис. 5. Выпуск ветроэнергетической установки и набор индикаторной скорости в рабочем диапазоне работы

При проведении испытаний, соответствующих высоте полёта 12500 м, параметры атмосферы АДТ-106 были соответствующим образом скорректированы и приведены в соответствие реальным.

Испытание проводилось при ступенчатом увеличении индикаторной скорости от 0 до 380 км/ч. При индикаторной скорости (225 ± 5) км/ч установившаяся частота вращения турбины установки составляла 8300–8400 об/мин.

Включение нагрузки генератора происходило при индикаторной скорости 280 км/ч. При включении нагрузки 15 кВА система регулирования перенастроила турбину на новую постоянную частоту вращения и удерживала её в диапазоне 8000–8400 об/мин при увеличении индикаторной скорости до 380 км/ч. При достижении индикаторной скорости значения 380 км/ч происходили переключения нагрузки в режиме 15-12-6-0-15 кВА с выдержкой на каждой нагрузке до наступления установившегося режима работы турбины, при этом система регулирования поддерживала постоянную частоту вращения турбины в диапазоне 7700–8600 об/мин (рис. 6).



Рис. 6. Переключение нагрузки при максимальной высоте полёта

Заключение

Испытания генератора электроэнергии переменного тока ГСР-15ПЧ8 ветроэнергетической установки воздушного судна RRJ-95NEW-1 на соответствие функциональному предназначению показали соответствие предъявляемым требованиям по надёжности, внешним воздействующим факторам, а также эксплуатационной технологичности.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Мисютин Р. Ю., Мусин С. М., Кондрашов Д. А. Функционирование ветродвигателя в аварийном режиме работы системы электроснабжения // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2024. № 48. С. 57–63.
2. Мусин С. М., Левин А. В., Харитонов С. А., Ковалев К. Л., Герасин А. А., Халютин С. П. Электрический самолёт: концепция и технологии. Уфа: УГАТУ, 2014. 388 с.
3. Копылов И. П., Клоков Б. К., Морозкин В. П., Токарев Б. Ф. Проектирование электрических машин. Москва: Юрайн, 2011. 767 с.
4. Бут Д. А. Основы электромеханики. Москва: МАИ, 1996. 468 с.
5. Кузнецов В. А. Универсальный метод расчёта магнитных полей и процессов электрических машин с дискретно распределёнными обмотками: автореф. дисс. д-ра техн. наук. Москва: МЭИ, 1990.
6. Ширинский С. В. Методы анализа электрических машин. Москва: МЭИ, 2017. 256 с.
7. Мякушев К. В. Современные методы расчёта электрических машин [Электронный ресурс]. URL: <http://www.https://sapr.ru/article/7241> (дата обращения: 22.03.25).

References

1. Misyutin R. Yu., Musin S. M., Kondrashov D. A. Functioning of a wind turbine in emergency operation of work of system of electrosupply of the passenger plane. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2024, no. 48, pp. 57–63. (In Russ.)
2. Musin S. M., Levin A. V., Kharitonov S. A., Khalyutin S. P. et al. *Electric aircraft: concept and technology*. Ufa, UGATU Publ., 2014, 388 p. (In Russ.)
3. Kopylov I. P., Klovov B. K., Morozkin V. P., Tokarev B. F. *Design of Electrical Machines*. Moscow: Yurayn, 2011, 767 p. (In Russ.)
4. But D. A. *Fundamentals of Electromechanics*. Moscow: MAI Publ., 1996, 468 p. (In Russ.)
5. Kuznetsov V. A. Universal method for calculating magnetic fields and processes of electrical machines with discrete distribution of windings. Abstract of the Doctoral dissertation Technical Sciences. Moscow, MPEI, 1990. (In Russ.)
6. Shirinskiy S. V. *Methods of analysis of electrical machines*. Moscow, MPEI Publ., 2017, 256 p. (In Russ.)
7. Myakushev K. V. *Modern methods of calculating electrical machines*. [Electronic resource], available at: <http://www.https://sapr.ru/article/7241> (accessed: 22.03.25). (In Russ.)

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

Мисютин Роман Юрьевич, кандидат технических наук, начальник конструкторского бюро, Обособленное конструкторское бюро Уфимского агрегатного производственного объединения, Москва, Россия, MisyutinRYu@tdhc.ru

Кондрашов Дмитрий Андреевич, начальник отдела электрических машин, Обособленное конструкторское бюро Уфимского агрегатного производственного объединения, Москва, Россия, KondrashovDA@tdhc.ru

Попов Юрий Васильевич, доктор технических наук, ведущий специалист, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, tov_popov@rambler.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), Chief Designer, the Isolated Design Office of Systems of an Electrical Supply of the Ufa Modular Production Association, Moscow, Russia, vkaliy@tdhc.ru

Misyutin Roman Yu., Candidate of Sciences (Engineering), Chief of Department, the Isolated Design Office of the Ufa Aggregate Production Association, Moscow, Russia, MisyutinRYu@tdhc.ru

Kondrashov Dmitriy A., Chief of Department, the Isolated Design Office of the Ufa Aggregate Production Association, Moscow, Russia, KondrashovDA@tdhc.ru

Popov Yuriy V., Doctor of Sciences (Engineering), Leading Specialist, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, tov_popov@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 28.04.2025; одобрена после рецензирования 24.07.2025; принята к публикации 01.09.2025.

The article was submitted 28.04.2025; approved after reviewing 24.07.2025; accepted for publication 01.09.2025.

Научная статья
УДК 351.814.332

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВХОДЯЩЕГО ПОТОКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ОСНОВЕ ГРАФОВЫХ СВЁРТОЧНЫХ СЕТЕЙ

Г. А. ГАСПАРЯН, И. А. ЧЕХОВ, Е. А. ДРАЧЕНКО

Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. Рассматривается задача краткосрочного прогнозирования входящих потоков воздушных судов (ВС) в сектора обслуживания воздушного движения (ВД), решение которой важно для обеспечения безопасности, надёжности и эффективности использования воздушного пространства (ВП). Для построения прогностической модели рассмотрена архитектура на основе графовых свёрточных сетей (GCN). В ходе анализа выявлены её ключевые недостатки: использование статической структуры графа, не отражающей оперативные изменения в системе, и отсутствие гибкости в определении значимости связей между узлами. Предложена улучшенная архитектура, основанная на механизме самовнимания (self-attention), позволяющем формировать динамическую, обучаемую матрицу смежности, адаптирующуюся к текущей обстановке. В дополнение к пространственному компоненту используется модуль LSTM, который захватывает временные зависимости. Расширенный набор входных признаков включает данные о траекториях, погодных условиях (METAR/TAF), маршрутах и задержках. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности предложенного подхода для применения в интеллектуальных системах поддержки принятия решений в сфере аэронавигации и управления воздушным движением.

Ключевые слова: обслуживание воздушного движения, использование воздушного пространства, прогнозирование потоков, механизм самовнимания, графовые свёрточные сети, пространственно-временные данные, эксплуатация авиационной техники

Для цитирования: Гаспарян Г. А., Чехов И. А., Драченко Е. А. Прогнозирование входящего потока воздушных судов на основе графовых свёрточных сетей // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 51. С. 59–70.

SECTOR ENTRY TRAFFIC FORECAST BASED ON GRAPH CONVOLUTIONAL NETWORKS

G. A. GASPARYAN, I. A. CHEKHOV, E. A. DRACHENKO

Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract. This study addresses the task of short-term prediction of aircraft inflow into air traffic control sectors, which is critical for ensuring the safety, reliability, and efficiency of airspace operations. The baseline model under consideration is based on Graph Convolutional Networks (GCN), which has demonstrated promising results. However, our analysis reveals several key limitations of the GCN approach, including the use of a static graph structure that does not reflect real-time operational dynamics, and the lack of flexibility in assigning importance to inter-sector connections. To address these issues, we propose an enhanced architecture that incorporates a self-attention mechanism for learning a dynamic adjacency matrix. This allows the model to adaptively reweight connections between nodes based on the current operational context. Additionally, a Long

Short-Term Memory (LSTM) module is used to capture temporal dependencies in traffic patterns. The feature set is extended to include aircraft trajectory data, weather reports (METAR/TAF), route densities, and delay statistics. Experiments using real-world data show that the proposed method significantly outperforms baseline models, offering a promising direction for intelligent decision support in air traffic management systems.

Keywords: air traffic control, flow prediction, airspace operation, self-attention mechanism, graph convolutional network, spatial-temporal data, operation of aircraft

For citation: Gasparyan G. A., Chekhov I. A., Drachenko E. A. Sector entry traffic forecast based on graph convolutional networks. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2025, no. 51, pp. 59–70. (In Russ.)

Введение

Традиционные методы прогнозирования потоков ВД опираются на временные ряды и статистические модели, такие как ARIMA, LSTM и методы регрессии [1]. Но эти модели, как правило, игнорируют пространственные зависимости между секторами ВП, а также динамический характер маршрутной сети. В последние годы широкое распространение получили модели, использующие графовые нейросети (Graph Neural Networks, GNN), позволяющие учитывать структуру ВП как ориентированный граф с динамическим потоком информации между узлами (секторами) [2].

В частности, в работе [3] использовалась архитектура на основе графовой свёрточной сети (GCN), в которой каждый сектор представлен как узел в графе, а связи между секторами формируются на основе данных о маршрутах обслуживания воздушного движения (ОВД). Вектор признаков каждого узла включал как статистические характеристики сектора, так и информацию о соседних секторах, а сама архитектура сочетала GCN и LSTM для учёта временной и пространственной динамики [4]. Такая архитектура имеет ряд ограничений, таких как фиксированная структура графа, отсутствие механизмов внимания или обучения структуры графа, ограниченность входных признаков [5].

В данной работе рассматривается усовершенствованная архитектура прогнозирования входящих потоков ВС, которая сочетает в себе использование динамически обучаемой матрицы смежности на основе признаков узлов (GCN на основе метода самовнимания), объединение пространственного и временного контекста через модуль LSTM, расширенный набор признаков, включая данные о метеоусловиях, задержках и плотности маршрутов [6].

Для демонстрации эффективности предложенной архитектуры разработан экспериментальный прототип прогностической модели на базе PyTorch, использующий реальные данные вторичной радиолокации (ВРЛ) и АЗН-В, METAR/TAF и исторические маршруты, представляющие собой архивные траектории ВС, полученные на основе наблюдений за предыдущие периоды. Эксперименты, включавшие обучение и тестирование модели на данных ВП района полётной информации (РПИ) Магадана за весенне-летний период, с прогнозом входного потока на горизонтах 30–120 минут, показали улучшение точности прогнозирования по сравнению с традиционными моделями. В ходе сравнительного анализа с базовыми методами (LSTM, GCN, ASTGCN) показано, что новый метод стабильно превосходит их по всем основным метрикам (RMSE, R^2 , RAE) [7].

Исходные методы исследования

В данном разделе рассматривается существующий подход к прогнозированию входных потоков в секторы ВП, основанный на графовом представлении структуры ВД. Этот подход используется в качестве базовой архитектуры, на основе которой проводится дальнейшее усовер-

шенствование. Анализ базовой архитектуры позволяет выявить её ограничения – в частности, статичность графовой структуры и ограниченное использование временных зависимостей – и служит отправной точкой для разработки более гибкой и адаптивной архитектуры, представленной в следующем разделе. Результаты такого сравнения позволяют объективно оценить вклад предложенных улучшений в точность прогнозирования [8]. Прогноз формулируется как задача предсказания входного потока для трёх ключевых участков: входного рубежа сектора, его внутреннего пространства и выходного рубежа. Каждый входной поток в сектор моделируется в виде узла графа. Взаимодействие между потоками описывается взвешенными рёбрами, создаваемыми на основе анализа последовательностей переходов между узлами с помощью нейросетевой модели Word2vec [9]. После построения графа и извлечения временных характеристик из реальных траекторий полётов применяется модуль пространственно-временной графовой свёрточной нейронной сети с вниманием (ASTGCN), способный учитывать изменения потока на различных временных масштабах – краткосрочных, суточных и недельных. Извлечение временных характеристик выполняется на основе последовательностей прохождения ВС через узлы графа, полученных из исторических данных о траекториях полётов. Для каждого узла формируются временные ряды, отражающие динамику входного трафика с заданной временной дискретизацией (например 5 или 10 минут). При этом учитываются такие особенности, как периодичность суточного и недельного трафика, временные лаги и всплески интенсивности. Дополнительно могут использоваться признаки временного контекста: номер часа, день недели, наличие аномалий или праздников. Эти ряды нормализуются и подаются на вход модели ASTGCN в виде тензоров, структурированных по трём временным шкалам: близкая (short-term) история для оценки текущей динамики, периодическая (period) компонента для учёта циклов, и долгосрочная (trend) – для захвата фоновых изменений. Выходные значения ASTGCN объединяются для получения прогноза интенсивности потока в точках входа в сектор [10].

С развитием концепции свободной маршрутизации (Free Route Airspace, FRA) операторы получили возможность формировать маршруты по своему усмотрению между заданными точками входа и выхода без обязательной привязки к установленным трассам. Уже в настоящее время FRA реализована в Магаданском и частично в Санкт-Петербургском Региональных центрах (РегЦ).

Основное внимание уделяется прогнозу численности рейсов во входных потоках. Результатом прогноза является объём ВД, ожидаемый во входных потоках за заданный временной горизонт, то есть на определённый интервал времени вперёд (например, 30, 60 или 120 минут), который определяется в зависимости от задач оперативного управления воздушным движением (УВД) или планирования потоков. Каждый узел модели представляет собой входной поток в некоторый сектор, поступающий из предыдущего по траекториям ВС сектора и направляющийся в следующий сектор. Соответственно, модель предсказывает количество рейсов в этом потоке на определённый промежуток времени вперёд [11].

Построение пространственно-временного графа

Данные траекторий полётов и информация о структуре ВП организуются в пространственно-временное графовое представление $G=(V, E)$, где V – множество узлов графа, а E – множество рёбер, указывающих на связь между узлами. Требуется выполнить извлечение узлов, генерацию рёбер и построение графа.

На основе данных ВРЛ и АЗН-В восстанавливаются 4D-траектории полётов, включающие геопространственные координаты, привязанные ко времени. Путём анализа пересечений этих траекторий с границами секторов определяются как момент, так и место входа ВС в конкретный сектор. Входной поток сектора моделируется в виде узла, который формируется на основании текущего сектора, а также с учётом сектора, из которого прибывает ВС, и сектора, в который оно

направляется далее. Обозначим f_k рейсы, где k – номер рейса в модели; S_i – секторы, i – номер сектора. Если рейс f_k попадает в сектор S_i из сектора S_{i-1} и далее направляется в S_{i+1} , то он принадлежит входному потоку сектора S_i и описывается узлом $S_i S_{i-1} S_{i+1}$.

Пусть рейсы f_1 и f_2 входят в сектор S_1 из S_2 , а затем следуют в S_3 . Это значит, что они принадлежат входному потоку сектора S_1 и выражаются узлом $S_1 S_2 S_3$. По аналогии при входе в сектор S_3 данные рейсы принадлежат входному потоку сектора S_3 и выражаются узлом $S_3 S_1 S_n$, где S_n – следующий сектор после выхода из S_3 . Аналогично для рейса f_3 узлы определяются как $S_1 S_2 S_4$, $S_4 S_1 S_3$ и $S_3 S_4 S_n$, при входе в сектора S_1 , S_4 и S_3 соответственно. Путём построения узлов для каждой траектории можно получить все узлы графа ВД. После идентификации узлов следующим этапом является формирование рёбер, соединяющих эти узлы. В рамках данного подхода ребро устанавливается между двумя узлами в случае, если они последовательно встречаются в одной и той же траектории рейса.

После завершения этапов определения узлов и рёбер создаётся граф, в котором каждому узлу сопоставляется временной ряд, отражающий интенсивность движения через данный узел во времени. Это означает, что если рейсы $f_1, f_2, \dots, f_k$ проходят через узел $S_i S_{i-1} S_{i+1}$ во времена $t_1, t_2, \dots, t_k$, то поток на узле можно представить как: $\{(f_1, t_1), (f_2, t_2), \dots, (f_k, t_k)\}$ [12].

Узлы с динамически меняющимся потоком и взвешенные рёбра между ними образуют структуру пространственно-временного графа. Созданный таким образом пространственно-временной граф позволяет получить прогноз потоков, то есть количества рейсов, проходящих через узлы графа в будущий момент времени. На основе временных последовательностей полётов, записанных в каждом узле графа G , формируется временной ряд движения для каждого узла в разные моменты времени. Обозначим $x_t^i \in \mathbb{R}$ ($\mathbb{R}$ – множество действительных чисел) поток через узел i в момент времени t . Тогда значения потока по всем узлам в момент t

$$\mathbf{X}_t = (x_t^1, x_t^2, \dots, x_t^N)^T,$$

где N – количество узлов в графе. Обозначим τ глубину окна во времени, или количество предшествующих наблюдений движения, использованных при входе в модель (временной интервал (шаг) между двумя последовательными наблюдениями движения в данном случае составляет 10 минут). Потоки через все узлы за τ предыдущих временных шагов выразим как

$$\chi = (\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_\tau)^T.$$

Задачу прогнозирования потока сформулируем следующим образом: при известных значениях χ – потоков во всех узлах графа за последние τ временных интервалов – требуется предсказать будущие последовательности потоков

$$Y = (y^1, y^2, \dots, y^N)^T \quad (1)$$

во всех узлах графа движения для задаваемого окна прогноза T_p (на следующих T_p временных интервалах), где

$$y^i = (x_{\tau+1}^i, x_{\tau+2}^i, \dots, x_{\tau+T_p}^i) \quad (2)$$

обозначает будущие потоки ВД для узла i в моменты от $\tau+1$ до $\tau+T_p$.

Для построения прогноза задействованы три компонента временного ряда: краткосрочный (недавний), суточный и недельный. Эти компоненты отражают текущие тенденции, а также периодические закономерности, наблюдаемые на уровне часов и недель.

Предположим, что частота сбора данных составляет q точек в час, последний момент времени, на который известны наблюдаемые данные – t_0 . На основе этих параметров формируются три временных ряда: за последние T_h часов, T_d дней и T_w недель.

Недавний отрезок – это последовательность наблюдений, непосредственно предшествующая прогнозу и отражающая влияние недавних (часовых) изменений движения, которая задаётся как

$$\chi_h = (\mathbf{X}_{t_0 - T_h q + 1}, \mathbf{X}_{t_0 - T_h q + 2}, \dots, \mathbf{X}_{t_0}),$$

где $S_h = q T_h$. Аналогичные операции выполняются для суточных и недельных изменений.

Каждый из трёх временных рядов передаётся в модуль ASTGCN, предназначенный для моделирования характерных признаков потока, присущих соответствующим временным шкалам. Архитектура ASTGCN включает в себя несколько пространственно-временных блоков, за которыми следует полносвязный выходной слой, обеспечивающий сохранение размерности выходных данных. Результаты обработки $\hat{Y}_h, \hat{Y}_d, \hat{Y}_w$ от каждого временного отрезка в ASTGCN агрегируются с использованием весов, что позволяет получить итоговое прогнозное значение. Финальный результат (итоговое представление прогнозов модели по всем временным точкам и узлам) вычисляется по следующему выражению:

$$\hat{Y} = W_h \circ \hat{Y}_h + W_d \circ \hat{Y}_d + W_w \circ \hat{Y}_w, \quad (3)$$

где $\circ$ – поэлементное произведение (произведение Адамара), а W_h, W_d и W_w – обучаемые параметры, отражающие вклад каждого признака в итоговый прогноз [13].

Стандартные методы (LSTM, ARIMA, модели на основе Word2Vec-матриц смежности) обладают рядом недостатков – от слабой адаптивности до вычислительной перегруженности. Например, вес ребра w_{ij} фиксируется по Word2Vec, что не учитывает изменчивость связей в реальном времени, а рёбра не отражают динамику, сезонность, всплески движения и изменения маршрутной сети вследствие ограничений на использование воздушного пространства. Также на входе GCN использует только текущие значения потока на узле, без учёта погоды, загруженности соседних секторов или РПИ, задержек рейсов. Основная проблема – слабая универсальность, то есть граф жёстко фиксирован: при появлении нового узла/сектора модель перестаёт функционировать.

Реализация улучшенного метода прогнозирования потока с использованием обучаемой GCN-модели

Рассмотрим альтернативную модель, объединяющую преимущества графовых свёрточных сетей (GCN) с возможностью динамически обучаемых связей, которая дополняется компонентами LSTM для моделирования временных зависимостей. Такой подход демонстрирует устойчивость к изменению структуры данных и позволяет использовать мультимодальные признаки.

Для подтверждения эффективности этого подхода для краткосрочного прогнозирования входящих потоков ВС была разработана экспериментальная система, реализующая предложенную архитектуру на языке Python с использованием фреймворка PyTorch. Система была протестирована на выборке реальных данных, включающей в себя разнообразные пространственно-временные сценарии из ВП Магаданского РПИ, где более 4 лет успешно применяется философия FRA.

Предложенная модель сочетает в себе следующие компоненты.

1. Графовую свёрточную сеть с методом самовнимания (SA-GCN):

$$H^{(l+1)} = \sigma(\tilde{A}^{(t)} H^{(l)} W^{(l)}),$$

где $\tilde{A}^{(t)}$ – динамически обучаемая матрица смежности, зависящая от признаков узлов на шаге t , формируемая через механизм внимания; l – номер слоя в графовой свёрточной сети ($l=0$ обозначает входной слой, каждый следующий слой агрегирует информацию от соседей, взвешивая

её через матрицу смежности); σ – функция активации, применяемая к результату линейных и графовых преобразований на l -м слое (нелинейное преобразование, которое позволяет модели улавливать сложные зависимости, а не ограничиваться линейной комбинацией признаков); $H^{(l)}$ – матрица признаков узлов на l -м слое графовой сети; W – обучаемая матрица весов на l -м слое.

Рассмотрим компоненты отдельно. Оценки e_{ij} важности (веса) связи (внимания) от узла i к узлу j вычисляются по формуле

$$e_{ij} = \text{LeakyReLU}(a(W_{hi} \| W_{hj})),$$

где $\|$ – конкатенация векторов W_{hi} и W_{hj} , то есть преобразованных векторов признаков, полученных путём линейного преобразования (проекции) через обучаемую матрицу весов W , а $a(\cdot)$ – обучаемый слой (например, полносвязный). Вначале анализируются признаки узла i и узла j и объединяются в общее множество (конкатенируются). Эта пара пропускается через нейросеть $a(\cdot)$, которая оценивает, насколько они «связаны» между собой. Функция активации ReLU преобразует входное значение по правилу $f(x) = \max(0, x)$, пропуская положительные значения без изменений и обнуляя отрицательные, что позволяет нейросети лучше обучаться на сложных зависимостях. Функция LeakyReLU добавляет нелинейности (как фильтр), чтобы модель могла лучше отличать важные связи от неважных. В отличие от базовой ReLU, эта функция вместо полного обнуления на входе отрицательных значений оставляет их с небольшим коэффициентом (обычно 0,01 или 0,02). Благодаря этому градиенты проходят даже при отрицательных входах, и модель меньше страдает от проблемы «вымерших нейронов», которая бывает у ReLU [14]. Далее производится преобразование оценок в вероятности с применением softmax. Функция softmax преобразует набор значений (оценок важности связей) в вероятностное распределение, где сумма всех оценок равна единице. Это позволяет интерпретировать веса связей между узлами как вероятности внимания к каждому из соседей:

$$a_{ij} = \frac{\exp(e_{ij})}{\sum_{m \in S(i)} \exp(e_{im})},$$

где $S(i)$ – множество соседей узла i , с которыми он связан в графе. Рассматриваются оценки e_{ij} , e_{im} , ... для всех соседей m узла i , далее к ним применяется softmax. Это превращает грубые оценки в коэффициенты от 0 до 1, которые показывают относительную важность узла и в сумме равны 1. Выясняется, какой из всех возможных влияющих секторов оказывает наибольшее влияние на i . Финальным шагом является получение матрицы смежности:

$$\tilde{A}_{ij}(t) = a_{ij}.$$

Матрица смежности является не бинарной, где наличие или отсутствие связи обозначается 1 или 0 соответственно, а адаптивной. Каждый элемент такой матрицы показывает насколько сильно узел j влияет на узел i в момент времени t .

Преимущества такой матрицы заключаются в том, что в обычных GCN матрица смежности фиксированная и бинарная: если связь задана – 1, нет – 0. Здесь же a_{ij} не задаются заранее, а вычисляются нейросетевой моделью на основе текущих признаков узлов, то есть реализуют механизм внимания и постоянно пересчитываются в зависимости от признаков узлов: движения, задержек, погоды, маршрутов. Вес рёбер между секторами изменяется со временем в зависимости от текущих входных признаков. Это делает модель гибкой и позволяет точнее моделировать влияние между секторами, особенно в изменяющейся обстановке [14].

Модель постоянно автоматически пересчитывает структуру графа, адаптируясь к изменяющимся условиям. Такой подход целесообразно применять для реального сектора УВД, где

маршруты и нагрузки изменяются постоянно, а фиксированная структура графа (как в ASTGCN) не даёт нужной гибкости.

2. Модуль LSTM для учёта временной зависимости:

$$h_{t,i}, c_{t,i} = \text{LTSM}(\mathbf{u}_{t,i}, h_{t-1,i}, c_{t-1,i}),$$

где $\mathbf{u}_{t,i}$ – это входной вектор признаков в момент времени t , содержащий данные, характеризующие поток в узле i графа: объём движения, погодные условия, задержки и другие факторы, влияющие на предсказание; $h_{t-1,i}$ – скрытое состояние LSTM-модуля на предыдущем временном шаге $t-1$, содержащее информацию о динамике входных потоков, накопленную в процессе обработки временного ряда, что позволяет модели учитывать временной контекст и «память» о предыдущих изменениях трафика; $c_{t-1,i}$ – ячейка памяти для узла i на шаге $t-1$; $h_{t,i}$ – новое скрытое состояние для узла i ; $c_{t,i}$ – новое состояние ячейки для узла i . Ячейка памяти – это внутреннее состояние нейросетевого блока, которое хранит долгосрочную информацию о временном ряде, это «память» самого LSTM-модуля, а не компьютера или данных. Каждая ячейка принадлежит конкретному узлу i в модели и содержит числовое представление (вектор), отражающее накопленный контекст о прошлых значениях входных данных: объёмах движения, погодных условиях, задержках и других факторах для того, чтобы LSTM могла «помнить» долгосрочные зависимости и корректно учитывать влияние событий, происходивших много шагов назад, на текущее и будущее состояние потока.

3. Финальный блок прогнозирования: взамен сложного в реализации ASTGCN используется двухслойный полносвязный слой с активацией ReLU, дающий на выходе прогноз числа входов в сектор. На вход двухслойной полносвязной нейросети приходит итоговое представление сектора (после GCN+LSTM), на выходе нейросеть выдаёт скаляр – прогноз количества входящих в сектор ВС на заданный горизонт времени [15]. Для каждого сектора обрабатываемого ВП нейросеть выполняет следующее.

Первый слой (z_1) нейросети с ReLU:

$$z_1 = \text{ReLU}(W_1 \mathbf{u} + b_1),$$

где $\mathbf{u}$ – входной вектор состояния ВП (например, размерностью 64 или 128), а W_1, b_1 – обучаемые параметры.

Второй слой (прогноз):

$$\hat{y} = W_2 z_1 + b_2,$$

где $\hat{y} \in \mathbb{R}$ – это прогноз числа входов в сектор через, например, 30, 60 или 120 минут.

Финальный результат (итоговое представление прогнозов модели по всем временным точкам и узлам) для следующих T_p временных интервалов после t_0 формируется согласно (3).

Модель обучается методом градиентного спуска с использованием Adam-оптимизатора (начальный шаг – 0,001, обучение 100 эпох, batch size=32). Для оценки качества прогнозирования используются три стандартные метрики [16], для которых используем обозначения, введённые в (1) и (2) для узлов графа, и $\hat{y}^i$ – предсказанные объёмы потока на каждом шаге для узла i .

MAE – средняя абсолютная ошибка:

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y^i - \hat{y}^i|;$$

MSE – среднеквадратичная ошибка:

$$\text{MSE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y^i - \hat{y}^i)^2;$$

RMSE – корень из MSE:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\text{MSE}}.$$

Также дополнительно применяются метрика коэффициента детерминации R^2 и относительная абсолютная ошибка (RAE) для оценки стабильности и интерпретируемости модели.

Результаты

В данном разделе описывается экспериментальная проверка предложенного метода на примере ВП РПИ Магадана (филиал «Аэронавигация Северо-Востока»), где широко применяются полёты в соответствии с принципами свободной маршрутизации. В качестве исходных данных использованы записи ВРЛ и АЗН-В за период с 1 по 31 декабря 2023 года. Объём выборки составил 75457 рейсов. Цель эксперимента – спрогнозировать почасовой объём входного потока в секторах при горизонте прогнозирования от одного до двух часов. Такой горизонт означает, что модель предсказывает объём входящего потока в сектор на интервал времени, начинающийся от текущего момента и продолжающийся на 1–2 часа вперёд. Этот диапазон позволяет учитывать краткосрочные изменения воздушной обстановки и подходит для оперативного принятия решений в системе УВД.

На основании пересечения 4D-траекторий с границами секторов РПИ Магадана было сформировано 1126 узлов графа ВД. Каждый узел отражает входной поток в конкретный сектор. Связи между узлами (рёбра графа) устанавливаются по последовательностям узлов, полученным из маршрутов ВС. Эти последовательности затем используются в вышеописанной модели SA-GCN+LSTM для определения весов рёбер, отражающих степень взаимосвязи между узлами.

Построенный граф представлен на рис. 1. Тёмные узлы на границах секторов обозначают входные потоки, при этом размер каждого узла соответствует интенсивности движения через него. Сплошные линии между узлами изображают рёбра графа, а их толщина показывает усреднённый вес узлов, вычисленный по предложенной модели.

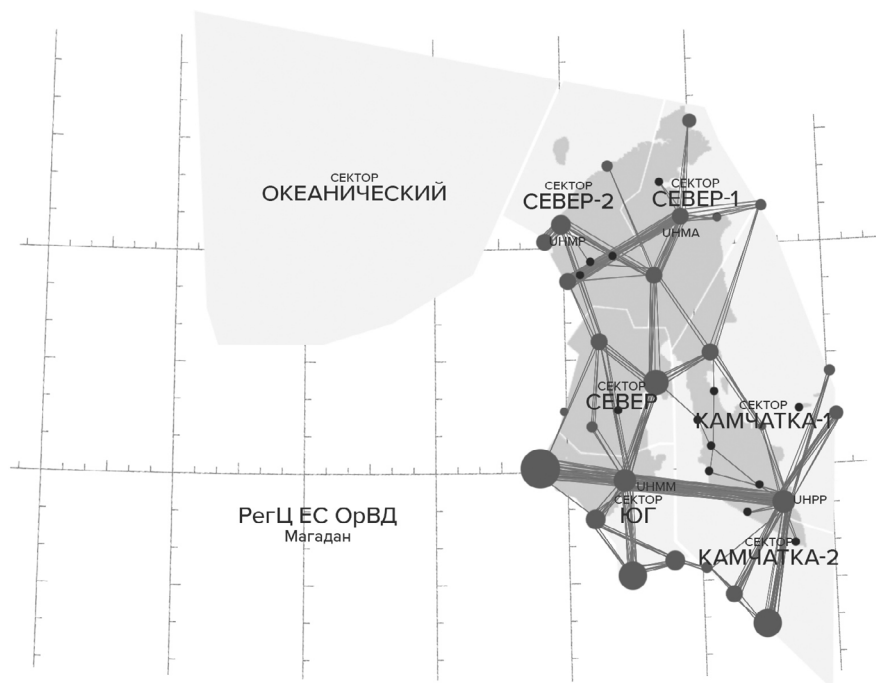


Рис. 1. Построенный для РПИ Магадана граф

Выборка рейсов была разбита на тренировочную (70 %), валидационную (15 %) и тестовую (15 %) части с соблюдением временной последовательности. Характеристики потоков ВС по всем узлам графа за 5 часов, 3 дня и одну неделю, то есть $T_h=5$, $T_d=3$ и $T_w=1$ извлекаются из временных рядов и подаются в блок прогнозирования (с ReLU) для прогнозирования потока на ближайшие один-два часа. В качестве функции потерь модели используется MSE между предсказанными и реальными значениями.

Частота временного ряда для учёта часовых потоков по узлам задана как 10 отсчётов в час ($q=10$). Во время обучения модели используется пакет размером 8 (т. е. модель обновляет свои параметры после обработки каждой группы из восьми временных последовательностей входных потоков), а значение скорости обучения установлено на уровне 0,0009. Для подготовки материала выделены 21 сутки данных под обучающую выборку, последующие 5 дней – под валидационную группу, и последние 5 дней – под тестовый набор.

Для оценки эффективности предложенного метода прогнозирования входных потоков были проведены сравнительные испытания с использованием всех трёх моделей, широко применяемых в задачах анализа временных рядов. Учитывая, что граф ВД включает более 1000 узлов, для наглядного сравнения выбран один из наиболее загруженных узлов в Магаданском РПИ – «BANOT-DIREB». Этот узел, в соответствии с принятой структурой, описывает поток ВС, входящих в сектор «Юг» из сектора «Север» и направляющихся далее в смежный РПИ.

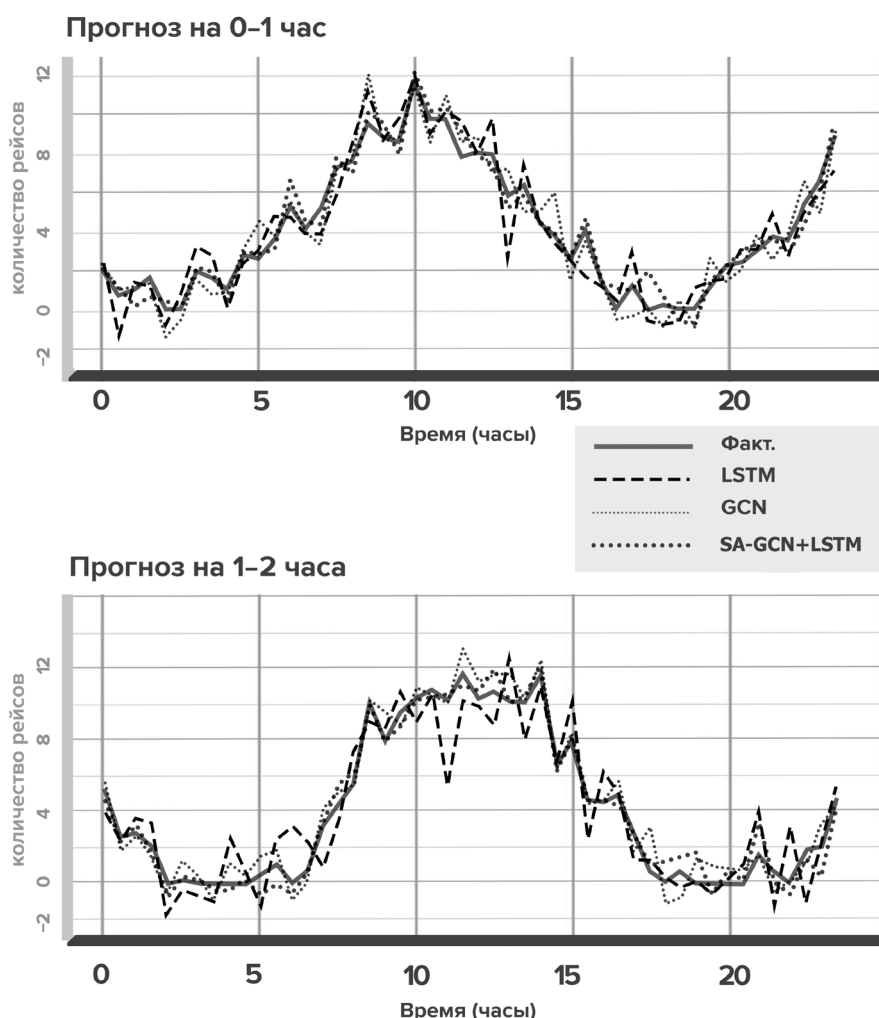


Рис. 2. Результаты прогноза потока для одного из узлов РПИ Магадана с 00:00 до 23:59 30 декабря 2023 года

На рис. 2 представлены результаты прогноза ВД на протяжении суток 30 декабря 2023 года (с 00:00 до 23:59). Верхняя часть рис. 2 иллюстрирует прогноз с горизонтом 0–1 час, нижняя – на интервал 1–2 часа. Метод SA-GCN+LSTM намного точнее отражает резкие колебания объёма движения. При увеличении горизонта предсказания до двух часов наблюдается общее снижение точности у всех трёх моделей, при этом погрешность LSTM возрастает заметно сильнее.

Экспериментальное моделирование подтвердило, что метод SA-GCN+LSTM существенно повышает точность краткосрочного прогнозирования входящих потоков по сравнению с распространёнными LSTM и ASTGCN; гибко адаптируется к изменяющейся топологии ВП; сохраняет интерпретируемость благодаря механизму внимания; демонстрирует устойчивость при неполных или зашумлённых данных. В качестве подтверждения на рис. 3 демонстрируется сравнение временного ряда реальных значений входов ВС (данные из открытых источников) и соответствующих прогнозов. Отмечается высокая степень совпадения.

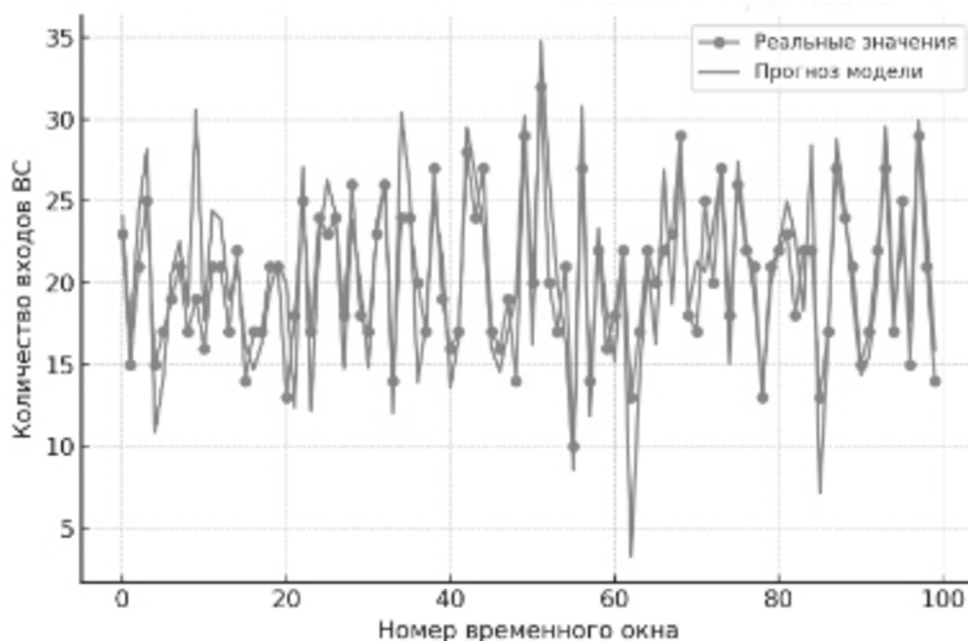


Рис. 3. Сравнение реальных значений движения и прогнозов

Результаты демонстрируют потенциал внедрения SA-GCN+LSTM в реальные системы поддержки принятия решений в центрах ОВД. Модель способна точно и адаптивно прогнозировать краткосрочные входные потоки ВС в сектора ОВД. За счёт использования обучаемой матрицы смежности (через механизм самовнимания) и учёта временной динамики (через LSTM) модель способна учитывать как пространственные взаимосвязи между секторами, так и их изменчивость во времени. Это делает её особенно полезной для центров ОВД при оперативном планировании, перераспределении нагрузки, выявлении потенциальных перегрузок и обеспечении устойчивости маршрутизации в условиях нестабильного движения.

Заключение

В работе описано усовершенствование базовой архитектуры графовой свёрточной нейронной сети (GCN), применяемой для краткосрочного прогнозирования входных потоков ВС. В отличие от традиционного подхода с фиксированной матрицей смежности, в новой архитектуре реализован механизм динамического формирования связей на основе самовнимания. Это позволяет объединённой модели SA-GCN+LSTM в каждый момент времени адаптивно

перестраивать структуру графа на основе текущих признаков секторов, обеспечивая более точное отражение пространственно-временных взаимосвязей в ВП.

Рассмотренный метод предусматривает расширение входных признаков за счёт включения данных о погодных условиях, задержках, плотности трафика и прочих факторов, непосредственно влияющих на потоковую нагрузку.

Результаты вычислительных экспериментов показали, что предложенный подход стабильно превосходит базовые модели (LSTM, GCN, ASTGCN) по ключевым метрикам качества прогнозирования (RMSE, R^2 , RAE). Особенно заметное улучшение достигается в условиях высокой изменчивости трафика, что подтверждает важность моделирования динамической структуры графа. Модель демонстрирует устойчивость, интерпретируемость и потенциал к интеграции в реальные системы поддержки принятия решений при ОВД. Она способна в реальном времени адаптироваться к изменяющейся воздушной обстановке и предоставлять точные прогнозы входного потока, что немаловажно для оперативного планирования в центрах ОВД.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список источников / References

1. Campos V., Cordero J. Airspace sectorization using machine learning and trajectory clustering for conflict mitigation. *Journal of Air Transport Management*, 2020, vol. 89, 101875.
2. Zhang Y., Zhao M., Tang L. Dynamic air traffic demand prediction based on attention-enabled temporal graph neural networks, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, vol. 147, 103931.
3. Пешко Е. В., Кондрякова М. А. Применение методов машинного обучения в автоматизированных системах организации воздушного движения // *Вестник АГА* (Академия гражданской авиации, Казахстан). 2023. Т. 4. № 31. С. 29–35 [Peshko E. V., Kondryakova M. A. Application of machine learning methods in automated air traffic management systems. *Vestnik of the Academy of Civil Aviation*, 2023, vol. 4, no. 31, pp. 29–35. (In Russ.)].
4. Zeng W., Xu Z., Cai Z., Chu X., Lu X. Aircraft trajectory clustering in terminal airspace based on deep autoencoder and Gaussian mixture model. *Aerospace*, 2021, vol. 8, no. 9, 266.
5. Franco A., Rivas D., Valenzuela A. Probabilistic aircraft trajectory prediction in cruise flight considering ensemble wind forecasts. *Aerospace Science and Technology*, 2018, vol. 78, pp. 132–142.
6. Киселев В. Ю., Монаков А. А. Предсказание траектории воздушного судна в автоматизированных системах управления воздушным движением // *Информационно-управляющие системы*. 2015. № 4. С. 33–40 [Kiselev V. Y., Monakov A. A. Forecasting aircraft trajectory in automated air traffic control systems. *Information Control Systems*, 2015, no. 4, pp. 33–40. (In Russ.)].
7. Guo S., Lin Y., Feng N., Song C., Wan H. Attention based spatial-temporal graph convolutional networks for traffic flow forecasting. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2019, vol. 33, pp. 922–929. <https://doi.org/10.1609/aaai.v33i01.3301922>
8. Prandini M., Hu J., Lygeros J., Sastry S. A probabilistic approach to aircraft conflict detection. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2000, vol. 1, no. 4, pp. 199–220. <https://doi.org/10.1109/6979.898224>
9. Devasia S., Mohleji A., McNally B. Sector-level air traffic complexity assessment using entropy-based metrics. *Journal of Air Traffic Control*, 2020, vol. 62, no. 2, pp. 12–20.
10. Kratzer S., Delahaye D. A hybrid optimization model for airspace capacity balancing under uncertainty. *Computers & Operations Research*, 2019, vol. 105, pp. 28–39.
11. Zhang Z., Chen Y., An Y., Fang J., Zhou X. Identifying flight trajectory patterns via a density-aided hierarchical clustering algorithm. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2022, vol. 821, pp. 453–465. https://doi.org/10.1007/978-981-16-7423-5_45
12. Chen L., Han R., Zhao H. Conflict risk evaluation in terminal airspace using Markov decision process models. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2022, vol. 45, no. 1, pp. 204–216.

13. Негрий А. В., Соколов О. А. Анализ и оптимизация алгоритмов управления полётом беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с помощью машинного обучения // Вестник науки (Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации). 2021. № 4(61). С. 78–85. [Negriy A. V., Sokolov O. A. Analysis and optimization of flight control algorithms for unmanned aerial vehicles (UAVs) using machine learning. *Vestnik nauki (St. Petersburg State University of Civil Aviation)*, 2021, no. 4(61), pp. 44–46. (In Russ.)].
14. Maas A. L., Hannun A. Y., Ng A. Y. Rectifier nonlinearities improve neural network acoustic models. *Proc. of the 30th International Conference on Machine Learning (ICML), Workshop on Deep Learning for Audio, Speech and Language Processing*. 2013, vol. 28, 3.
15. Dai H., Tang J., Wang F.-Y. Spatio-temporal demand-capacity balancing with multi-agent learning in air traffic flow management. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, vol. 117, 102670.

Информация об авторах

Гаспарян Григорий Арменович, аспирант, Московский государственный технический университет гражданской авиации, диспетчер РДЦ, Московский центр АУВД, Москва, Россия, grigory.rw@gmail.com

Чехов Игорь Анатольевич, кандидат военных наук, доцент кафедры УВД, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия, cheigov@rambler.ru

Драченко Егор Александрович, аспирант, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия, egordrachenko@icloud.com

Authors information

Gasparyan Grigory A., Postgraduate Student, Moscow State Technical University of Civil Aviation, En-route Air Traffic Controller, Moscow ATM Centre, Moscow, Russia, grigory.rw@gmail.com

Chekhov Igor A., Candidate of Sciences (Military), Associate Professor of the Department of Air Traffic Control, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia, cheigov@rambler.ru

Drachenko Egor A., Postgraduate Student, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia, egordrachenko@icloud.com

Статья поступила в редакцию 23.06.2025; одобрена после рецензирования 07.08.2025; принята к публикации 10.09.2025.

The article was submitted 23.06.2025; approved after reviewing 07.08.2025; accepted for publication 10.09.2025.

Научная статья

УДК 629.735.017.1:623.746-519

УПРАВЛЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕДУРАМИ ПОДДЕРЖАНИЯ ЛЁТНОЙ ГОДНОСТИ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ

И. С. ТОИРОВ, Ю. И. САМУЛЕНКОВ

Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. Основной целью данного исследования является разработка подходов к использованию информационных технологий при поддержании лётной годности беспилотных авиационных систем. Разработаны мероприятия по совершенствованию локальных нормативных актов, оценки технического состояния авиационной техники с помощью нейросети. Предложены моделирующий алгоритм и прикладное программное обеспечение для расчёта показателей эффективности системы поддержания лётной годности беспилотных воздушных судов, выполнен анализ трудоёмкости периодического технического обслуживания для среднемагистральных самолётов за 2023–2024 годы.

Ключевые слова: беспилотное воздушное судно, поддержание лётной годности, силовая установка, техническое обслуживание, воздушное судно, производственная инфраструктура, нейросеть, эксплуатация авиационной техники

Для цитирования: Тоиров И. С., Самуленков Ю. И. Управление организационно-технологическими процедурами поддержания лётной годности беспилотных авиационных систем // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 51. С. 71–82.

MANAGEMENT OF ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL PROCEDURES FOR MAINTAINING THE AIRWORTHINESS OF UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS

I. S. TOIROV, YU. I. SAMULENKOV

Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract. The main purpose of this study is to develop approaches to the use of information technology in maintaining the airworthiness of unmanned aircraft systems. The authors have developed measures to improve local regulations and assess the technical condition of aviation equipment using a neural network. The paper proposes a modeling algorithm and application software for calculating the performance indicators of the airworthiness maintenance system for unmanned aircraft, and analyzes the complexity of periodic maintenance for medium-haul aircraft in 2023–2024.

Keywords: unmanned aircraft, airworthiness maintenance, power plant, maintenance, aircraft, production infrastructure, neural network, operation of aircraft

For citation: Toirov I. S., Samulenkova Yu. I. Management of organizational and technological procedures for maintaining the airworthiness of unmanned aircraft systems. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2025, no. 51, pp. 71–82. (In Russ.)

Введение

Современные беспилотные авиационные системы (БАС) представляют собой одну из наиболее перспективных областей авиации. Эти системы, включающие, как правило, беспилотные воздушные суда (БВС), станцию внешнего пилота (СВП), канал передачи данных между БВС и СВП, используются как в гражданских, так и в военных сферах, выполняя широкий спектр задач – от мониторинга и аэрофотосъёмки до поисково-спасательных операций и грузовых перевозок.

Процедуры, направленные на обеспечение лётной годности (ЛГ), охватывают все этапы жизненного цикла воздушных судов (ВС), включая проектирование, производство и эксплуатацию. Это справедливо и для БАС, имеющих в своём составе БВС.

Эффективное использование и широкое внедрение БАС в хозяйственную деятельность страны вызывает необходимость управления системой поддержания лётной годности (ПЛГ) БАС и совершенствования этой системы. Цель работы – разработка подходов к использованию информационных технологий в системе ПЛГ БАС.

Для достижения поставленной цели проведён анализ нормативно-правовой базы в области лётной годности БАС, разработано прикладное программное обеспечение (ППО) для оценки и прогнозирования параметров процесса технической эксплуатации (ПТЭ) БВС на основе интегральной математической модели, сформирован подход к актуализации локальных нормативных документов авиационных организаций с помощью нейросети. Для уменьшения продолжительности и трудоёмкости работ при оценке технического состояния авиационных двигателей предложено использование нейросети.

Проблемы и перспективы развития нормативно-правовой базы ПЛГ БАС

Развитие беспилотной авиации тесно связано с совершенствованием нормативно-правовой базы, которая обеспечивает правовые и организационные основы для проектирования, производства, эксплуатации и технического обслуживания (ТО) БАС. В последние годы на международном и национальном уровнях был принят ряд ключевых документов, регулирующих использование БАС.

На международном уровне вопросы обеспечения ЛГ и безопасности полётов БАС регулируются Международной организацией гражданской авиации (ИКАО), которая разрабатывает рекомендации и стандарты для интеграции БАС в международное воздушное пространство^{1, 2}.

В Российской Федерации вопросы, связанные с эксплуатацией и ПЛГ БАС и входящих в них БВС, регулируются рядом ключевых документов, которые устанавливают основу безопасного использования БАС в правовом³, организационном⁴ и техническом аспектах (ФАП-145⁵).

Несмотря на активное развитие нормативно-правовой базы, существуют проблемы, связанные с регулированием эксплуатации БАС. Основные трудности включают необходимость гармонизации международных и национальных стандартов, разработку новых стандартов ЛГ для уникальных конструкций и сложности в обеспечении эксплуатации БАС в контролируемом воздушном пространстве.

¹ Приложение 8 к Конвенции о международной гражданской авиации Лётная годность воздушных судов. Тринадцатое издание, июль 2022 года.

² Типовые правила и правила ИКАО по БАС. Часть 101, Часть 102 и Часть 149.

³ Кодекс Российской Федерации от 19.03.1997 № 60-ФЗ. Воздушный кодекс Российской Федерации.

⁴ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 05.10.2021 № 2806-р «Об утверждении Концепции и плана реализации Концепции интеграции БВС в единое воздушное пространство РФ в части развития технологий».

⁵ Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 01.03.2025 № 367 «Об утверждении Федеральных авиационных правил «Техническое обслуживание подлежащих обязательной сертификации БАС и (или) их элементов, гражданских воздушных судов, авиационных двигателей, воздушных винтов, за исключением лёгких, сверхлёгких гражданских судов, не осуществляющих коммерческих воздушных перевозок и авиационных работ. Часть 145».

К основным проблемам развития нормативной базы в области беспилотной авиации относятся: несоответствие национальных и международных стандартов, что затрудняет интеграцию БАС в глобальное воздушное пространство, недостаточная разработанность документов ЛГ для БАС, отсутствие нормативно-правовой базы по созданию производственной инфраструктуры для ТО БАС, нехватка ППО для сопровождения жизненного цикла БАС, недостаточно проработанные требования по квалификации лётного и инженерно-технического состава для эксплуатации и обслуживания БАС.

Для решения этих проблем необходимо гармонизировать национальные стандарты с международными требованиями, разработать специальные правила для эксплуатации БАС в городских и приграничных зонах, усовершенствовать процедуры обучения и аттестации операторов и организаций, занимающихся ТО БАС. Таким образом, нормативно-правовая база играет важную роль в обеспечении безопасности и эффективности эксплуатации БАС. Её дальнейшее развитие необходимо для интеграции БАС в национальное и международное воздушное пространство, а также для расширения их применения в различных отраслях экономики.

Обеспечение и ПЛГ БАС

Обеспечение ЛГ БАС является ключевым аспектом их безопасной эксплуатации и длительного использования. ПЛГ включает в себя набор мероприятий [1–3], направленных на обеспечение исправности и соответствие нормативным требованиям (ФАП-519⁶, НЛГ БАС СТ⁷) на всех этапах жизненного цикла.

Мероприятия по обеспечению и поддержанию ЛГ БАС включают следующие основные процессы и процедуры: ТО, модификацию и модернизацию, систему учёта и анализа данных, управление организационно-технологическим обслуживанием авиационной техники (АТ)⁸ [4, 5], обучение и квалификацию персонала, планирование.

В рамках выполнения процедур ПЛГ особое внимание уделяется созданию специализированных цехов для ТО БАС и их компонентов. Идёт внедрение автоматизированных систем контроля и оценки технического состояния АТ⁹, которые позволяют проводить мониторинг ЛГ. Это снижает вероятность возникновения критических отказов и увеличивает надёжность эксплуатации.

Информационные технологии по обеспечению и ПЛГ БАС

Лётная годность БАС является сложной и многоуровневой задачей, требующей взаимодействия специалистов, автоматизированных систем и обновлённых технологий. Системный подход к ПЛГ обеспечивает повышение безопасности эксплуатации и снижение затрат на обслуживание в долгосрочной перспективе. Исследовали вариант системного подхода с применением нейросетей с целью совершенствования процессов ПЛГ БАС.

Работа с нормативно-правовыми актами

В подготовленный для анализа информационный банк данных (ИБД) включили более 70 российских и международных нормативных актов. Созданный ИБД использовали для актуализации

⁶ Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 27 ноября 2020 г. № 519 ФАП «Требования к лётной годности гражданских ВС. Форма и порядок оформления сертификата лётной годности гражданского ВС. Порядок приостановления действия и аннулирования сертификата лётной годности гражданского ВС».

⁷ Приказ ФАВТ (Росавиация) от 16.12.2022 № 922-П «Об утверждении Норм лётной годности БАС с БВС самолётного типа с максимальной взлётной массой до 5400 кг».

⁸ ГОСТ Р 53863-2010. Воздушный транспорт. Система технического обслуживания и ремонта авиационной техники. Термины и определения. С. 17.

⁹ Информационно-управляющая система обеспечения технической эксплуатации авиационной техники «Эрлан». <https://airlan.ru/products1/history1.php>

локальных нормативных документов авиационной организации с помощью нейросети [6, 7]. Для нейросети специалистами по ПЛГ БАС были смоделированы запросы (промты) с заданием на анализ всей загружаемой документации.

На основе промт-запросов выполнены анализ и актуализация «Руководства по организации технического обслуживания эксплуатанта (РОТО)» объёмом 130 страниц (табл. 1, 2).

Таблица 1

Промт-запросы специалиста по ПЛГ БАС и ответы нейросети

Запрос специалиста по ПЛГ БАС	Запрос специалиста по ПЛГ БАС
Представь, что ты опытный авиационный инженер в сфере поддержания лётной годности гражданских воздушных судов и беспилотных воздушных судов. Прошу изучить актуальную нормативную документацию, которую загружаю в виде файлов. Изучи все файлы, проанализируй для использования в последующих ответах.	Проанализируй, пожалуйста, актуальность и соответствие РОТО организации требованиям действующих нормативных документов. Выдай рекомендации по устранению несоответствий.
Ответ нейросети	Ответ нейросети
Отлично, звучит как отличная идея! Я готов работать в роли опытного авиационного инженера и с интересом изучу всю нормативную документацию, которую ты предоставишь. Просто загружай файлы, и я тщательно их проанализирую. После этого смогу использовать полученную информацию для ответов на любые твои вопросы, разработки методических материалов, подготовки отчётов и всего, что потребуется. Жду первый файл!	■ Да, смогу. Учитывая, что я уже полностью проанализировал обширный массив актуальной нормативной документации (включая ИКАО, ФАП, ГОСТ, модели ИКАО по БАС, стратегии, руководства, Аппех-ы, Дос-и, Сир-ы, а также национальные правила по ПЛГ, ТО, сертификации, подготовке персонала и т. д.), готов: ■ Проверить документ эксплуатанта на: - соответствие международным и национальным нормативам; - наличие устаревших ссылок, формулировок, процедур; - правильность ссылок на стандарты, процедуры, термины; - полноту и корректность требований к ПЛГ, СУБП, ТО, БАС, СЛГ и т.д. ☑ Указать: Некорректные или устаревшие положения – с пояснением и обоснованием; - правильные формулировки или актуальные ссылки, которые должны быть использованы; - при необходимости – дать рекомендации по приведению документа в соответствие с действующими нормами.

Таблица 2

Результаты анализа РОТО с помощью нейросети

Раздел, страница	Фрагмент документа	Комментарий	Рекомендация/Актуальное требование
Раздел 6.5, стр. 71–74	«Перед использованием проверьте актуальность документа на корпоративном портале...»	Указан только внутренний источник. Не соответствует ФАП-145, п. 44	Дополнить: «Актуализация производится в соответствии с процедурами, одобренными Росавиацией, и в рамках уведомлений ICAO/EASA/FAA.»
Раздел 6.6, стр. 75	«Бортжурналы ВС хранятся в течение 36 месяцев...»	Устаревший срок хранения. Не соответствует ФАП-145, п. 42–44	Установить срок хранения: до окончания эксплуатации +24 мес или до передачи новому владельцу

Окончание таблицы 2

Раздел, страница	Фрагмент документа	Комментарий	Рекомендация/ Актуальное требование
Весь документ	–	Нет упоминания о СУБП. Нарушение требований Annex 19 ИКАО, Doc 9859, ФАП-147 ¹⁰	Включить раздел о внедрении и функционировании СУБП согласно Annex 19 и ФАП-147
Стр. 62	приказ ФАС РФ от 09.12.98 № 357	Устаревший приказ. Документ не действует	Заменить ссылкой на ФАП-10 ¹¹ (актуальные нормативы по сертификации эксплуатантов и лётной годности)
Раздел 6.9, стр. 76	«...на документы по поддержанию лётной годности США, Европы оформляется подписка...»	Подписка не заменяет официальное внедрение. Нарушение ИКАО Doc 9760, Annex 6	Добавить: «Использование допускается только после аккредитации и утверждения уполномоченным органом.»

Другие возможности использования нейросетей в ПЛГ БАС и БВС

На этапах разработки, производства БАС за счёт использования ИТ-технологий возможно сокращение продолжительности и количества циклов испытаний опытных образцов изделия. На этапе эксплуатации применение нейросетей [8], цифровых двойников позволяет обосновывать принятые решения за счёт быстрой проверки изменений, вносимых в документацию, конструкцию изделия и его составных частей, анализировать изменения эксплуатационно-технических характеристик (ЭТХ).

Исследовали возможности использования нейросети при контроле технического состояния АТ. В настоящее время достоверная информация о техническом состоянии БВС и их двигателях в открытых источниках отсутствует, поэтому авторы использовали данные для пилотируемых ВС. Сравнивали результаты контроля авиационных двигателей специалистом по неразрушающему контролю (НК) и нейросетью.

В ходе исследования по полученным результатам НК компрессора и турбины двигателя CFM56-3 с помощью дефектоскопа «General Electric Go++ Olympus», сформулированы заключение и рекомендации специалиста по НК (рис. 1). Также были сгенерированы запросы в нейросети, которая сформировала технический отчёт по выявленным дефектам, состоянию и целостности деталей двигателя, его пригодности к эксплуатации, перечислила рекомендуемые действия и привела ссылки на Aircraft Maintenance Manual (АММ) и другие технические документы. Результаты оценок технического состояния двигателя, сделанных специалистом по НК и нейросетью, в основном совпадают.

На изображениях, полученных при исследовании дефектоскопом компрессора высокого давления (КВД) и турбины низкого давления (ТНД) двигателя CFM56-3, отмечены зоны обнаруженных дефектов. В процессе создания цифровой модели ЛГ БАС авторами был сформулирован

¹⁰ Приказ Минтранса России от 12.09.2008 № 147 (ред. от 02.02.2024) «Об утверждении Федеральных авиационных правил «Требования к членам экипажа воздушных судов, специалистам по техническому обслуживанию воздушных судов и сотрудникам по обеспечению полётов (полётным диспетчерам) гражданской авиации».

¹¹ Приказ Минтранса России от 12 января 2022 г. № 10 об утверждении ФАП «Требования к юридическим лицам, индивидуальным предпринимателям, осуществляющим коммерческие воздушные перевозки. Форма и порядок выдачи документа, подтверждающего соответствие юридического лица, индивидуального предпринимателя требованиям ФАП. Порядок приостановления действия, введения ограничений в действие и аннулирования документа, подтверждающего соответствие юридического лица, индивидуального предпринимателя требованиям ФАП».

ряд промт-запросов для нейросетей с целью анализа работоспособности АТ, в нейросеть также «загружены» фотографии элементов турбины двигателя, полученные с помощью дефектоскопа. Выводы и рекомендации специалиста по НК и сгенерированные нейросетью, приведены в табл. 3 и табл. 4.

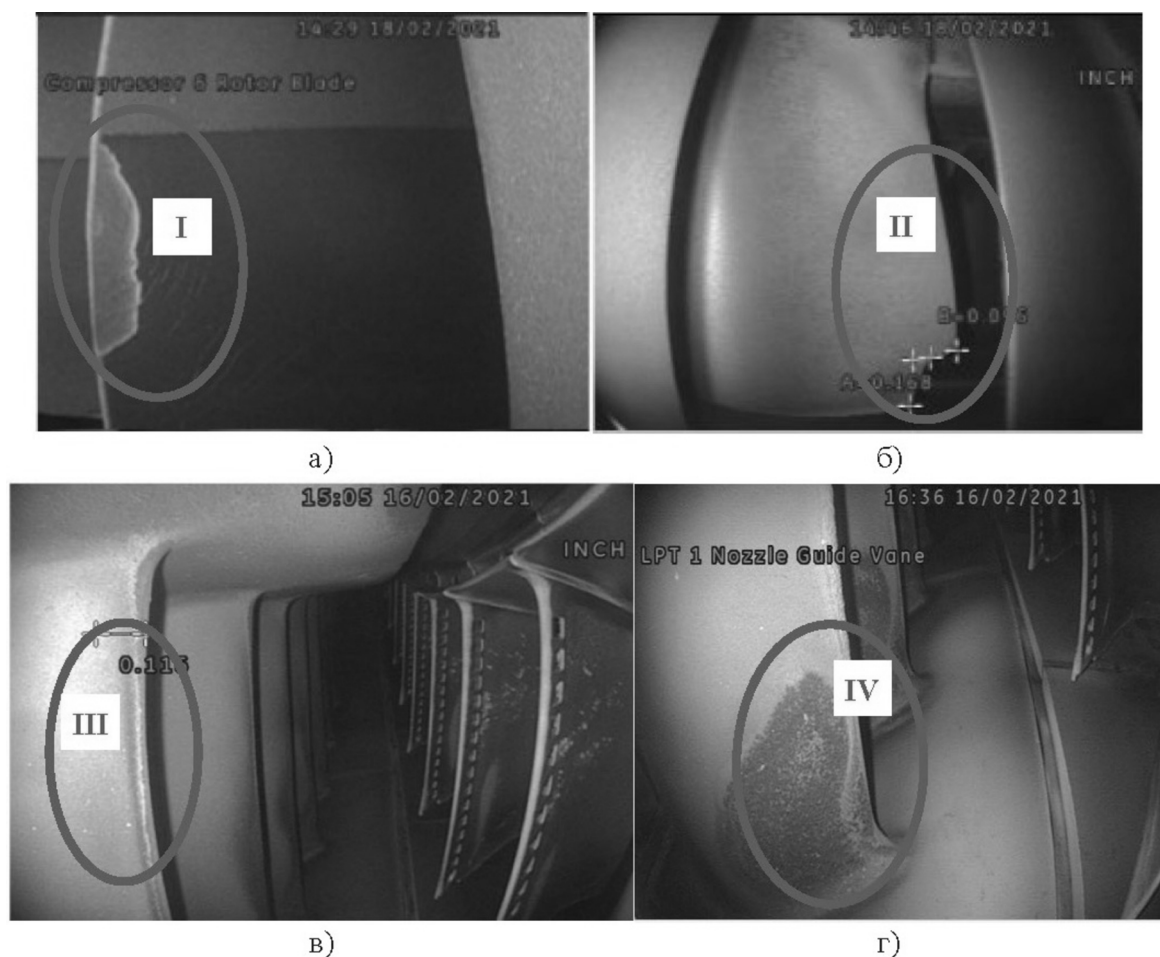


Рис. 1. Результаты контроля дефектоскопом компрессора и турбины двигателя CFM56-3: нарушение защитного покрытия рабочей лопатки КВД (зона I) – а; частичное разрушение рабочей лопатки КВД по задней кромке (0,168x0,096 дюйма, зона II) – б; эрозия на поверхности лопатки соплового аппарата (СА) ТНД (0,116 дюйма, ~2,95 мм, зона III) – в; наличие дефектов на лопатке СА ТНД (зона IV) – г

Таблица 3

Выводы по результатам контроля технического состояния двигателя CFM56-3

Выводы специалиста по НК	Выводы, сгенерированные нейросетью
На 6-й рабочей лопатке V ступени КВД нарушение защитного покрытия (рис. 1, а)	Отмечена изменённая окраска поверхности, характерная для ударного повреждения или попадания постороннего объекта (FOD) (рис. 1, а)
Частичное разрушение рабочей лопатки КВД по задней кромке (рис. 1, б)	Одна лопатка демонстрирует структурные повреждения, вероятно вызванные высокочастотной усталостью (HCF) или ударным воздействием (рис. 1, б)
Эрозия на лопатке СА 1-й ступени ТНД (рис. 1, в)	Замеренное повреждение/эрозия на поверхности лопатки 0,116 дюйма (~2,95 мм) (рис. 1, в)
Наличие цветов побежалости, перегрева на поверхности лопатки СА 1-й ступени ТНД СА (рис. 1, г)	Обширная зона изменения цвета и текстуры, возможно, перегрева нагара на лопатке (рис. 1, г)

Таблица 4

Рекомендации по результатам контроля технического состояния компрессора и турбины двигателя CFM56-3

Рекомендации специалиста по НК	Рекомендации, сгенерированные нейросетью
Выполнить промывку проточной части компрессора двигателя	Провести НК и осмотр всех лопаток 5-й ступени компрессора
Заменить повреждённые лопатки КВД	Проанализировать журнал эксплуатации на предмет вибраций и записей о попадании посторонних объектов
Отстранение двигателя от эксплуатации	Остановка эксплуатации двигателя
Требуется ремонт СА 1-й ступени ТНД	Общее состояние компонентов ТНД 1-й ступени (LPT Stage 1) требует ремонта или замены в соответствии с АММ
Выполнить контроль состояния камеры сгорания и топливных форсунок двигателя	Проверка температуры и профиля потока газа в камере сгорания для выявления причины перегрева
Выполнить анализ температурных режимов двигателя по материалам объективного контроля	Проведение анализа причинно-следственной связи (RCFA) при повторяющихся трещинах

В ходе исследования была рассчитана продолжительность НК компрессора и турбины двигателя CFM56-3. Фактическую продолжительность выполнения работ по НК H в часах считали как

$$H = \frac{t_{\text{окон}} - t_{\text{нач}}}{60},$$

где $t_{\text{окон}}$ – время окончания работ, $t_{\text{нач}}$ – время начала работ в минутах. Тогда итоговое время выполнения НК

$$H_{\text{итог}} = H(1 + \kappa) = \frac{t_{\text{окон}} - t_{\text{нач}}}{60}(1 + \kappa).$$

Итоговое время рассчитывается с поправочным коэффициентом $\kappa = 0,25$ на подготовку, демонтаж, монтаж, отчётность.

Продолжительность оценки технического состояния проточной части двигателя специалистом по НК составила 3 часа 30 мин, включая оформление заключения. При использовании нейросети удалось сократить время выполнения работ до 3 часов, причём снизилась вероятность ошибки диагностирования. Следует отметить, что заключение нейросети имеет неточности и несоответствия (табл. 3, табл. 4), что устраняется обучением нейросети.

В процессе эксплуатации АТ для выдачи исчерпывающих рекомендаций цифровой моделью ЛГ БАС необходимо включить в ИБД как можно большее количество вариантов решений той или иной проблемы, в том числе при оценке технического состояния двигателя.

Алгоритм решения задачи по моделированию ПТЭ БАС

При решении задач по моделированию ПТЭ БАС необходимо определить [9]:

- вероятности нахождения БАС в состояниях: устранение эксплуатационных отказов и повреждений; периодическое ТО; замена компонентов по причине выработки ресурса или преждевременного съёма двигателя; контрольно-восстановительные работы;
- вероятности пребывания БАС в процессе оперативного ТО; в состоянии готовности к использованию по назначению.

В качестве теоретической основы для моделирования выбраны цепи Маркова. Случайный процесс называют марковским¹², если для любого момента времени t_0 вероятностные характеристики процесса в будущем зависят только от его состояния в данный момент t_0 и не зависят от того, когда и как система пришла в это состояние. Марковская цепь – частный случай марковского процесса, когда пространство его состояний дискретно, и процесс описывается в терминах множества дискретных состояний описываемой системы и переходов между ними.

Обычно предполагается, что переходы между состояниями происходят через определённые интервалы с соответствующей интенсивностью и вероятностью перехода [9]. Марковский анализ позволяет оценить долгосрочные показатели надёжности системы, такие как среднее время между отказами системы, среднее время её восстановления и вероятность нахождения системы в исправном состоянии. По полученным результатам возможна выработка управляющих воздействий по повышению эффективности эксплуатации системы (в данном случае – БАС), в том числе оптимизация процедур ТО.

Рассмотрим ПТЭ БАС как дискретный марковский процесс (цепь Маркова) и построим на основе этого моделирующий алгоритм.

Входная информация моделирующего алгоритма ПТЭ БАС [10, 11] состоит из параметров лётной деятельности и состояния входящих в БАС БВС, количества БВС, планируемого годового налёта, времени использования по назначению (продолжительности полёта), параметров потока отказов, налёта на отказ в полёте, продолжительности и трудоёмкости выполнения оперативного и периодического ТО, продолжительности и трудоёмкости диагностики АТ.

При моделировании ПТЭ АТ реализуются, как правило, следующие вычислительные процедуры: формирование стохастических параметров, расчёт режимов ТО БВС и обеспечения запасными частями и материалами с помощью вероятностно-статистической модели, базирующейся на решении интегрально-дифференциальных уравнений Колмогорова, оценка показателей эффективности (исправность, удельные продолжительность и трудоёмкость ТО) использования ресурсного потенциала парка БВС в зависимости от параметров лётной подготовки, возможностей инженерно-авиационной службы и технических характеристик БВС [9].

Выходная информация моделирующего алгоритма ПТЭ БАС [10, 11] включает значения вероятностей нахождения БВС в различных состояниях, времена нахождения в различных состояниях, среднее количество БВС, находящихся в различных состояниях, показатели эффективности эксплуатации.

Авторами разработана программа расчёта характеристик ПТЭ БВС [11]. При проведении численного эксперимента получены значения вероятностей нахождения БВС в различных состояниях в течение года. По этим значениям вероятностей определены показатели эффективности ПТЭ.

Для выявления закона распределения трудоёмкости периодического технического обслуживания (ПТО) БВС (рис. 2), нахождения вероятностей и интенсивностей переходов между состояниями выполнен анализ трудоёмкости ПТО для пилотируемых среднемагистральных самолётов с налётом от 10000 до 30000 ч за 2023–2024 годы. Результат анализа не позволяет явно выявить распределение случайной величины (трудоёмкости ПТО) для генерации при моделировании процессов перехода из состояния в состояние. Однако можно однозначно определить следующие характерные области (рис. 2):

- низких трудозатрат (50...350 чел./час) – первый участок;
- средних трудозатрат (550...1150 чел./час) – второй участок;
- высоких трудозатрат (1500...10000 чел./час) – третий участок.

¹² см., например: Галажинская О. Н., Моисеева С. П. Теория случайных процессов. Часть 2. Марковские процессы. Учебное пособие. 2016, Томск, Издательский Дом Томского государственного университета, 126 с.

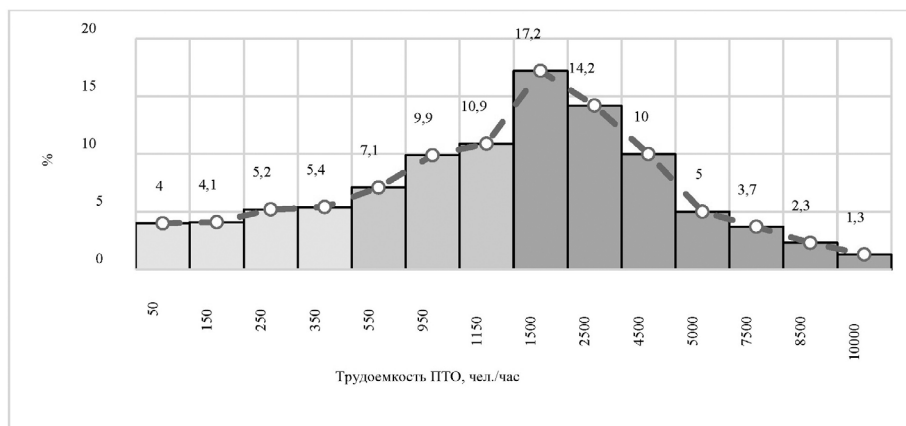


Рис. 2. Распределение трудоёмкости ПТО для среднемагистральных самолётов

Для каждой из областей определили характерное распределение: равномерное для первого и второго участков и экспоненциальное с интенсивностью $\lambda=33$ для третьего с соответствующими плотностями:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x < 50; \\ 300^{-1}, & \text{если } x \in [50, 350]; \\ 800^{-1}, & \text{если } x \in (350, 1150]; \\ 33e^{33}, & \text{если } x > 1150. \end{cases}$$

Ошибка аппроксимации данных таким способом не превышает 10 %, что свидетельствует о высокой точности аппроксимации.

При значительном отклонении эмпирических данных от теоретического распределения нулевая гипотеза о распределении случайной величины по теоретическому закону должна быть отклонена.

Первоначальный выбор характерных распределений произведён на основе визуального анализа фактических данных, изображённых в виде гистограммы (рис. 2). Для проверки воспользуемся критерием согласия Пирсона:

$$\chi_{\Phi}^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(E_i - O_i)^2}{E_i}, \quad (1)$$

где χ_{Φ}^2 — фактическое значение критерия Пирсона; n — количество интервалов с разными распределениями ($n=3$); O_i — количество соответствующих гипотезе наблюдений на i -м интервале; E_i — соответствующее теоретическое количество наблюдений.

Проверку нулевой гипотезы провели на уровне значимости $\alpha=0,05$ (вероятность ошибки 1-го рода, то есть ложноотрицательной); на основе расчёта (1) нулевая гипотеза для всех трёх интервалов не опровергается.

Сертификация БАС и организаций по ТО БАС в качестве разработчика и изготовителя АТ

Важными аспектами обеспечения эффективной и безопасной эксплуатации БАС являются компетенции разработчика, изготовителя и организации по ТО. Для безусловного выполнения требований нормативных документов по сертификации авиационных организаций (ФАП-21¹³)

¹³ Приказ Минтранса России от 17.06.2019 № 184 (ред. от 29.05.2023) «Об утверждении Федеральных авиационных правил «Сертификация авиационной техники, организаций разработчиков и изготовителей. Часть 21».

в современных условиях организация по ТО зачастую имеет сертификат разработчика и изготовителя. Например, Сертификат разработчика авиационной техники № ФАВТ-Р 59 от 23.05.2022 года выдан С 7 ИНЖИНИРИНГ. В Приложении к Сертификату, пункт «1. Распространение Сертификата» указано, что С 7 ИНЖИНИРИНГ может выполнять разработку, модификацию и доказательство соответствия требованиям ФАП самолётов Airbus A319, A320, A321, A330, A350 и других типов и модификаций. С 7 ИНЖИНИРИНГ может также разрабатывать и проводить модификации фюзеляжа, крыла, оперения, пилонов, маршевого и вспомогательного двигателей.

В связи с вышеизложенным представляется целесообразным дать возможность организациям по ТО проходить сертификацию в качестве разработчика и изготовителя АТ, что позволит снизить затраты на все этапы жизненного цикла изделия АТ. Для этого в том числе потребуется разработка процедур обеспечения ЛГ и ПЛГ БАС, типовых организационных и технологических структур производственных цехов [12], а также внедрение аддитивных технологий изготовления деталей и узлов БАС. Целесообразно также активное внедрение автоматизированных систем контроля, которые позволят сократить время диагностики и повысить точность анализа состояния узлов и агрегатов. С учётом требований к возникновению событий БАС с БВС самолётного типа (НЛГ БАС СТ) в процессе сертификации АТ согласно ФАП-21 возможен упрощённый метод – декларативный метод определения соответствия. Пока такой подход существует лишь для БАС, которые заявлены для выдачи сертификата типа ограниченной категории для выполнения авиационно-химических работ, воздушных съёмов и иных видов работ для целей сельского хозяйства и содержат в эксплуатационной документации ограничение высоты полёта – не более 10 метров над поверхностью земли – и запрет полётов над населённой местностью. По мере развития БАС по всем вышеуказанным направлениям, а также с накоплением опыта эксплуатации БАС такой подход возможен и для других типов БАС.

Заключение

На основе проведённых исследований по ПТЭ и процедурам ПЛГ БАС:

- установлено, что национальная нормативная база по процедурам обеспечения ЛГ и ПЛГ БАС требует совершенствования и гармонизации с международными документами;
- проведён успешный эксперимент по актуализации локальных нормативных документов авиационных организаций с помощью нейросети;
- приведён пример оценки технического состояния авиационных двигателей в целях уменьшения продолжительности и трудоёмкости работ с использованием нейросети;
- усовершенствован алгоритм решения задачи по моделированию ПЛГ БАС как марковской цепи на основе анализа в части моделирования трудоёмкости ПТО АТ;
- выдвинуто предложение организации по ТО БАС сертифицировать в качестве разработчиков и изготовителей АТ, а к сертификации типа БАС ограниченной категории применять декларативный метод определения соответствия с учётом накопленного опыта эксплуатации.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Петров А. Н. Методология поддержания лётной годности воздушного судна на основе управления эффективностью системы его технического обслуживания и ремонта // Научный вестник МГТУ ГА. 2008. № 130. С. 33–41.
2. Алексанян А. Р. Формирование процедур поддержания лётной годности воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2011. № 173. С. 52–60.

3. Ицкович А. А., Файнбург И. А., Алексанян А. Р. Методологические аспекты программного управления процессами поддержания лётной годности воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 219. С. 12–19.
4. Самуленков Ю. И., Кириллова Н. Б., Далецкий С. С., Рогозин Р. М. Организационно-технические аспекты обеспечения лётной годности БВС // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 39. С. 60–71.
5. Баринов Ю. В. Управление организационно-технологическими изменениями в экономических системах // Вестник Волжского университета им. В. Н. Татищева. 2010. № 19. С. 16–24.
6. Крапивин Ю. Б., Алькатуана Х. А., Страчук И. В. Использование нейронных сетей для поиска информации в сети Internet // Вестник Брестского государственного технического университета. 2006. № 5. С. 60–63.
7. Власов С. О., Гладышев А. И., Богуславский А. А., Соколов С. М. Решение задачи обнаружения объекта с помощью нейросетевых технологий // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2023. № 16. 27 с.
8. Машошин О. Ф., Гусейнов Г. Выбор и адаптация алгоритмов нейронных сетей для диагностики технического состояния авиационных двигателей // Автоматизация. Современные технологии. 2024. Т. 78. № 10. С. 436–441. <https://www.elibrary.ru/gummch>
9. Самуленков Ю. И., Филатова Я. А., Грузд А. Д. Построение имитационной математической модели системы технического обслуживания воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2021. Т. 24. № 4. С. 38–49.
10. Самуленков Ю. И., Тоиров И. С., Грузд А. Д. Подход к построению математической модели системы поддержания лётной годности воздушных судов с учётом безопасности полётов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 49. С. 55–67.
11. Самуленков Ю. И., Тоиров И. С., Грузд А. Д. Программа расчёта показателей эффективности системы технической эксплуатации беспилотных воздушных судов на основе интегральной математической модели: программа для ЭВМ RU2025667575 // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем. 2025. № 7.
12. Самуленков Ю. И., Бабков А. Б., Филатова Я. А. Совершенствование инфраструктуры аэропортов гражданской авиации с учётом проектирования организаций по техническому обслуживанию воздушных судов // Научный вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25. № 1. С. 35–52.

References

1. Petrov A. N. Aircraft continuing airworthiness methodology based on the control of the maintenance system effectiveness. *Civil Aviation High Technologies*, 2008, no. 130, pp. 33–41. (In Russ.)
2. Aleksanyan A. R. The formation of procedures of continuing airworthiness of aircrafts. *Civil Aviation High Technologies*, 2011, no. 173, pp. 52–60. (In Russ.)
3. Itskovich A. A., Fainburg I. A., Aleksanyan A. R. Methodological aspects of software processes management of the airworthiness of aircraft. *Civil Aviation High Technologies*, 2015, no. 219, pp. 12–19. (In Russ.)
4. Samulenkoy Yu. I., Kirillova N. B., Daletsky S. S., Rogozin R. M. Organizational and technical aspects of ensuring the airworthiness of unmanned aircraft. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 39, pp. 60–71. (In Russ.)
5. Barinov Yu. V. The management of organizationally-technological changes in economic systems. *Bulletin of the Volga University*, 2010, no. 19, pp. 16–24. (In Russ.)
6. Krapivin Yu. B., Alcatuana H. A., Strachuk I. V. The use of neural networks to search for information on the Internet. *Bulletin of Brest State Technical University*, 2006, no. 5, pp. 60–63. (In Russ.)
7. Vlasov S. O., Gladyshev A. I., Boguslavsky A. A., Sokolov S. M. *Solving the problem of object detection using neural network technologies*. Preprints of the Keldysh IPM, 2023, no. 16, 27 p. (In Russ.)
8. Mashoshin O. F., Huseynov G. Selection and adaptation of neural network algorithms for diagnosing the technical condition of aircraft engines. *Automation. Modern Technologies*, 2024, vol. 78, no. 10, pp. 436–441. <https://www.elibrary.ru/gummch> (In Russ.)

9. Samulenkov Yu. I., Filatova Ya. A., Gruzd A. D. Aircraft maintenance system simulation mathematical model construction. *Civil Aviation High Technologies*, 2021, vol. 24, no. 4, pp. 38–49. (In Russ.)
10. Samulenkov Yu. I., Toirov I. S., Gruzd A. D. Approach to building a mathematical model of the airworthiness support system for aircraft taking flight safety into account. *Scientific Bulletin of the State Research Institute of Civil Aviation*, 2025, no. 49, pp. 55–67. (In Russ.)
11. Samulenkov Yu. I., Toirov I. S., Gruzd A. D. Program for calculating the performance indicators of the technical operation system for unmanned aerial vehicles based on an integral mathematical model. Computer Program RU2025667575, *Computer Programs, Databases, TIC*, 2025, no. 7.
12. Samulenkov Yu. I., Babkov A. B., Filatova Ya. A. Improving civil aviation airports infrastructure taking into account the design process of aircraft maintenance organizations. *Civil Aviation High Technologies*, 2022, vol. 25, no. 1, pp. 35–52. (In Russ.)

Информация об авторах

Тоиров Илхом Сафарович, аспирант, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия, aviator-caatj@mail.ru

Самуленков Юрий Иванович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технической эксплуатации летательных аппаратов и авиационных двигателей, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия, yu.samulenkov@mstuca.ru

Authors information

Toirov Ilhom S., Postgraduate Student, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia, aviator-caatj@mail.ru

Samulenkov Yuri I., Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technical Operation of Aircraft and Engines, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia, yu.samulenkov@mstuca.ru

Статья поступила в редакцию 19.06.2025; одобрена после рецензирования 02.09.2025; принята к публикации 10.09.2025.

The article was submitted 19.06.2025; approved after reviewing 02.09.2025; accepted for publication 10.09.2025.

Научная статья
УДК 347.82

О НЕОБХОДИМОСТИ ГАРМОНИЗАЦИИ НАЦИОНАЛЬНОГО АВИАЦИОННОГО ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА С МЕЖДУНАРОДНЫМИ СТАНДАРТАМИ ИКАО: ТРЕБОВАНИЯ И ПОСЛЕДСТВИЯ НЕСООТВЕТСТВИЯ

Г. Е. ГЛУХОВ

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. В статье рассматриваются современные подходы к гармонизации национального авиационного законодательства Российской Федерации с международными стандартами и рекомендуемой практикой Международной организации гражданской авиации (ИКАО) в сфере обеспечения безопасности авиационной деятельности. Особое внимание уделено международному опыту преодоления последствий несоответствия стандартам ИКАО. Обоснована актуальность дальнейшей гармонизации законодательства для обеспечения устойчивого развития национальной авиационной отрасли и повышения её конкурентоспособности в условиях современных глобальных вызовов. Сформулированы рекомендации по совершенствованию нормативно-правовой базы, а также интеграции российской авиационной системы в глобальное авиационное пространство.

Ключевые слова: ИКАО, авиационная безопасность, безопасность полётов, гармонизация законодательства, соответствие нормативной базы, авиационная деятельность, международное сотрудничество, гражданская авиация, транспортные системы страны

Для цитирования: Глухов Г. Е. О необходимости гармонизации национального авиационного законодательства с международными стандартами ИКАО: требования и последствия несоответствия // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 51. С. 83–92.

NECESSITY OF HARMONIZATION OF NATIONAL AVIATION LEGISLATION WITH ICAO INTERNATIONAL STANDARDS: REQUIREMENTS AND CONSEQUENCES OF NON-COMPLIANCE

G. E. GLUKHOV

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

Abstract. The article examines modern approaches to harmonizing the national aviation legislation of the Russian Federation with the international standards and recommended practices of the International Civil Aviation Organization (ICAO) in the field of aviation safety. Particular attention is paid to international experience in overcoming the consequences of non-compliance with ICAO standards. The relevance of further harmonization of legislation is substantiated to ensure sustainable development of the national aviation industry and to enhance its competitiveness under modern global challenges. The practical significance of the study lies in formulating recommendations for improving the regulatory framework and integrating the Russian aviation system into the global aviation space.

Keywords: ICAO, aviation safety, flight safety, legislative harmonization, regulatory compliance, aviation activities, international cooperation, civil aviation, transport systems of the country

For citation: Glukhov G. E. Necessity of harmonization of national aviation legislation with ICAO international standards: requirements and consequences of non-compliance. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2025, no. 51, pp. 83–92. (In Russ.)

Введение

Безопасность авиационной деятельности – ключевой элемент устойчивого развития гражданской авиации, обеспечивающий предотвращение актов незаконного вмешательства (в сфере авиационной безопасности, далее АБ), минимизацию рисков авиационных происшествий (в сфере безопасности полётов, далее БП) и поддержание доверия к международной авиационной системе. В условиях глобализации воздушного транспорта согласованность национальной нормативной базы с международными стандартами, разработанными ИКАО, становится критически важной.

ИКАО, как специализированное учреждение Организации Объединённых Наций, устанавливает глобальные стандарты и рекомендуемую практику (SARPs), формируя основу для гармонизированного регулирования в странах-участницах, включая Российскую Федерацию. Гармонизация национальных и международных стандартов способствует однородности регулирования, упрощает взаимодействие аэронавигационных систем и повышает уровень безопасности авиационной деятельности. Несоблюдение SARPs может привести к ограничениям на международные перевозки и снижению доверия к национальной авиационной системе. ИКАО также осуществляет контроль внедрения своих стандартов, проводит аудит национальных авиационных властей и оказывает техническую поддержку государствам для повышения эффективности и безопасности авиационной деятельности [1].

Российская Федерация является членом ИКАО с 1970 года как правопреемник СССР. В 1990-е годы отрасль переживала переходный период из-за ликвидации Министерства гражданской авиации и реформирования системы государственного управления. Данная статья посвящена анализу значения гармонизации национального авиационного законодательства Российской Федерации с международными стандартами ИКАО, выявлению существующих проблем и рассмотрению последствий несоответствия требованиям ИКАО. Все рекомендации, представленные в статье, соответствуют современным вызовам и актуальному состоянию российского авиационного сектора.

Значение соответствия нормативной базы РФ требованиям ИКАО: ключевые аспекты

Соответствие российской нормативной базы стандартам и рекомендованной практике ИКАО является фундаментальным условием для обеспечения высокого уровня БП, интеграции в мировую авиационную систему и поддержания конкурентоспособности отечественной авиации на глобальном рынке [1].

Ключевые аспекты необходимости соответствия российской нормативной базы стандартам ИКАО включают:

- *Повышение БП и АБ.* Гармонизация российских стандартов с требованиями ИКАО способствует унификации процедур эксплуатации, технического обслуживания, сертификации воздушных судов (ВС), а также внедрению мер по предотвращению актов незаконного вмешательства [1, 2].

- *Упрощение международного взаимодействия.* Приведение национальных правил в соответствие со стандартами ИКАО обеспечивает однородность регулирования, упрощает

взаимодействие с зарубежными авиационными администрациями и компаниями, способствует безопасному выполнению международных рейсов.

- *Снижение рисков ограничений на международные перевозки.* Несоответствие стандартам ИКАО может привести к введению ограничений на международные перевозки, что негативно влияет на экономику отрасли и имидж страны.

- *Учёт специфики национальной системы.* В процессе гармонизации важно адаптировать международные стандарты, например, с учётом географических, климатических особенностей, а также особенностей российской авиационной отрасли, включая вопросы АБ, а также специфику беспилотных авиационных систем.

- *Унификация подготовки авиационного персонала.* Соответствие требованиям ИКАО предполагает унификацию программ подготовки авиационного персонала, что способствует признанию российских квалификаций за рубежом [3, 4].

- *Техническая и организационная модернизация.* Гармонизация стандартов требует модернизации технической базы, совершенствования организационных процессов управления воздушным движением и БП, внедрения современных систем мониторинга за соблюдением соответствия национальной нормативной базы международным требованиям [5, 6], а также совершенствования методов анализа и управления безопасностью авиационной деятельности [7].

Таким образом, соответствие нормативной базы Российской Федерации международным стандартам ИКАО – необходимое условие для устойчивого развития гражданской авиации, повышения уровня безопасности авиационной деятельности и интеграции в глобальную авиационную систему. Гармонизация позволяет обеспечить конкурентоспособность российской гражданской авиации, укрепить международные позиции нашей страны и повысить уровень БП как внутри государства, так и за его пределами.

Основные международные стандарты и рекомендуемая практика ИКАО в сфере безопасности авиационной деятельности

ИКАО занимает важное место в обеспечении безопасности международного воздушного транспорта, разрабатывая и регулярно обновляя SARPs, представленные в девятнадцати Приложениях к Конвенции [8]. Приложения к Конвенции (далее – Приложения ИКАО) представляют собой правовую и технологическую базу для разработки и соблюдения единых стандартов безопасности авиационной деятельности в государствах-участниках ИКАО.

Приложения ИКАО, регулирующие БП и АБ

SARPs ИКАО охватывают все аспекты деятельности гражданской авиации – от проектирования и эксплуатации ВС до обучения персонала и мер по противодействию актам незаконного вмешательства. Важное значение для обеспечения БП и АБ имеют следующие Приложения ИКАО:

- Приложение 17 «Охрана: Защита международной гражданской авиации от актов незаконного вмешательства» – определяет требования к организации системы АБ на международном уровне, включая проверку пассажиров и багажа, контроль доступа в ограниченные зоны, защиту от актов терроризма, угроз и иных противоправных действий. Приложение регулярно обновляется с учётом развивающихся угроз, в том числе связанных с кибербезопасностью.

- Приложение 19 «Управление безопасностью» – комплексно регулирует вопросы функционирования систем управления БП в структурах гражданской авиации, а также государственную систему управления безопасностью. Его положения акцентируют внимание на проактивном управлении рисками, извлечении данных из инцидентов и культуре безопасности.

Другие Приложения ИКАО, связанные с АБ и БП, указаны в таблице.

Приложения ИКАО, затрагивающие сферу обеспечения БП и частично АБ

Приложение ИКАО	Категория безопасности	Основное содержание и частичное затрагивание безопасности авиационной деятельности
Приложение 1. Выдача свидетельств авиационному персоналу.	Безопасность полётов	Выдача свидетельств лётному и техническому персоналу, включая квалификационные требования для выдачи лицензий. Установление стандартов квалификации и лицензирования лётного и технического персонала (пилоты, авиадиспетчеры, инженеры и т. д.) с целью обеспечения БП
Приложение 6. Эксплуатация воздушных судов.	Безопасность полётов и авиационная безопасность	Правила эксплуатации ВС, обеспечение контроля и надёжности оператора. В части БП – устанавливает стандарты и процедуры эксплуатации ВС, включая полётные операции, обслуживание, подготовку экипажей и т. д. В части АБ – включает отдельные аспекты, связанные с защитой от угроз, например, положения, касающиеся перевозки опасных грузов, которые могут быть использованы в террористических целях
Приложение 8. Лётная годность воздушных судов.	Безопасность полётов	Проектирование, производство, сертификация и поддержание лётной годности ВС. Устанавливает технические стандарты, которые обеспечивают надёжность и безопасность конструкции, эксплуатации и обслуживания ВС
Приложение 11. Обслуживание воздушного движения.	Безопасность полётов и авиационная безопасность	Организация обслуживания воздушного движения, предотвращение столкновений и рисков в воздушном пространстве. В части БП – один из ключевых документов ИКАО, регулирующих вопросы БП. В части АБ – содержит положения, касающиеся информирования о чрезвычайных ситуациях, включая угоны ВС
Приложение 13. Расследование авиационных происшествий и инцидентов.	Безопасность полётов и авиационная безопасность	Расследование авиационных происшествий и инцидентов, формирование корректирующих мер. В части БП – способствует предотвращению авиационных происшествий посредством систематического расследования инцидентов и происшествий с целью выявления причин и рекомендаций для повышения уровня БП. В части АБ – содержит положения, касающиеся расследования происшествий, вызванных незаконным вмешательством
Приложение 14. Аэродромы.	Безопасность полётов и авиационная безопасность	Проектирование и эксплуатация аэродромов, обеспечение условий безопасности и охраны В части БП – положения по спасанию и пожаротушению, предотвращению столкновений с препятствиями и животными, системам аэронавигационной информации, визуальной индикации, состоянию ВПП, рулёжных дорожек и перронов. В части АБ – планирования аэродромов с учётом антитеррористической защищённости, особенно в части ограждений, систем видеонаблюдения и контроля доступа, а также изолированных мест стоянки ВС

Таким образом, структура приложений ИКАО обеспечивает всеобъемлющее регулирование процессов, влияющих на безопасность авиационной деятельности гражданской авиации. Документы ИКАО формируют интегрированную систему стандартов и рекомендуемой практики,

в рамках которой требования по обеспечению БП и АБ дополняют друг друга, способствуя комплексному подходу к обеспечению безопасности гражданской авиации на глобальном уровне.

Механизмы внедрения стандартов ИКАО в национальное законодательство

Внедрение стандартов ИКАО на национальном уровне осуществляется в форме имплементации – включения основных положений международных стандартов в национальные нормативно-правовые акты и практику ведомственного регулирования, что позволяет обеспечить сопоставимый уровень безопасности во всех государствах-участниках.

Ключевые направления внедрения стандартов ИКАО включают:

- изменение национального законодательства, в том числе федеральных авиационных правил и ведомственных актов, с целью приведения их в соответствие с SARPs ИКАО;
- развитие системы подготовки и подтверждения квалификации авиационного персонала;
- внедрение систем управления БП на уровне эксплуатантов и других поставщиков услуг, а также государственной системы управления БП;
- совершенствования процедур сертификации эксплуатантов ВС, организаций по техническому обслуживанию, а также процедур подтверждения лётной годности ВС;
- применение риск-ориентированных подходов к осуществлению государственного надзора за соблюдением требований безопасности авиационной деятельности.

ИКАО обеспечивает контроль соответствия государств-членов требованиям по БП и АБ посредством двух универсальных программ аудита:

- Универсальной программы проверки надзора в области безопасности полётов (USOAP), направленной на аудит национальной авиационной системы по восьми критическим элементам и внедрение мер по предотвращению нарушений. USOAP способствует выявлению и устранению недостатков в национальных системах регулирования БП [9].
- Универсальной программы проверки надзора в области авиационной безопасности (USAP), которая фокусируется на оценке мер по защите гражданской авиации от актов незаконного вмешательства, включая борьбу с терроризмом, контроль доступа, физическую охрану и другие аспекты АБ.

Более того, ИКАО предоставляет государствам-участникам Интегрированную систему мониторинга iSTARS, позволяющую обобщать и анализировать данные по АБ, выявлять тренды и планировать корректирующие действия в целях непрерывного повышения уровня безопасности.

Таким образом, механизмы внедрения стандартов ИКАО в национальное законодательство представляют собой комплексный и многоуровневый процесс, направленный на достижение единого и сопоставимого уровня безопасности авиационной деятельности во всех государствах – членах организации. Он охватывает как законодательное приведение национальных нормативных актов и правил в соответствие с SARPs, так и развитие кадрового потенциала, а также совершенствование сертификационных процедур и систем контроля безопасности авиационной деятельности.

Проблемы и барьеры гармонизации национального законодательства с требованиями ИКАО

Несмотря на комплексный и многоуровневый подход к внедрению стандартов ИКАО, процесс гармонизации национального законодательства с международными стандартами ИКАО осложняется рядом следующих обстоятельств.

- *Правовые и организационные барьеры.* Различия в структуре и содержании национальных правовых систем затрудняют прямую имплементацию стандартов ИКАО. Серьёзной проблемой является различие в структуре, терминах и содержании национальных правовых систем.

В частности, при согласовании новых нормативных актов часто теряются важные элементы международных стандартов, что ведёт к неполному соответствию требованиям ИКАО [10]. Необходимость адаптации международных требований к национальным условиям требует значительных усилий со стороны законодателей и регулирующих органов. Механизмы имплементации осложняются необходимостью их рассмотрения и согласования во множестве государственных органов, каждый из которых трактует отдельные положения через призму национальных интересов и специфики.

- *Технические и кадровые ограничения.* Недостаток квалифицированных специалистов, устаревшая инфраструктура и ограниченные финансовые ресурсы могут замедлять внедрение новых стандартов и технологий.

- *Влияние национальных особенностей.* Учёт специфики национальной авиационной отрасли, включая социально-экономические, географические и климатические условия, требует гибкого подхода к гармонизации.

- *Лингвистические и методологические трудности.* Важным моментом является проблема качества перевода англоязычных версий SARPs, а также методологического обеспечения их адаптации. Неоднозначности и ошибки перевода ключевых терминов и понятий, разночтения в определениях способны приводить к неправильному толкованию и системным ошибкам при разработке и применении национальных нормативных документов. Отсутствие единого методологического подхода к имплементации, а также замедленная публикация официальных переводов ухудшают эффективность нормотворческого процесса и практического применения SARPs в государстве [11].

- *Постоянное обновление стандартов.* ИКАО регулярно пересматривает и дополняет стандарты с учётом развития технологий и появления новых угроз, что требует от государств оперативного реагирования и обязательного обновления нормативной базы¹, а также эффективных инструментов для отслеживания изменений [5, 6].

Перечисленные барьеры приводят к задержкам в адаптации международных авиационных стандартов, снижают эффективность обеспечения безопасности авиационной деятельности, а также могут создавать дополнительные риски и ограничения в области международного сотрудничества и допуска к выполнению международных перевозок.

Последствия несоблюдения стандартов ИКАО: международный опыт и примеры ограничений

Несоблюдение SARPs ИКАО может привести к серьёзным последствиям для государств и авиакомпаний. Рассмотрим основные виды ограничений и конкретные примеры.

1. *Введение ограничений на международные перевозки.* Одним из известных инструментов (помимо FAA – IASA², ИКАО – USOAP, IATA – IOSA³, EASA – TCO⁴, а также национальных и региональных чёрных списков) является EU Air Safety List [12], в который

¹ Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 24 апреля 2008 г. № 65 «Об образовании Межведомственной комиссии по делам Международной организации гражданской авиации (ИКАО)» и Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 25 апреля 2008 г. № 66 «О Межведомственной комиссии по авиационной безопасности, безопасности полётов гражданской авиации и упрощению формальностей» создают координационные механизмы для работы с ИКАО, но не устанавливают общей, обязательной процедуры по имплементации SARPs для всех ведомств и всех стандартов ИКАО.

² FAA – IASA (Federal Aviation Administration – International Aviation Safety Assessment) – международная программа оценки безопасности авиации США.

³ IATA – IOSA (International Air Transport Association – IATA Operational Safety Audit) – аудит эксплуатационной безопасности авиакомпаний по стандартам IATA.

⁴ EASA – TCO (European Union Aviation Safety Agency – Third Country Operator) – сертификация операторов из третьих стран для допуска в воздушное пространство ЕС.

включаются авиакомпании, не соответствующие международным стандартам безопасности. Например, в разные годы в этот список попадали авиакомпании из Индонезии, Филиппин, Судана, Ирана и других стран, что приводило к запрету на выполнение рейсов в страны Европейского союза [9, 12].

2. Приостановка полётов и санкции.

2.1. Индонезия: в 2007 году Европейская комиссия ввела запрет на полёты всех индонезийских авиакомпаний в ЕС из-за неудовлетворительных результатов аудита ИКАО и выявленных нарушений в системе государственного надзора⁵.

2.2. Филиппины: аналогичные меры применялись к авиакомпаниям Филиппин, которые были исключены из списка [12] только после масштабных реформ и повышения уровня соответствия стандартам ИКАО [13].

2.3. Казахстан: в 2009 году по итогам комплексного аудита ИКАО уровень соответствия Казахстана международным требованиям составил всего 62 %⁶. В результате выявленных существенных замечаний практически все казахстанские авиакомпании, за исключением AirAstana, были внесены в «чёрный список» Евросоюза. Эта ситуация стала прямым следствием невыполнения SARPs и показала, что несоответствие международным требованиям приводит к реальным ограничениям со стороны зарубежных авиационных властей. Только после масштабных реформ и совершенствования системы государственного контроля часть ограничений была снята, и отдельные перевозчики получили допуск к полётам в Европу.

2.4. Российская Федерация: в апреле 2022 года Европейская комиссия внесла 20 российских авиакомпаний в EU Air Safety List [12], запретив им деятельность на территории ЕС⁷. Причиной стало то, что российские авиакомпании эксплуатировали ВС, находящиеся в иностранном лизинге, без действительных (в рамках ЕС и международных норм) сертификатов лётной годности. В заявлении Еврокомиссии отмечается, что это решение принято исключительно по техническим причинам и соображениям безопасности, а не как политическая санкция. Однако ситуация возникла в результате одностороннего аннулирования сертификатов лётной годности зарубежными регистраторами (Бермудские острова, Ирландия) после введения западных санкций и закрытия воздушного пространства для российских перевозчиков. В России решение ЕС рассматривается не только как техническая мера, но и как часть общего комплекса политических и санкционных ограничений, введённых против РФ⁸.

3. *Экономические и имиджевые потери.* Ограничения на международные перевозки приводят к снижению доходов авиакомпаний, потере рынков и ухудшению репутации государства как участника международной авиационной системы.

4. *Влияние на национальную авиацию.* Введение ограничений на международные полёты стимулирует государства к ускоренной гармонизации законодательства, модернизации инфраструктуры и повышению квалификации персонала, однако требует значительных инвестиций и времени [14].

Эти примеры демонстрируют критическую важность своевременного и полного выполнения требований стандартов ИКАО для поддержания доступа к международным рынкам и обеспечения устойчивого развития авиационной отрасли.

⁵ European Commission. Regulation (EC) No 474/2006 of 22 March 2006 establishing the Community list of air carriers which are subject to an operating ban within the Community and its subsequent amendments. Official Journal of the European Union, 2006–2025.

⁶ Комитет гражданской авиации Министерства по инвестициям и развитию Республики Казахстан. Казахстан повысил уровень соответствия требованиям ИКАО до 83 % [официальный интернет-портал, 2017]. URL: <https://www.zakon.kz/4888573-kazahstan-povyysil-uroven-sootvetstviya.html> (дата обращения: 07.07.2025).

⁷ Commission Implementing Regulation (EU) 2022/594 of 8 April 2022 amending Regulation (EC) No. 474/2006 as regards the list of air carriers banned from operating within the Union. Official Journal of the European Union, 2022, vol. 65, pp. 49–56.

⁸ Выйти за флажок: власти РФ намерены оспорить негативный статус гражданской авиации. URL: <https://www.aviaport.ru/news/vyyti-za-flazhok-vlasti-rf-namereny-osporit-negativnyy-status-grazhdanskoy-aviatsii/>

Заключение

Совершенствование законодательства и нормативных актов, регулирующих гражданскую авиацию в России, должно основываться на планомерной и системной гармонизации с международными стандартами и рекомендуемой практикой ИКАО.

Как показано выше, несоблюдение стандартов и рекомендаций ИКАО приводит к серьёзным экономическим потерям, снижению международной репутации, ограничению доступа российских авиакомпаний к зарубежным рынкам и необходимости проведения масштабных структурных реформ.

Для повышения эффективности процесса гармонизации российской нормативной базы с положениями ИКАО целесообразно обеспечить:

1. Разработку единых процедур оперативной имплементации изменений ИКАО – это позволит своевременно обновлять нормативную базу и повысить её актуальность.

2. Инвестиции в развитие кадровых ресурсов и повышение квалификации специалистов – внедрение систем непрерывного профессионального образования, организация стажировок и активное участие в международных образовательных программах обеспечат успешную интеграцию стандартов.

3. Адаптацию стандартов ИКАО с учётом национальных особенностей – формирование методических разъяснений и рекомендаций, учитывающих специфику географии, климата и технологического развития Российской Федерации.

4. Усиление межведомственного взаимодействия и координации – создание постоянных рабочих групп и координационных механизмов ускорит согласование актов и снизит дублирование регуляторных функций.

5. Развитие международного и регионального сотрудничества – обмен опытом и участие в международных и профильных организациях, в том числе в рамках БРИКС, Евразийского экономического союза и ИКАО, способствуют комплексной и синхронизированной модернизации отрасли.

Реализация указанных рекомендаций позволит не только повысить эффективность гармонизации российского законодательства с международными стандартами, но и создать условия для устойчивого развития воздушного транспорта, повышения конкурентоспособности отечественных перевозчиков и их интеграции в глобальное авиационное пространство.

Дальнейшее развитие авиационного законодательства и соблюдение его соответствия стандартам ИКАО с учётом национальной специфики в сочетании с внедрением современных инструментов мониторинга в области безопасности авиационной деятельности остаётся одной из ключевых задач развития отрасли.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The author declares no conflict of interest.

Список источников

1. ИКАО Doc 10004. Глобальный план обеспечения безопасности полётов 2023–2025. ИКАО, 2023. 58 с.
2. International Civil Aviation Organization. Safety Report 2024. ICAO, 2024.
3. Пиджаков А. Ю., Малькова Е. Г. Юридическая природа и проблемы практического применения международных авиационных регламентов, регулирующих вопросы обеспечения авиационной безопасности // Научный вестник МГТУ ГА. 2009. № 144. С. 63–71.
4. Чинючин Ю. М., Берлев В. П., Горбунова Д. К. Характеристика основных международных требований к системе подготовки авиационных специалистов для российских авиакомпаний // Научный вестник МГТУ ГА. 2013. № 197. С. 89–95.

5. Glukhov G. Analysis of safety indices of flights and aviation security in relation to the task on construction of two-level system of continuous information monitoring of aviation activity safety. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 2654–2662.
6. Благоразумов А. К., Глухов Г. Е., Кирпичев И. Г. Разработка системы информационного мониторинга безопасности авиационной деятельности // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 218. С. 67–70.
7. European Union Aviation Safety Agency. Annual Safety Review 2024. Cologne, EASA, 2024, 140 p.
8. Конвенция о международной гражданской авиации. Чикаго, 7 дек. 1944 г. ИКАО Doc 7300.
9. European Union Aviation Safety Agency. Annual Safety Review 2023. Cologne, EASA, 2023, 120 p.
10. Лебедева М. Ю. Некоторые правовые проблемы формирования национального законодательства об аэропортах и внедрения стандартов ИКАО в их деятельность // Научный вестник МГТУ ГА. 2011. № 170. С. 44–50.
11. Гузий А. Г., Шпаковская А. А., Муравьев А. С. Методологическое обеспечение имплементации международных стандартов по безопасности полётов в российских нормативных документах // *Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык*. 2024. № 1(40). https://doi.org/10.51955/2312-1327_2024_1_37
12. European Commission. EU Air Safety List: List of air carriers which are subject to an operating ban within the European Union. Brussels, European Commission, 2024.
13. ICAO. Universal Safety Oversight Audit Programme (USOAP): Audit Results by State. ICAO, 2023.
14. Abeyratne R. I. R. *Aviation Security Law*. Berlin, Springer, 2018, 350 p.

References

1. ICAO Doc 10004. Global Aviation Safety Plan 2023–2025. 2023, 52 p.
2. International Civil Aviation Organization. Safety Report 2024. ICAO, 2024, 98 p.
3. Pidzhakov A. Yu., Malkova E. G. Law nature and problems of practical work of the international aviation regulations, which control the ways of aviation safety and security. *Civil Aviation High Technologies*, 2009, no. 144, pp. 62–71. (In Russ.)
4. Chinyuchin Yu. M., Berlev V. P., Gorbunova D. K. International maintenance personnel training requirements characteristics for russian airlines aircraft operating. *Civil Aviation High Technologies*, 2013, no. 197, pp. 90–93. (In Russ.)
5. Glukhov G. Analysis of safety indices of flights and aviation security in relation to the task on construction of two-level system of continuous information monitoring of aviation activity safety. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 2654–2662.
6. Blagorazumov A. K., Glukhov G. E., Kirpichev I. G. Development of the aviation safety information monitoring system. *Civil Aviation High Technologies*, 2015, no. 218, pp. 67–70. (In Russ.)
7. European Union Aviation Safety Agency. Annual Safety Review 2024. Cologne, EASA, 2024, 140 p.
8. Convention on International Civil Aviation. Signed at Chicago, December 7, 1944. ICAO Doc 7300.
9. European Union Aviation Safety Agency. Annual Safety Review 2023. Cologne, EASA Publ., 2023, 120 p.
10. Lebedeva M. Yu. Some legal problems of formation of the national legislation on the airports and introductions of standards ИКАО in their activity. *Civil Aviation High Technologies*, 2011, no. 170, pp. 44–50. (In Russ.)
11. Guziy A. G., Shpakovskaya A. A., Muravyov A. S. Methodological support for the implementation of international flight safety standards in russian civil aviation. *Crede Experto: transport, society, education, language*, 2024, no. 1(40), pp. 37–56. (In Russ.) https://doi.org/10.51955/2312-1327_2024_1_37
12. European Commission. EU Air Safety List: List of air carriers which are subject to an operating ban within the European Union. Brussels, European Commission, 2024.
13. ICAO. Universal Safety Oversight Audit Programme (USOAP): Audit Results by State. ICAO, 2023.
14. Abeyratne R. I. R. *Aviation Security Law*. Berlin, Springer, 2018, 350 p.

Информация об авторе

Глухов Геннадий Евгеньевич, заместитель директора – начальник отдела Информационно-аналитического центра, эксперт Системы добровольной сертификации объектов гражданской авиации (СДС ОГА), Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, gge@gosniiga.ru

Author information

Glukhov Gennady E, Deputy Director – Head of the Information and Analytical Center Department, Expert of the Voluntary Certification System for Civil Aviation Security (SDS OGA), The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, gge@gosniiga.ru

*Статья поступила в редакцию 05.08.2025; одобрена после рецензирования 04.09.2025; принята к публикации 10.09.2025.
The article was submitted 05.08.2025; approved after reviewing 04.09.2025; accepted for publication 10.09.2025.*

Обзорная статья
УДК 351.814.2

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ПОЛЁТОВ НА ВОЗДУШНОМ ТРАНСПОРТЕ

Д. С. САВОСТИН, Д. П. ПОПОВ, С. А. КОВАЛЕВСКИЙ

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. Безопасность полётов в гражданской авиации (ГА) является одной из ключевых и важнейших задач, стоящих перед современными авиакомпаниями. Эффективные системы управления безопасностью полётов представляют собой комплексы мер и процедур, направленных на предотвращение инцидентов и минимизацию рисков, непосредственно связанных с авиационной деятельностью. Однако оценка эффективности подобных систем является непростой и неоднозначной ввиду отсутствия мерных и измеримых величин безопасности, а реальная значимость безопасности чаще всего проявляется только при возникновении инцидентов и аварий. Чёткого пути к оценке эффективности системы управления безопасностью полётов на данный момент не существует. В литературе регулярно предлагаются новые подходы по созданию инструментов оценки, но при внимательном изучении этих инструментов всегда обнаруживаются значительные недостатки. В первую очередь у современных подходов отсутствуют чёткие индикаторы успеха. В настоящей работе рассмотрено применение двух количественных методов оценки эффективности, а именно анализа среды функционирования и метода «ввод-вывод». Продемонстрированы сильные и слабые стороны этих методик, а также отмечены направления для их дальнейшего развития и применения в рамках оценки эффективности системы управления безопасностью полётов.

Ключевые слова: гражданская авиация, воздушное судно, система управления безопасностью, воздушный транспорт, безопасность полётов, транспортные системы страны

Для цитирования: Савостин Д. С., Попов Д. П., Ковалевский С. А. Эффективность систем управления безопасностью полётов на воздушном транспорте // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 51. С. 93–99.

EFFECTIVENESS OF SAFETY MANAGEMENT SYSTEMS IN AIR TRANSPORT

D. S. SAVOSTIN, D. P. POPOV, S. A. KOVALEVSKII

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

Abstract. Flight safety in civil aviation is one of the key challenges facing modern airlines. Effective safety management systems are a set of measures and procedures aimed at preventing incidents and minimising risks directly related to aviation activities. However, assessing the effectiveness of such systems is difficult and ambiguous due to the lack of definite measurable safety values, and the real significance of safety is most often revealed only when incidents and accidents occur. There is no clear way to assess the effectiveness of this very system. New approaches to creating assessment tools regularly appear in the literature, but a close examination of these tools always reveals significant shortcomings. First of all, current approaches lack clear indicators of success. This paper examines the application of two quantitative methods of performance evaluation, namely the

operating environment analysis and the input-output method. The strengths and weaknesses of these techniques are demonstrated and areas for their further development and application within the safety management system are highlighted.

Keywords: civil aviation, aircraft, safety management system, air transport, flight safety, performance evaluation, transport systems of the country

For citation: Savostin D. S., Popov D. P., Kovalevskii S. A. Effectiveness of safety management systems in air transport. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2025, no. 51, pp. 93–99. (In Russ.)

Введение

За последние десятилетия авиационная отрасль претерпела значительные изменения, такие как рост объёмов воздушных перевозок, внедрение новых технологий и усложнение операционных условий. В результате обеспечение безопасного функционирования авиационного транспорта выходит на первый план. По данным Международной организации гражданской авиации (ИКАО) количество пассажиров, использующих воздушный транспорт, продолжает расти, что создаёт для авиакомпаний новые вызовы и задачи в области безопасности.

Эффективные системы управления безопасностью полётов (СУБП) включают в себя анализ данных о происшествиях, обучение персонала, разработку стандартов и рекомендаций, а также внедрение технологий мониторинга и оценки безопасности. СУБП не только помогают предотвратить аварии и инциденты, но и способствуют созданию культуры безопасности внутри авиационных организаций.

В условиях постоянно растущего санкционного давления на российскую авиационную отрасль и разрыва отношений с разработчиками воздушных судов (ВС) развитие СУБП является одной из ключевых задач для обеспечения безопасности как на земле, так в воздухе. При разработке современной и эффективной системы необходимо учитывать не только внутренние факторы, но и международные стандарты и практики. В этом контексте важным аспектом является анализ существующих СУБП авиакомпаний мира, а также оценка их эффективности и влияния на общую безопасность полётов. В настоящей статье рассмотрен опыт стран с высоко развитыми СУБП, таких как США и страны Европейского Союза, а также развивающихся стран и регионов, в которых вопросы безопасности требуют особого внимания.

Задачи и цели системы управления безопасностью полётов

Правильная постановка целей и задач в авиакомпании позволяет сформировать у персонала чувство ответственности и настрой на командную работу. Именно установка однозначных и понятных целей и задач представляет собой первые шаги к созданию безопасной рабочей среды, что при любых обстоятельствах должно быть приоритетом для всех сотрудников, начиная с руководства авиакомпании и заканчивая инженерным составом. К наиболее важным целям и задачам авиакомпании в области безопасности полётов относятся:

- оперативное распознавание угроз и их устранение, а также принятие мер по предотвращению подобных ситуаций в будущем;
- снижение эксплуатационных и финансовых расходов за счёт оптимизации существующих процессов и систем;
- разработка однозначного, документированного и понятного подхода к обеспечению безопасности полётов;
- повышение культуры обеспечения безопасности полётов (обучение сотрудников, поддержка и одобрение руководства, регулярные проверки оборудования, систем и др.).

Опасности в авиационной области

Современные организации с целевым подходом зачастую применяют подход к безопасности, направленный на предотвращение несчастных случаев путём выявления возможных опасностей и принятия мер для минимизации возможных рисков. Если ранее в авиакомпании имелся опыт внедрения подобных превентивных организационных практик, направленных на предотвращение инцидентов и аварий, то внедрение СУБП становится в разы проще. В авиационной отрасли имеется значительное количество факторов, влияющих на возможность возникновения различных угроз, включая человеческий фактор, климатические условия, технику, аэропорты и другие. При этом наиболее опасными и потенциально приводящими к возникновению серьёзных аварий или нарушений безопасности являются следующие инциденты:

- разлив авиационного топлива;
- пожар;
- экстремальные погодные условия;
- незаконное вмешательство в деятельность в области авиации;
- производственные травмы сотрудников;
- повреждение оборудования и техники;
- ошибки лётного состава (пилотов).

Изучение опубликованных данных и отчётов IATA¹ по безопасности полётов за период с 2013 по 2019 год и работы [1–4] приводят к выводу, что самыми значительными проблемами в вопросе авиационной безопасности являются человеческие ошибки, в основном ошибки, допущенные экипажами ВС в процессе выполнения полётов. Авторы [5] выдвинули предположение об основных причинах возникновения аварий и инцидентов. По их мнению, за каждой аварией в первую очередь стоит неудачная организация труда. Несмотря на постоянный рост производительности и надёжности нового оборудования, компьютеров и техники, надёжность людей и систем безопасности в целом осталась на прежнем уровне. В связи с этим человеческий фактор и недочёты систем безопасности стали основными причинами большинства авиационных происшествий.

Помимо человеческого фактора влияние как на безопасность полётов, так и на авиационную безопасность в целом оказывают внешние факторы. К ним, как правило, относят погодные условия и неисправности техники и оборудования. Зачастую именно внешние факторы приводят к наибольшему количеству аварий и катастроф с летальным исходом [2, 6].

Эффективность системы управления безопасностью полётов

После выявления появившейся опасности необходимо проанализировать и оценить связанные с ней риски. Оценка риска представляет собой преимущественно качественный метод оценки серьёзности потенциального ущерба, связанного с уровнем опасности. Каждая авиакомпания определяет уровни управления, иерархию и людей, уполномоченных принимать решения об оценке уровней риска, влияющих на безопасность полётов. Основная задача группы контроля рисков – анализ опасностей и выявление угроз с неприемлемым уровнем риска. Меры по контролю рисков оцениваются и документируются для подтверждения выполнения всех требований безопасности [6, 7].

Несмотря на то, что конкретные компоненты СУБП чётко определены, расписаны этапы, а рекомендации по внедрению ясны и понятны, однозначного пути к оценке эффективности СУБП на данный момент не существует [6]. Несмотря на постоянное появление в научной литературе новых методик оценки [8, 9], их тщательный анализ неизменно выявляет серьёзные недочёты. Ключевой проблемой современных подходов является отсутствие чётких критериев успеха.

¹ IATA (ИАТА) – Международная Ассоциация воздушного транспорта, по сути является ассоциацией авиатранспортных компаний и действует под эгидой ИКАО.

Многие авиакомпании применяют анализ тенденций как одно из важнейших средств измерения эффективности [1, 8]. Оцениваются улучшения, и, если они значительны, проблема может быть исключена из списка высокоприоритетных (но за ней всё равно продолжают вести наблюдение). Ключевыми моментами являются постепенное устранение пунктов (проблем) из указанного списка и оценка эффективности корректирующих действий. Некоторые авиакомпании занимаются разработкой общего индекса риска, который позволит производить оценку рисков на определённом временном этапе. Эти индексы, как правило, основаны на финансовых показателях о совокупных рисках для конкретной организации. Например, таким показателем может выступать совокупная стоимость инцидентов за квартал, объединяющая прямые расходы на ремонт, штрафы и компенсации, а также косвенные убытки от простоя ВС.

Сбор и агрегирование данных также является одним из направлений оценки эффективности систем безопасности. Данные, полученные в ходе аудитов отдела безопасности, от программ внутренней оценки, программ отчётности сотрудников, а также в результате мониторинга и анализа полётных операций, расследований несчастных случаев, эксплуатационных трудностей и от других программ аудита, обобщаются, чтобы составить картину того, как организация работает в области безопасности.

Специалисты по безопасности обращают особое внимание на объекты повышенного риска, а также факторы, способствующие его возникновению, и предшествующие им. Понимание причин возникновения проблем и последствий, к которым может привести возникновение данных проблем, является одной из основ эффективной СУБП.

Количественные методы оценки эффективности СУБП

В [8, 10, 11] исследуются количественные методы оценки эффективности СУБП. По состоянию на 2025 год двумя наиболее популярными и востребованными являются метод анализа среды функционирования (АСФ) [8] и метод «затраты-выпуск» [10] (он же метод анализа «ввод-вывод»).

Анализ среды функционирования

АСФ основан на линейном программировании и часто используется в исследованиях операций (ИО или OR) и в области экономики для оценки эффективности или результативности определённых сегментов или отделов организации. Для этого математически рассматриваются все вводные данные и ресурсы, используемые каждым элементом, сравниваются взаимосвязи между переменными и, в конечном итоге, каждый производитель или единица принятия решений (ЕПР) сравнивается с лучшим производителем. Основа АСФ состоит в том, что если производитель способен произвести определённую единицу продукции при определённых затратах, то и другие производители должны быть способны повторить этот результат при эффективной работе. АСФ особенно полезен, когда требуется сравнение с лучшими практиками в определённой области. АСФ в разной степени используется также в сферах здравоохранения и образования, банках, розничной торговле, производстве и многих других отраслях, включая авиационную.

К основным преимуществам указанного метода относятся:

- возможность использовать несколько моделей входов и выходов;
- производители или ЕПРы сравниваются с равными себе;
- данные на входах и выходах могут быть разными единицами измерения.

В работе [8] были произведены опросы и интервью работников различных организаций авиационного сектора, на основе которых был выполнен АСФ с целью расчёта показателей эффективности каждой рассматриваемой организации (аэропорты, авиакомпании, производители авиационных компонентов), определения неэффективных организаций и выявления

возможностей для повышения показателей эффективности. Для определения эффективности отдельных организаций АСФ был проведён в четырёх направлениях системы управления безопасностью: техника безопасности и её цели, управление факторами риска для безопасности полётов, обеспечение безопасности и осведомлённость в вопросах безопасности. Входные данные включали в себя вопросы со шкалой Лайкерта, в которых респондентам предлагалось определить, как их организации внедряют СУБП в четырёх указанных выше областях. Выходные данные включали вопросы о результатах СУБП по каждому из четырёх компонентов СУБП.

Из результатов проведённого в [8] анализа следует, что ряд организаций оценивает эффективность своих СУБП путём анализа данных и тенденций к возникновению негативных факторов. В большинстве случаев тенденции и данные регулярно анализируются отделами безопасности и руководителями среднего звена (например, ежемесячно), и значительно реже – членами высшего руководства (например, ежеквартально).

Наименее эффективным из четырёх направлений и требующим наибольших корректив по результатам анализа было признано управление факторами риска для безопасности полётов [8]. Более подробный анализ исходных данных основных составляющих компонентов данного направления показал наличие завышенных расходов на покрытие материального ущерба. Это свидетельствует об очень низкой эффективности системы управления факторами риска для безопасности полётов.

Наилучшие показатели с точки зрения СУБП в [8] были отмечены в области обеспечения безопасности. В подавляющем большинстве организаций обеспечение безопасности было оценено как эффективное. Главная задача в сфере безопасности – контроль и оценка процессов для улучшения уровня безопасности полётов. Это требует регулярного отслеживания ключевых показателей и их анализа, чтобы вносить необходимые улучшения. Эффективная СУБП позволяет достигать целевых показателей, установленных авиационными организациями.

В направлении осведомлённости по вопросам безопасности ситуация оказалась значительно более разрозненной, чем в других направлениях. Примерно треть ЕПРов в этом направлении показали себя эффективными и не нуждались в улучшениях. Однако более тщательный анализ исходных данных показал, что в обучение технике безопасности вновь принятых и переведённых сотрудников вкладывается недостаточно средств. Соответственно, в этом компоненте необходимы серьёзные изменения в стратегии безопасности, чтобы повысить эффективности конкретной системы в рамках СУБП.

Ситуация по направлению техники безопасности и её целей схожа с вопросами осведомлённости по вопросам безопасности – менее 30 % компонентов этого направления признаны эффективными. При более близком рассмотрении исходных данных выяснилось, что в ряде подразделений практически полностью отсутствуют сотрудники, в должностных обязанностях которых фигурирует безопасность, а также отсутствует бюджет, выделяемый на систему безопасности. Чтобы повысить эффективность СУБП, этим подразделениям потребуются серьёзные изменения в организационной стратегии безопасности.

Таким образом, в исследовании [8] можно наблюдать успешное применение метода АСФ в качестве инструмента для оценки эффективности СУБП авиационных организаций. Продемонстрирована надёжность и достоверность настоящего метода анализа, а также обозначены направление и потенциал для улучшения методики АСФ.

Анализ по методу «ввод-вывод»

Метод «ввод-вывод» – это количественный метод, используемый преимущественно в экономике для изучения взаимозависимости между различными экономическими отраслями. При проведении анализа по методу ввода-вывода строятся таблицы (матрицы), в которых общий продукт отрасли разделён на различные производственные процессы и конечное потребление

в горизонтальных строках, а вертикальные столбцы представляют собой комбинацию производственных ресурсов, используемых в указанной отрасли. Такая таблица иллюстрирует зависимость каждой отрасли от продукции других отраслей.

За последние годы были проведены работы по адаптации метода «ввод-вывод» для анализа эффективности систем безопасности [10, 11]. В исследовании [10] рассмотрено применение модели «ввод-вывод» (input-output concept) для целей и задач авиационной безопасности, то есть для СУБП. Для выполнения данной задачи была собрана группа экспертов по СУБП с целью определения взаимосвязей между четырьмя компонентами СУБП. Эксперты определили относительную ценность элементов и процессов внутри каждого компонента, после чего эти данные были проанализированы и помещены в матрицу. Далее провели расчёт матрицы с использованием математики метода «ввода-вывода» и получена конечная специализированная для СУБП матрица.

Матрица СУБП, полученная в результате этого эксперимента, может стать мощным инструментом, позволяющим определить влияние определённых элементов системы, таких как данные опросов по СУБП, на всю систему в целом. Также эту матрицу возможно использовать для прогнозирования потенциального влияния конкретных элементов или процессов СУБП путём замены значений в матрице. Основным минус как настоящей матрицы, так и метода в целом заключается в их сильной чувствительности к исходным данным. Чтобы настоящая матрица СУБП стала действенным инструментом, вариативность ответов среди экспертов по вопросам безопасности должна быть снижена до приемлемого диапазона. Для этого может потребоваться либо стандартизация системы СУБП в стране или в мире, либо дополнительная переоценка ответов экспертов с целью приведения их ответов к единому стандарту. Выполнение указанных шагов позволит получить матрицу, которая более точно отображает взаимосвязи между компонентами, элементами и процессами СУБП, а также является значительно более надёжной и достоверной.

Заключение

СУБП в современном мире является одним из ключевых элементов для создания безопасных условий работы предприятий авиационной отрасли. Применение СУБП позволяет в значительной степени повысить безопасность, приводя к снижению количества инцидентов, катастроф и происшествий. Однако остро стоит вопрос об оценке эффективности таких систем. Применение и разработка современных методов анализа эффективности СУБП остаётся важной задачей, требующей дальнейших исследований и улучшений.

Продemonстрированы как сильные, так и слабые стороны таких методов, как АСФ и метод «ввод-вывод» для оценки эффективности работы СУБП в авиационном секторе. Результаты исследований [1–5, 7–11] показали, что большинство организаций в целом способны эффективно обеспечивать безопасность, однако многие компоненты СУБП требуют значительных улучшений и корректировок. Также требуются доработки и улучшения самих методик оценки эффективности применительно к системам безопасности.

Обзор тематических источников показывает, что для повышения общей эффективности СУБП в авиационном секторе необходимо сосредоточиться на улучшении управления факторами риска, внедрении лучших практик и более активном вовлечении высшего руководства в процессы анализа и оценки безопасности. Это позволит не только повысить уровень безопасности полётов, но и оптимизировать затраты, что является крайне важным аспектом в условиях современного рынка.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest

Список источников / References

1. Stolzer A. J., Sumwalt R. L., Goglia J. J. *Safety management systems in aviation*. CRC Press, 2023.
2. Rat C. L. Safety management system in air transportation. *Proceedings of the International Management Conference*, 2019, vol. 13, pp. 1051–1058.
3. Чинючин Ю. М. Лётная годность воздушных судов в системе управления безопасностью полётов: монография. Москва, Вологда: Инфра-Инженерия, 2024. 188 с. [Chinyuchin Yu. M. *Aircraft airworthiness in the flight safety management system*; monodraph. Moscow, Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2024, 188 p. (In Russ.)].
4. Safety Overview. IATA Annual Safety Report Executive Summary and Safety Overview. Ed. 60. Montreal, IATA, 2023, 34 p.
5. Brown K. A., Willis P. G., Prussia G. E. Predicting safe employee behavior in the steel industry: Development and test of a sociotechnical model. *Journal of Operations management*, 2000, vol. 18, no. 4, pp. 445–465.
6. ICAO Doc 9859. Safety Management Manual. Fourth Ed., ICAO, 2018, 182 p.
7. Mol T. *Productive safety management: a strategic, multidisciplinary management system for hazardous industries that ties safety and production together*. Routledge, London, 2003, 440 p.
<https://doi.org/10.4324/9780080474021>
8. Stolzer A. J. et al. Measuring and evaluating safety management system effectiveness using Data Envelopment Analysis. *Safety science*, 2018, vol. 104, pp. 55–69.
9. Robson L. S. et al. The effectiveness of occupational health and safety management system interventions: a systematic review. *Safety science*, 2007, vol. 45, no. 3, pp. 329–353.
10. Brady T. et al. Marbles: the application of input-output concepts to safety management systems. *Journal of Aviation Technology and Engineering*, 2015, vol. 5, no. 1, p. 33.
11. Khan F., Rathnayaka S., Ahmed S. Methods and models in process safety and risk management: Past, present and future. *Process safety and environmental protection*, 2015, vol. 98, pp. 116–147.

Информация об авторах

Савостин Денис Сергеевич, инженер, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, savostin_ds@gosniiga.ru

Попов Денис Павлович, научный сотрудник, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, popov_dp@gosniiga.ru

Ковалевский Сергей Александрович, исполняющий обязанности начальника отдела – эксперт отдела № 138, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, kovalevskii_sa@gosniiga.ru

Authors information

Savostin Denis S., Engineer, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, savostin_ds@gosniiga.ru

Popov Denis P., Research Associate, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, popov_dp@gosniiga.ru

Kovalevskii Sergey A., Acting Head of Department – Expert of Department no. 138, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, kovalevskii_sa@gosniiga.ru

Статья поступила в редакцию 26.06.2025; одобрена после рецензирования 23.07.2025; принята к публикации 04.09.2025.

The article was submitted 26.06.2025; approved after reviewing 23.07.2025; accepted for publication 04.09.2025.

Научная статья

УДК 656.7.071.7: [613.693:612.014.32]

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО ПОДХОДА В ОБЛАСТИ УПРАВЛЕНИЯ РАБОЧЕЙ НАГРУЗКОЙ ЧЛЕНОВ ЛЁТНОГО ЭКИПАЖА

Г. С. ГОРЯШКО, С. В. МАРИХИН

*Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации
имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия*

Аннотация. Статья посвящена мультимодальному подходу к отслеживанию уровней рабочей нагрузки членов лётного экипажа в целях повышения уровня безопасности полётов и эффективности авиационной деятельности. Рассмотрены современные подходы к классификации рабочей нагрузки, включающие поведенческие когнитивные, физические и эмоциональные аспекты, а также внешние и внутренние факторы влияния. Представлена практическая значимость внедрения оценки нагрузки в авиационные процессы. В контексте исследования представлены формулы оценки психофизиологического состояния лётного экипажа (PSI, COS, MSI), основанные на анализе сердечного ритма, движений глаз и на контроле других физиологических параметров. Данные технологии могут стать для лётного состава «цифровыми помощниками», повышая уровень профессиональных компетенций ситуационной осознанности и принятия решений в нестандартных условиях полёта воздушного судна (ВС). Особое внимание уделено нормативной базе (FAA, JAA, ICAO), этапам профессиональной деятельности и обучения лётных экипажей. Внедрение приведённых практических рекомендаций способно в значительной мере снизить количество инцидентов, обеспечивая новый уровень безопасности полётов в авиации.

Ключевые слова: рабочая нагрузка лётного экипажа, воздушное судно, технология отслеживания свойств внимания, анализ физиологических показателей, управление безопасностью полётов, стресс-менеджмент в авиации, многофакторный анализ нагрузки, транспортные системы страны

Для цитирования: Горяшко Г. С., Марихин С. В. Анализ применения мультимодального подхода в области управления рабочей нагрузкой членов лётного экипажа // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 51. С. 100–109.

ANALYSIS OF THE APPLICATION OF A MULTIMODAL APPROACH IN FLIGHT CREW WORKLOAD MANAGEMENT

G. S. GORYASHKO, S. V. MARIKHIN

*Saint-Petersburg State University of Civil Aviation named in honor of Air Chief Marshal A. A. Novikov,
Saint Petersburg, Russia*

Abstract. The article is dedicated to a multimodal approach for tracking the workload levels of flight crew members, aimed at enhancing flight safety and aviation operational efficiency. Modern approaches to workload classification are examined, encompassing behavioral, cognitive, physical, and emotional aspects, as well as external and internal influencing factors. The practical significance of implementing workload assessment in aviation processes is presented. Within the research context, formulas for assessing the psychophysiological state of flight crews

(PSI, COS, MSI) are introduced. These formulas are based on the analysis of heart rate, eye movements, and the monitoring of other physiological parameters. Such technologies can serve as “digital assistants” for flight personnel, enhancing the level of professional competence in situational awareness and decision-making during non-standard aircraft flight conditions. Special attention is paid to the regulatory framework (FAA, JAA, ICAO), the stages of professional activity, and the training of flight crews. Implementing the presented practical recommendations can significantly reduce the number of incidents, ensuring a new level of flight safety in aviation.

Keywords: flight crew workload, aircraft, attention-tracking technologies, physiological indicators analysis, eye-tracking, flight safety management, human factors engineering, stress management in aviation, multifactorial workload analysis, transport systems of the country

For citation: Goryashko G. S., Marikhin S. V. Analysis of the application of a multimodal approach in flight crew workload management. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2025, no. 51, pp. 100–109. (In Russ.)

Введение

Учёт рабочей нагрузки лётного экипажа является сложной задачей, которая зависит от множества факторов, например, таких как длительность полёта, метеоусловия и состояние пилотов. Неравномерное распределение нагрузки во время полёта ВС может привести к системным ошибкам, снижению концентрации и увеличению вероятности инцидентов. Традиционные системы управления рисками утомляемости не всегда позволяют эффективно справляться с этими задачами. Рассмотрим системный подход в управлении нагрузкой, который включает в себя необходимость учёта поведенческих, когнитивных и эмоциональных аспектов профессиональной деятельности пилотов.

Работы Н. Д. Заваловой, Г. М. Зараковского, В. А. Пономаренко, Б. Ф. Ломова и др. заложили теоретическую и практическую базу в области авиационной психологии, инженерной психологии и эргономики, внося значительный вклад в понимание управления рабочей нагрузкой, утомлением и стрессом у членов лётных экипажей. В предыдущих исследованиях удалось интегрировать психофизиологические и организационные аспекты в авиационную отрасль, формируя системный подход к безопасности полётов ВС.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью адаптации к растущим требованиям безопасности полётов в области человеческого фактора [1]. На данный момент системы управления нагрузкой не всегда способны учитывать индивидуально-психологические особенности лётного экипажа, что может приводить к ошибкам и снижению производительности.

Инновационные технологии, способные анализировать и корректировать состояние внимания пилотов, представляют собой перспективный инструмент для решения задач повышения качественных показателей авиационной отрасли. Так, контроль параметров и движения глаз (окулография) нашли применение в авиации, позволяя получать данные о распределении внимания пилотов в реальном времени, что может быть использовано для предотвращения ошибок и оптимизации рабочих процессов [2]. Системы, анализирующие движения глаз и физиологические параметры, соответственно могут сигнализировать о снижении ресурсов членов лётного экипажа. Таким образом, применение данной методики может способствовать снижению рисков и повышению эффективности работы экипажа.

Для создания более точных инструментов мониторинга состояния пилотов и управления их нагрузкой в реальном времени исследуем возможность применения мультимодальной методики. В рамках этого исследования проведём изучение современных подходов к управлению рабочей нагрузкой лётного экипажа ВС и анализ технологии отслеживания внимания для разработки практических рекомендаций по интеграции данных средств и оценки влияния внедрения технологий на деятельность лётного экипажа.

Формулировка целей

Нормы лётной годности (НЛГС) и авиационные правила¹ подчёркивают, что проектирование систем управления должно учитывать человеческий фактор, включая минимизацию рутинных операций, чтобы снизить утомляемость. Так, при сертификации ВС анализируются «ожидаемые условия эксплуатации», куда входят не только технические параметры, но и требования к эргономике кабины, распределению функций между членами экипажа, а также допустимые уровни рабочей нагрузки. Например, автоматизация управления взлётом и посадкой позволяет сократить число ручных операций, снижая риск ошибок из-за усталости. Однако даже эти меры не исключают рисков, связанных с длительными полётами, ночными сменами или нештатными ситуациями, когда экипаж вынужден работать на пределе возможностей [3].

Методы оценки рабочей нагрузки в авиации можно разделить на несколько основных категорий:

- субъективные – основаны на самооценках и опросах членов экипажа, такие как инструмент оценки NASA-TLX, который позволяет учитывать умственную нагрузку и временное давление [4];
- объективные – используют измерение физиологических параметров, таких как сердечный ритм, что обеспечивает более точные данные;
- мультимодальные – систематизируют компоненты субъективных и объективных методов, что позволяет повысить надёжность и точность оценки.

Психофизиологические методы были описаны в работах Г. П. Зараковского. В отличие от субъективных методов, основанных исключительно на самооценках и опросниках, объединение физиологических измерений с математическим моделированием дало возможность более объективно оценивать уровень стресса, утомления и когнитивной нагрузки в реальном времени. Основу методов оценки составляют ключевые физиологические параметры, тесно связанные с психоэмоциональным состоянием человека. Повышение частоты сердечных сокращений (ЧСС) сигнализирует о критической нагрузке. Электроэнцефалография (ЭЭГ) играет роль инструмента для оценки когнитивной нагрузки. Снижение альфа-ритмов (8–13 Гц) и рост бета-ритмов (14–30 Гц) указывают на повышенную концентрацию и умственное напряжение. Кожно-гальваническая реакция (КГР) дополняет картину, отражая уровень эмоционального напряжения через электропроводность кожи. При стрессе потоотделение увеличивается, что повышает проводимость. Это позволяет выявить скрытое напряжение даже у внешне спокойных пилотов [5].

Окулография дополняет эту картину неинвазивным доступом к вниманию и мышлению: расширение зрачка коррелирует с умственным усилием, частота морганий – с усталостью, а траектории взгляда – с распределением когнитивных ресурсов между приборами и внешней обстановкой. Например, замедление саккад или фиксация взгляда на одном индикаторе могут сигнализировать о перегрузке, даже если физиологические маркеры остаются в норме.

Учёт психофизиологических характеристик и возможностей лётчика при создании авиационной техники достигается посредством инженерно-психологического проектирования средств и алгоритмов решения задач лётчиком [6]. Исследование Европейского агентства авиационной безопасности (EASA) в 2019 году подтвердило, что использование технологий отслеживания внимания в сочетании с другими методами оценки рабочей нагрузки повышает точность анализа на 30 %.

Показатели сердечно-сосудистой системы и окулография объективизируют оценку состояния пилотов: первые раскрывают телесные реакции на стресс через динамику сердечного ритма и вариабельность, вторая – определяет когнитивную нагрузку через паттерны взгляда и физиологию глаз. Сердечные метрики, такие как ЧСС и ВСР, служат «живым зеркалом» автономной

¹ Авиационные правила. Часть 25. Нормы лётной годности самолётов транспортной категории. URL: <https://armak-iac.org/dokumenty/aviatsionnye-pravila/>

нервной системы, мгновенно реагируя на внешние стрессоры – от турбулентности до аварийных сигналов [7]. Их непрерывный мониторинг в реальном времени позволяет зафиксировать даже субпороговое напряжение, которое пилот может не осознавать.

Данные методы предоставляют объективные данные о состоянии пилотов в реальном времени. Исследование NASA показывает, что использование психофизиологических методов обеспечивает оценку рабочей нагрузки с точностью до 85 %, что делает их незаменимыми в авиации. Целесообразность использования методик оценки психофизиологического состояния пилота также подтверждена для индивидуализации тренажёрной подготовки [8].

Методология оценки уровня рабочей нагрузки

В качестве теоретической основы исследования учитывалась биопсихосоциальная модель, предложенная Энгелем [9]. Применительно к авиационной отрасли данная модель трансформируется в систему, которую составляют три аспекта:

1. Биологический аспект: физиологические реакции (ЧСС, температура, зрачковая реакция).
2. Психологический аспект: когнитивная нагрузка, эмоциональный стресс.
3. Социальный аспект: коммуникация в экипаже, распределение обязанностей.

Оценка уровня загруженности на основе индекса физиологической нагрузки (PSI) представляет собой количественную метрику, интегрирующую мультипараметрические данные сердечно-сосудистой системы и окулографии для объективной оценки стрессовой нагрузки. Физиологические параметры (ЧСС, диаметр зрачка) невозможно сознательно контролировать, что исключает искажение данных. Эти данные, собираемые в реальном времени, помогают предупредить состояние стресса и адаптировать нагрузки под индивидуальные особенности пилота.

$$PSI = \frac{\Delta HR}{HR_{basic}} + \frac{\Delta PPL}{PPL_{basic}},$$

где ΔHR – отклонение сердечного ритма от индивидуального базового уровня HR_{basic} (разница между текущей ЧСС и базовым значением, измеренным в состоянии покоя); ΔPPL – изменение диаметра зрачка по сравнению с индивидуальным базовым PPL_{basic} , фиксируемое инфракрасными камерами. При стрессе зрачки расширяются (мидриаз).

Интерпретация:

$PSI < 1,0$: нормальное состояние.

$PSI 1,0–1,5$: умеренная нагрузка, требует дополнительного наблюдения.

$PSI > 1,5$: критическая перегрузка, при которой рекомендуется передача управления или повышение уровня автоматизации.

Данная формула позволяет выявить психическое состояние пилота ВС, снимая показания неинвазивными средствами в течение 2–3 минут. При выявлении превышения порогов нагрузки необходимо сигнализировать об этом экипажу ВС, что критически важно при нестандартных ситуациях или при посадке в сложных метеоусловиях.

Тренажёрная подготовка играет значительную роль в оценке рабочей нагрузки лётного экипажа, позволяя воспроизводить различные сценарии полётов и анализировать реакцию пилотов на изменяющиеся условия. При этом тренажёры предоставляют возможность безопасного тестирования новых методов управления нагрузкой и обучения пилотов. В процессе тренажёрной подготовки инструкторы могут использовать данные индекса когнитивной нагрузки (COS) для корректировки нагрузки во время обучения. Разработка системообразующего фактора – целевой модели пилота – является ключевой методологической ориентацией профессиональной авиационной педагогики, что свидетельствует о значимости симуляторов в формировании профессиональных навыков лётного состава [10].

COS нацелен на оценку состояния высшей нервной деятельности, измеряя, как мозг пилота справляется с анализом показаний приборов, коммуникацией с экипажем, принятием решений. Высокие значения COS сигнализируют о риске рассеивания внимания, когда даже опытный специалист может упустить критически важную деталь. Мониторинг параметров движения глаз (зрчков) позволяет оптимизировать интерфейсы управления, распределять задачи между членами экипажа и проектировать тренировочные программы, укрепляющие психическую устойчивость. Например, при $COS > 2,0$ сценарий тренажёрной сессии приостанавливается для разбора ошибок.

$$COS = Dgf \times \frac{Scd}{3},$$

где Dgf – мера хаотичности фиксации взгляда (рассчитывается как стандартное отклонение времени фиксации зрения, показывает, насколько эффективно пилот распределяет внимание между приборами); Scd – саккады, отображающие количество быстрых движений глаз в секунду между точками фиксации взгляда (связаны с поиском информации: их учащение свидетельствует о дезориентации или перегрузке. Оптимальное значение частоты саккад у пилотов – 3–5 движений в секунду, ввиду физиологических ограничений глаза, когнитивных процессов и требований профессии).

Интерпретация снятых показателей с использованием индекса COS:

$COS < 1,0$: нормальное состояние;

$COS 1,0–2,0$: состояние умеренной нагрузки;

$COS > 2,0$: критическое состояние, указывает на риск ошибочных действий за 5–10 минут до их совершения (риск ошибки увеличивается на 40 %).

Мультимодальный индекс нагрузки (MSI) объединяет физиологические и когнитивные метрики в единую систему оценки нагрузки, создавая объёмную картину воздействия стрессоров. Формула MSI подстраивается к изменению оперативной обстановки в процессе выполнения полёта благодаря использованию зависящих от неё весовых коэффициентов. Данный способ оценки работы лётного экипажа позволяет идентифицировать нелинейное повышение физиологической и когнитивной нагрузки в процессе выполнения полёта и прогнозировать эскалацию стресса до достижения пороговых значений.

$$MSI = \theta \frac{PERCLOS \times COS}{4} + \lambda \frac{\Delta T \times PSI}{4},$$

где PERCLOS (Percentage of Eyelid Closure) – процент времени, когда веки закрыты, показатели больше 80 % свидетельствуют о явном когнитивном утомлении; ΔT [°C] – отклонение температуры кожи от нормы, проявляется как сужение периферических сосудов при стрессе; λ , θ – весовые коэффициенты, изменяющиеся в зависимости от фазы полёта (взлёт, крейсерский режим, посадка) и индивидуальных особенностей пилота (при заходе на посадку в условиях турбулентности скачки взгляда могут быть менее значимы, а в нештатной ситуации становятся ключевым индикатором).

Пороговые значения для индикации уровня стресса пилота ВС:

Зелёный уровень: $MSI < 1,0$: нормальное состояние.

Жёлтый уровень: $1,0 \leq MSI < 2,0$: получение аудиовизуального предупреждения.

Красный уровень: $MSI \geq 2,0$: активация автоматики защиты при отсутствии вмешательства со стороны второго члена экипажа.

Уточнение результатов

Рабочая нагрузка членов лётного экипажа определяется как совокупность когнитивных, физических, поведенческих и эмоциональных вызовов, необходимых для выполнения профессиональных обязанностей в процессе управления ВС.

Когнитивная нагрузка связана с обработкой информации, принятием решений и концентрацией внимания. Физическая нагрузка включает манипуляции с оборудованием и взаимодействие с органами управления. Эмоциональная нагрузка затрагивает психологическое состояние пилотов и их реакцию на стрессовые ситуации. Такое разделение позволяет глубже понять природу нагрузки и разрабатывать целенаправленные подходы к управлению нагрузкой.

Физические и психофизиологические реакции взаимосвязаны и оказывают значительное воздействие друг на друга. Исследования Международной ассоциации пилотов [11, 12] показывают, что внедрение классификации нагрузки снижает количество ошибок экипажа на 15–20 %, что значительно повышает безопасность полётов. Данные результаты исследований подчёркивают значимость учёта различных аспектов нагрузки; так, учёт психологических факторов может улучшить анализ и управление рабочей нагрузкой экипажа.

Чёткое понимание интенсивности нагрузки способствует разработке стратегий для оптимального распределения задач между членами экипажа, что в свою очередь повышает их эффективность и снижает уровень стресса. Классификация рабочей нагрузки по интенсивности является важным инструментом для анализа и управления нагрузкой экипажа, позволяя оценивать степень воздействия нагрузки на членов экипажа [13].

Факторы, влияющие на рабочую нагрузку членов лётного экипажа, можно разделить также на внешние и внутренние. Внешние факторы включают метеорологические условия, такие как турбулентность и видимость, техническое состояние самолёта и особенности маршрута. Сложные метеорологические условия, такие как сильный ветер или турбулентность, могут увеличивать нагрузку на 30 %, что требует от пилотов повышенного внимания и оперативности в принятии решений [14]. Внутренние факторы связаны с психофизиологическим состоянием членов экипажа, их профессиональным опытом, уровнем усталости и стрессоустойчивостью [15]. Такая классификация структурирует анализ причин увеличения рабочей нагрузки и помогает разрабатывать целенаправленные методы управления нагрузкой.

Технические неисправности ВС и необходимость отклонения от маршрута могут значительно усложнить выполнение экипажем полётных задач, увеличивая когнитивную нагрузку.

В ходе исследования биосенсорных нагрузок, воздействующих на членов лётных экипажей гражданской авиации, установлено, что распределение физиологической и когнитивной составляющих напряжённости труда варьируется в зависимости от фазы полёта (рис. 1). Плотность воздействующих световых и звуковых сигналов (их количество в пересчёте на 1 час полёта), а также длительность сосредоточенного наблюдения относятся к физиологическим аспектам нагрузки на лётный состав. Число объектов одновременного наблюдения и нагрузка на слуховой анализатор отражают рост когнитивной загруженности экипажа [16].

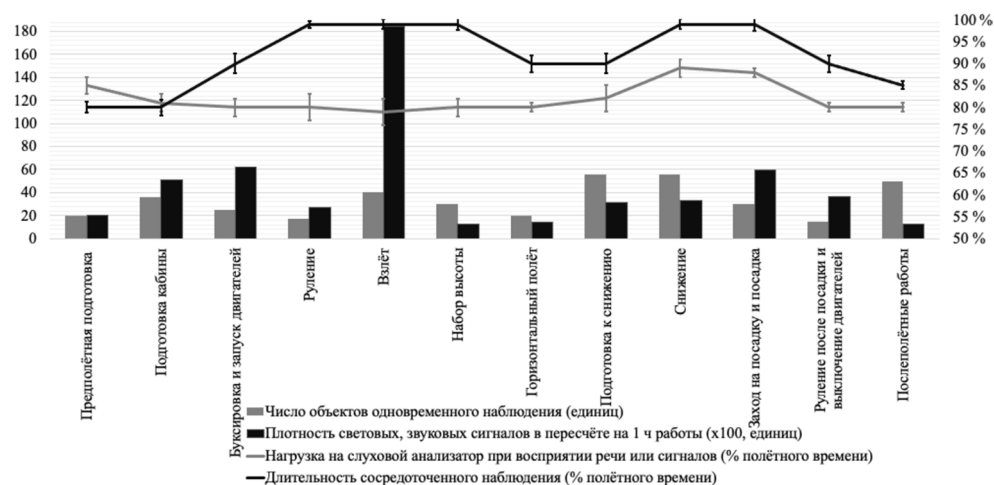


Рис. 1. Уровни биосенсорных нагрузок на разных этапах полёта ВС

На основе анализа полученных на полнофункциональных тренажёрах параметров были уточнены зависимости, дающие определения весовых коэффициентов λ , θ мультимодального индекса нагрузки, определена взаимосвязь между этапами полёта и уровнями физиологической и когнитивной нагрузки. На рис. 2 графически показано распределение весовых коэффициентов по фазам полёта, где соотношение физиологических и когнитивных компонентов нагрузки варьируется на протяжении выполнения полётного задания.

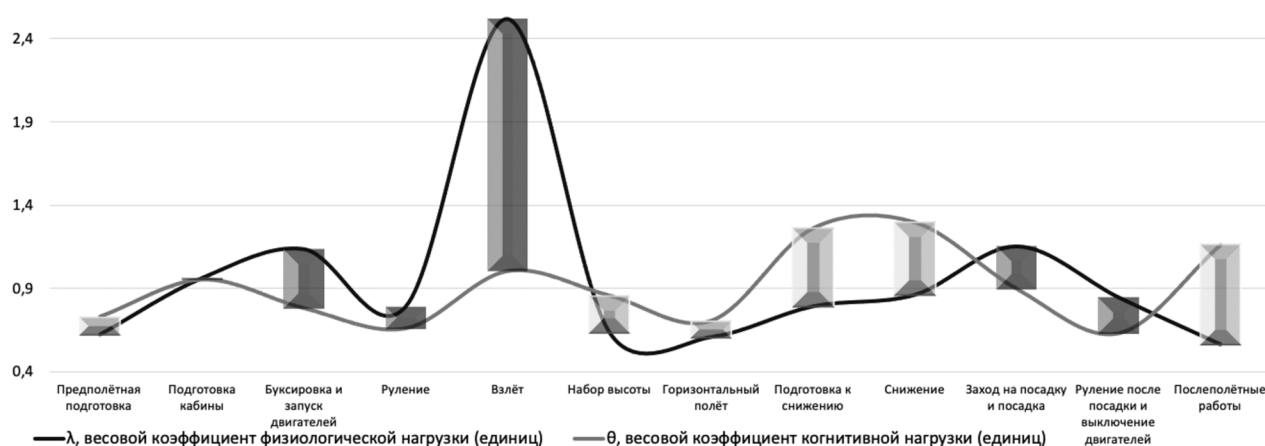


Рис. 2. Распределение весовых коэффициентов рабочей нагрузки экипажа по фазам полёта

Анализ показал, что фазы взлёта, захода на посадку, руления характеризуются максимальной физиологической нагрузкой, связанной с высокой плотностью сигналов и необходимостью поддержания ситуационной осознанности в условиях помех. Напротив, наиболее когнитивно-затратными с точки зрения ресурсов экипажа являются этапы предполётной подготовки и подготовки к заходу на посадку, что обусловлено увеличением количества параметров одновременного учёта при принятии решений в условиях дефицита времени.

Мультимодальный подход с применением формул расчёта PSI, COS и MSI для анализа уровня нагрузки лётного состава является основой для дальнейшего развития проактивных систем управления безопасностью полётов. Использование такого подхода обусловлено соответствием международным нормам и рекомендуемым практикам в области оценки уровня рабочей нагрузки, что означает совместимость с глобальными стандартами авиационной безопасности.

Заключение

Интеграция технологии отслеживания внимания в управление рабочей нагрузкой лётного экипажа обеспечит повышение безопасности и эффективности авиационной деятельности. Применение мультимодальных методов оценки психофизиологического состояния позволяет объективно измерять нагрузку на членов экипажа, выявлять риски и корректировать подготовку. Наряду с повышением безопасности полётов этот подход способствует созданию персонализированных программ тренировок, учитывающих индивидуальные особенности членов экипажа.

Рассмотренная методика, включающая мультимодальные индексы, позволяет объективно оценивать биопсихосоциальное состояние пилотов, выявляя стресс, усталость и когнитивную перегрузку в режиме реального времени. Тем самым устраняются недостатки субъективных опросников: сердечные данные выявляют стресс на уровне тела, окулография – на уровне принятия решений. Такая комбинация особенно важна в авиации, где ошибка из-за переутомления или дезориентации создаёт угрозу безопасности полётов. Получение интегрированных данных в режиме реального времени позволяет системам поддержки экипажа адаптировать уровни автоматизации, перераспределять задачи или принимать превентивные меры до развития критической ситуации.

Особую роль играет соблюдение нормативных стандартов (FAA, JAA, ICAO), обеспечивающих безопасность и легитимность технологических решений. При этом симбиоз человеческого мастерства и технологий остаётся основополагающим принципом: автоматизация не заменяет пилотов, а усиливает их способность принимать решения в сложных условиях.

Практические рекомендации по применению и дальнейшей разработке мультифакторных систем управления рабочей нагрузкой членов лётных экипажей:

1. Для авиакомпаний – это внедрение обязательного мультимодального мониторинга (MSI) и регулярный аудит систем.

2. Для регуляторов – это актуализация стандартов ICAO Annex 6 с учётом технологического прогресса.

3. Для научного сообщества – это углублённое изучение нейрокогнитивных компонентов рабочей нагрузки и этических проблем повсеместного использования биометрических данных.

Рабочая нагрузка и утомление – системные риски, требующие интеграции технических, организационных и психологических решений. Без учёта данных рисков даже самые совершенные системы безопасности не смогут компенсировать человеческие ошибки, вызванные перегрузками. Реализация предложенных мер призвана снизить в перспективе количество авиационных инцидентов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Сагитов Д. И., Корякин А. В., Косульников П. П. Анализ человеческого фактора в авиации. Ошибки членов лётных экипажей // Столыпинский вестник. 2023. Т. 5. № 11. С. 22.
2. Skvarekova I., Azaltovic V., Pecho P. & Kander B. Eye Track Technology in Process of Pilot Training Optimization. *New Trends in Aviation Development (NTAD)*, 2020, pp. 206–210.
3. Поляков П. М., Кармызов М. В., Медведева Н. Н. Безопасность полётов: тексты лекций в авторской редакции. Москва: ИД Академии Жуковского, 2020. 60 с.
4. Rubio S., Diaz E., Martin J., Puente J. M. Evaluation of subjective mental workload: A comparison of SWAT, NASA-TLX, and Workload Profile. *Applied Psychology: An International Review*, 2004, no. 53(1), pp. 61–86.
5. Зараковский Г. М., Медведев В. И. Психолого-физиологическое содержание деятельности оператора // Инженерная психология: теория, методология, практическое применение; Под ред. Б. Ф. Ломова, В. Ф. Рубахина, В. Ф. Венды. Москва: Наука, 1977. С. 101–118.
6. Меденков А. А. Учёт возможностей и способностей лётчика в системе обеспечения безопасности полётов // Проблемы безопасности полётов. 2021. № 8. С. 3–26.
7. Поляков П. М., Кармызов М. В., Монахова С. В. Оценка психофизиологической нагрузки на пилота воздушного судна в особых ситуациях // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 218. С. 122–125.
8. Иванова К. А., Левин Д. Н. Непрерывный контроль психофизиологического состояния пилотов гражданской авиации в системе «экипаж–воздушное судно» // Эргодизайн. 2023. № 4(22). С. 384–392.
9. George L. Engel. The need for a new medical model: a challenge for biomedicine. *Science*, 1977, no. 196, pp. 129–136.
10. Ермаков К. С., Руссакова Е. Р. Человеческий фактор в авиации: учебное пособие. Москва: МГТУ ГА, 2014. 362 с.
11. Cahill J., Cullen P., Gaynor K. Interventions to support the management of work-related stress (WRS) and wellbeing/mental health issues for commercial pilots. *Cogn Tech Work*, 2019, no. 22, pp. 517–547.
12. Cahill J., Cullen P., Gaynor K. Estimating the impact of work-related stress on pilot wellbeing and flight safety. In: *Proceedings of the 2nd international symposium on human mental workload: models and applications (H-WORKLOAD 2018)*, Amsterdam (September 20–21, 2018), Netherlands Aerospace Centre (NLR), 2018, 24 p.

13. Kennedy R. S., Lane N. E., Berbaum K. S. & Lilienthal M. G. Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 2013, pp. 203–220.

14. Алесов М. Б. Управление боковым траекторным движением летательного аппарата при ограничении длительности маневрирования // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2020. № 10. С. 29–34.

15. Горяшко Г. С., Марихин С. В. Анализ влияния стрессоров на формирование универсальных компетенций лётного состава на основе индивидуальных особенностей // Проблемы управления человеческими ресурсами в условиях цифровой трансформации: сборник научных статей Всероссийской научно-практической конференции; под общ. ред. А. М. Павловой. Екатеринбург: УрГУПС, 2022. Вып. 1 (245). С. 89 – 94.

16. Зибарев Е. В., Бухтияров И. В., Сериков В. В., Калинина С. А., Меркулова А. Г. Оценка сенсорных нагрузок у пилотов воздушных судов гражданской авиации // Медицина труда и промышленная экология. 2020. Т. 60. № 7. С. 435–442.

References

1. Sagitov D. I., Koryakin A. V., Kosulnikov P. P. Analysis of the human factor in aviation. Mistakes of flight crew. *Stolypin's Bulletin*, 2023, vol. 5, no. 11, p. 22. (In Russ.)

2. Skvarekova I., Azaltovic V., Pecho P. & Kander B. Eye Track Technology in Process of Pilot Training Optimization. *New Trends in Aviation Development (NTAD)*, 2020, pp. 206–210.

3. Polyakov P. M., Karmyzov M. V., Medvedeva N. N. *Flight safety: texts of lectures in the author's edition*. Moscow, ID Akademiya Zhukovskogo Publ., 2020, 60 p. (In Russ.)

4. Rubio S., Diaz E., Martin J., Puente J. M. Evaluation of subjective mental workload: A comparison of SWAT, NASA-TLX, and Workload Profile. *Applied Psychology: An International Review*, 2004, no. 53(1), pp. 61–86.

5. Zarakovskiy G. M., Medvedev V. I. Psychological and physiological content of the operator activity. *Engineering psychology: theory, methodology, practical application*. Ed. B. F. Lomov, V. F. Rubakhin, V. F. Venda. Moscow, Nauka Publ., 1977, pp. 101–118. (In Russ.)

6. Medenkov A. A. Taking into account the pilot's capabilities and abilities in the flight safety system. *Flight Safety Problems*, 2021, no. 8, pp. 3–26. (In Russ.)

7. Polyakov P. M., Karmyzov M. V., Monakhova S. V. The estimation of a psychophysiological aircraft pilot workload in situations affecting the flight safety. *Civil Aviation High Technologies*, 2015, no. 218, pp. 122–125. (In Russ.)

8. Ivanova K. A., Levin D. N. Continuous monitoring of civil aviation pilots' psychophysiological state in the crew-aircraft system. *Ergodesign*, 2023, no. 4(22), pp. 384–392. (In Russ.)

9. George L. Engel. The need for a new medical model: a challenge for biomedicine. *Science*, 1977, no. 196, pp. 129–136.

10. Ermakov K. S., Russakova E. R. *Human Factors in Aviation: Training manual*. Moscow, MGTU GA Publ., 2014, 362 p. (In Russ.)

11. Cahill J., Cullen P., Gaynor K. Interventions to support the management of work-related stress (WRS) and wellbeing/mental health issues for commercial pilots. *Cogn Tech Work*, 2019, no. 22, pp. 517– 547.

12. Cahill J., Cullen P., Gaynor K. Estimating the impact of work-related stress on pilot wellbeing and flight safety. In: *Proceedings of the 2nd international symposium on human mental workload: models and applications (H-WORKLOAD 2018)*, Amsterdam (September 20–21, 2018), Netherlands Aerospace Centre (NLR), 2018, 24 p.

13. Kennedy R. S., Lane N. E., Berbaum K. S. & Lilienthal M. G. Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness. *The International Journal of Aviation Psychology*, 2013, pp. 203–220.

14. Alesov M. B. Control of the aircraft lateral movement on the limited maneuvering time. *Modern science: actual problems of theory and practice. Series of "Natural and technical sciences"*, 2020, no.10, pp. 29–34. (In Russ.)

15. Goryashko G. S., Marikhin S. V. Analysis of the impact of stresses on the formation of universal competencies of flight personnel based on individual characteristics. *Problems of human resources management in the context of digital transformation: a collection of scientific articles of the All-Russian Scientific and Practical Conference*. Ed. A. M. Pavlova. Yekaterinburg, : YUrGUPS Publ., 2022, issue 1 (245), pp. 89 – 94. (In Russ.)

16. Zibarev E. V., Bukhtiyarov I. V., Serikov V. V., Kalinina S. A., Merkulova A. G. Assessment of sensory loads in civil aviation pilots. *Russian Journal of Occupational Health and Industrial Ecology*, 2020, vol. 60, no. 7, pp. 435-442. (In Russ.).

Информация об авторах

Горяшко Георгий Сергеевич, аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия, darkline1997@yandex.ru

Марихин Сергей Васильевич, кандидат психологических наук, доцент, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия, serg_marihin@mail.ru

Authors information

Goryashko Georgy S., Postgraduate, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named in honour of Air Chief Marshal A. A. Novikov, St. Petersburg, Russia, darkline1997@yandex.ru

Marikhin Sergei V., Candidate of Sciences (Psychology), Associate Professor, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named in honour of Air Chief Marshal A. A. Novikov, St. Petersburg, Russia, serg_marihin@mail.ru

Статья поступила в редакцию 01.04.2025; одобрена после рецензирования 02.09.2025; принята к публикации 10.09.2025.

The article was submitted 01.04.2025; approved after reviewing 02.09.2025; accepted for publication 10.09.2025.

Научная статья

УДК 629.735.051.53:623.746-519

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ СИСТЕМНОЙ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ СТОЛКНОВЕНИЯ ПРИ ИНТЕГРАЦИИ БЕСПИЛОТНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В ВОЗДУШНОЕ ПРОСТРАНСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

И. В. АВТИН¹, С. В. КАРАЧИН¹, Е. М. ЛУНЕВ¹, В. В. ХУДОШИН²¹ Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия² АО «Навигатор», Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Статья посвящена особенностям системной архитектуры бортовой системы предупреждения столкновений (СПС) при интеграции беспилотных воздушных судов (БВС) в воздушное пространство Российской Федерации. Рост использования БВС различных классов и их планируемая интеграция в общее воздушное пространство требуют адаптации технологий обеспечения безопасности полётов БВС. Одной из ключевых таких технологий является СПС, выполняющая функцию обнаружения угрозы участникам воздушного движения (от БВС и для БВС) при сближении с другими воздушными судами. В работе представлен анализ зарубежного опыта разработки СПС (от классических TCAS/ACAS до новых систем Detect-And-Avoid для БВС) и текущего состояния нормативно-правовой базы РФ. На основе обзора существующих решений и требований определены ключевые особенности системной архитектуры перспективной СПС для БВС. К их числу относятся: многоуровневая подсистема датчиков, объединяющая кооперативные (транспондер, ADS-B и др.) и некооперативные (радар, оптические и др.) средства обнаружения; прогнозирование в реальном времени конфликтов траекторий и принятие решений по уклонению (с учётом критериев безопасных интервалов и предотвращения непосредственного столкновения); высокая степень автономности с интеграцией СПС и автопилота для автоматического выполнения манёвров уклонения без задержек; возможность информационного обмена с внешними системами (диспетчерские службы, системы организации воздушного движения беспилотных летательных аппаратов (UTM)) и координации манёвров с другими воздушными судами; модульная масштабируемость архитектуры под различные категории БВС (от малых БВС до тяжёлых аппаратов); а также удовлетворение высоких требований к надёжности и безопасности (вероятность столкновения не выше 10^{-9} на полёт) с перспективой последующей сертификации системы. Реализация такой архитектуры СПС в сочетании с наземной инфраструктурой и обновлением правил полётов позволит обеспечить безопасное совместное использование воздушного пространства беспилотной и пилотируемой авиацией.

Ключевые слова: беспилотные воздушные суда, интеграция БВС, система предупреждения столкновений, мультисенсорное обнаружение, координация полётов, сертификация, интеллектуальные транспортные системы

Для цитирования: Автин И. В., Карачин С. В., Лунев Е. М., Худошин В. В. Об особенностях системной архитектуры системы предупреждения столкновения при интеграции беспилотных воздушных судов в воздушное пространство Российской Федерации // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 51. С 110–121.

ABOUT THE FEATURES OF THE SYSTEM ARCHITECTURE OF THE COLLISION WARNING SYSTEM WHEN INTEGRATING UNMANNED AIRCRAFT INTO THE AIRSPACE OF THE RUSSIAN FEDERATION

I. V. AVTIN¹, S. V. KARACHIN¹, E. M. LUNEV¹, V. V. KHUDOSHIN²

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

² JSC "Navigator", St. Petersburg, Russia

Abstract. The article examines the features of the system architecture of a collision avoidance system for integrating unmanned aerial vehicles (UAV) into the airspace of the Russian Federation. The growing use of UAVs of various classes and their planned integration into general airspace require adaptation of flight safety technologies. One of the key technologies is a collision avoidance system that performs a "see-and-avoid" function for a drone when converging with other aircraft. The paper presents an analysis of foreign developments in collision avoidance systems (from classical TCAS/ACAS to new detect-and-avoid systems for UAVs) and the current regulatory framework in Russia. Based on this review, key features of a prospective UAV collision avoidance system architecture are identified. These include a multi-tier sensor subsystem combining cooperative (transponder, ADS-B, etc.) and non-cooperative (radar, optical, etc.) sensors; real-time trajectory conflict prediction and avoidance decision-making (accounting for well-clear criteria and last-resort collision avoidance); a high degree of autonomy with integration between the collision avoidance system and the autopilot for automatic execution of evasive maneuvers without delay; capability for information exchange with external systems (air traffic control services, UTM) and coordination of maneuvers with other aircraft; modular scalability of the architecture for different UAV categories (from small drones to heavy UAVs); and compliance with strict reliability and safety requirements (collision probability not worse than 10^{-9} per flight) to meet certification standards. Implementing such an architecture, together with ground-based UTM infrastructure and updated flight regulations, will ensure the safe joint use of airspace by unmanned and manned aviation.

Keywords: unmanned aerial vehicles, UAV integration, collision avoidance system, multi-sensor detection, flight coordination, certification, intelligent transport systems

For citation: Avtin I. V., Karachin S. V., Lunev E. M., Khudoshin V. V. About the features of the system architecture of the collision warning system when integrating unmanned aircraft into the airspace of the Russian Federation. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2025, no. 51, pp. 110–121. (In Russ.)

Введение

Бурное развитие беспилотных воздушных судов (БВС) и их планируемая интеграция в общее воздушное пространство предъявляют новые требования к бортовым системам безопасности. Одной из ключевых технологий обеспечения безопасности совместных полётов пилотируемой авиации и БВС является система предупреждения столкновений (СПС). Данная система должна выполнять роль, аналогичную зрению пилота при визуальных полётах, автоматически обнаруживая угрозы столкновения и предотвращая их. Интеграция БВС всех категорий масс – от малых квадрокоптеров до тяжёлых беспилотных летательных аппаратов – в воздушное пространство Российской Федерации требует адаптации архитектуры СПС под особенности БВС.

Актуальность темы подтверждается заинтересованностью авиационной отрасли в развитии сегмента беспилотной авиации, выраженной в национальном проекте «Беспилотные авиационные системы». Согласно национальному проекту «Беспилотные авиационные системы», к 2030 году парк российских БВС может достичь ~46 тыс. аппаратов (планируется производство ~32 тыс. единиц в Российской Федерации) [1]. Это означает значительное увеличение интенсивности использования воздушного пространства, в том числе совместно с пилотируемой авиацией. При этом международные стандарты для СПС БВС всё ещё находятся в стадии разработки, и готовых коммерческих продуктов пока нет. В России до настоящего времени не создано отечественных СПС для предотвращения столкновений БВС с самолётами, и отрасль была во многом зависима от зарубежных разработок.

В таких условиях Федеральное агентство воздушного транспорта (Росавиация) инициировало исследования по формированию требований к СПС для БВС. В 2024 году объявлена научно-исследовательская работа (НИР) для разработки требований к СПС, способной обеспечить совместные полёты БВС и самолётов с приемлемым уровнем безопасности. Согласно техническому заданию, вероятность возникновения катастрофической ситуации не должна превышать 10^{-9} на один полёт при совместном нахождении БВС и пилотируемого самолёта в одном воздушном пространстве. Эта амбициозная цель определяет особенности архитектуры будущей системы.

Обзор существующих систем предупреждения столкновений

Зарубежные решения

TCAS/ACAS (Traffic Collision Avoidance System / Airborne Collision Avoidance System). В пилотируемой гражданской авиации для предупреждения столкновений используется система TCAS (она же ACAS по терминологии ИКАО). TCAS устанавливается на самолётах и осуществляет обмен сигналами посредством приёмопередатчиков самолётов, предупреждая экипажи о сближении и выдавая рекомендации по уклонению. TCAS доказала эффективность [2] для предотвращения столкновений двух оснащённых ею самолётов. Однако прямая интеграция БВС в существующую парадигму TCAS неосуществима. Во-первых, далеко не все воздушные объекты, с которыми может столкнуться БВС, оборудованы транспондерами (например, малые самолёты авиации общего назначения, другие БВС, птицы). Во-вторых, типичная архитектура TCAS предполагает участие пилота для выполнения рекомендуемых манёвров, что не во всех обстоятельствах применимо для БВС. Наконец, существующая бортовая СПС, используемая пилотами, непригодна для предотвращения столкновений с БВС из-за многообразия типов и массогабаритных характеристик БВС [1]. Таким образом, требуются новые решения.

Новые поколения ACAS X и ACAS Xu. В США и Европе ведётся разработка системы нового поколения ACAS X, использующей современные алгоритмы принятия решений на основе теории марковских процессов. Для беспилотных авиационных систем создана специальная модификация ACAS Xu (Airborne Collision Avoidance System for Unmanned Aircraft) – вариант ACAS X для БВС. Особенностью ACAS Xu является включение горизонтальных манёвров уклонения наряду с вертикальными, а также использование современных методов наблюдения, таких как ADS-B, для обнаружения конфликтов [3]. Разработка стандартов ACAS Xu началась около 2016 г., и к концу 2020 г. были утверждены минимальные требования (MOPS) – опубликованы RTCA DO-386 [4] и EUROCAE ED-275 [5]. Также планируется вариант ACAS sXu для малых БВС с размахом крыла <15 м [3]. Пока ACAS Xu не внедрена коммерчески, но уже проведены успешные испытания её прототипа. Предполагается, что БВС, оснащённые ACAS Xu, смогут координировать свои манёвры уклонения с самолётами, оснащёнными TCAS/ACAS, подобно тому, как это делают два самолёта с TCAS II.

Detect-and-Avoid (DAA) и проекты Sense-and-Avoid. Помимо ACAS, на международном уровне ведутся широкие исследования технологий «обнаружения и избегания» (Detect and Avoid, DAA) для БВС [6–8]. DAA включает в себя не только непосредственно предотвращение неизбежных столкновений, но и заблаговременное обеспечение нормативных дистанций между судами (концепция *remain well clear* – оставаться на безопасном удалении). Так, в США NASA совместно с промышленностью провели серию испытаний по интеграции крупных БВС в национальное воздушное пространство. В 2014 г. БВС Ikhana (модификация MQ-9 Reaper) был оснащён экспериментальным комплексом из датчиков ADS-B¹, TCAS и бортового радара для обработки сценариев обнаружения конфликтов и уклонения [9]. Система успешно обнаруживала

¹ <https://www.nasa.gov/aeronautics/nasa-flight-tests-new-ads-b-device-on-ikhana-uas/>

приближение как оснащённых транспондерами самолётов, так и воздушных целей, видимых радаром, выдавая рекомендации по манёврам.

Европейский проект MIDCAS. В Европе значимым шагом стал проект MIDCAS (Mid-Air Collision Avoidance System) [10, 11], координируемый Европейским оборонным агентством с участием компаний Airbus, Thales, Saab и др. (бюджет ~50 млн евро, старт в 2009). В 2014–2015 гг. консорциум MIDCAS провёл полётные испытания беспилотного летательного аппарата Sky-Y, оснащённого комплексом датчиков как кооперативных, так и некооперативных. В состав системы входили ADS-B и запросчик IFF (для обнаружения отвечающих бортов) и одновременно бортовая РЛС, электрооптические (ЕО) и инфракрасные (IR) камеры для обнаружения воздушных объектов, не оснащённых ответчиками [9]. Данные от разных датчиков интегрировались в единую картину угроз на борту. БВС успешно выполнял автоматические манёвры уклонения от встречных воздушных целей в различных сценариях, включая сближение с легкомоторным самолётом-«нарушителем» [9]. Важным результатом MIDCAS стало подтверждение работоспособности архитектуры «Sense-And-Avoid» на основе мультисенсорной оценки воздушной обстановки. Полученный опыт лёг в основу разрабатываемых европейских стандартов и требований EASA к БВС.

Локальные и малогабаритные решения. Для малых БВС, летающих на низких высотах, актуальны упрощённые системы предупреждения столкновений, отличные от классических TCAS, применяемых в пилотируемых ВС. Широкое применение получили средства предупреждения столкновений на основе спутниковой навигации и прямого обмена телеметрией между аппаратами. Примером является швейцарская система FLARM [12], изначально разработанная для планёров и малой авиации, а сейчас адаптированная и для БВС. Устройства FLARM периодически обмениваются информацией о своём положении и траектории по радиоканалу; при угрозе сближения рассчитывается и выдаётся предупреждение пилотам. FLARM предоставляет информацию о ближайшем воздушном движении и предупреждает о возможных столкновениях². Эта технология уже помогла предотвратить многие столкновения в малой авиации и сейчас доступна в виде компактных модулей для установки на БВС (например, модули FLARM AtomUAV и др.).

Другой пример – внедрение технологий предупреждения столкновений в массовых коммерческих БВС. Компания DJI (Китай), крупнейший производитель мультикоптеров, с 2020 года оснащает ряд моделей БВС приёмником ADS-B под названием DJI AirSense³. Этот модуль принимает сообщения ADS-B от приближающихся самолётов и вертолётов и предупреждает оператора БВС о наличии поблизости пилотируемого борта. Таким образом, даже любительский БВС получает ситуационную осведомлённость о воздушной обстановке. Хотя система DJI AirSense не выполняет автоматического уклонения, она позволяет оператору вовремя увести БВС с пути самолёта.

Отдельно стоит упомянуть экспериментальные системы технического зрения. Ряд стартапов (например, канадско-американская Iris Automation [13]) разрабатывают бортовые комплексы на основе камер и компьютерного зрения, способные обнаруживать приближающиеся самолёты визуально (по контрастным точкам на небе) и оценивать риск столкновения. Подобные системы перспективны для лёгких БВС, где установка радара невозможна по весовым ограничениям. Однако дальность и надёжность чисто оптических методов пока уступает радиотехническим; часто применяется комбинация нескольких типов датчиков для повышения вероятности обнаружения.

Российские решения

В Российской Федерации до недавнего времени не было коммерчески доступных систем предотвращения столкновений, предназначенных специально для БВС и их полёта в едином воздушном пространстве с пилотируемыми воздушными судами. Все беспилотные системы,

² The practical collision warning system FLARM. URL: <https://goo.su/NltDk>

³ <https://www.dji.com/ca/newsroom/news/dji-adds-airplane-and-helicopter-detectors-to-new-consumer-drones>

эксплуатируемые в гражданском секторе, либо действовали в зоне прямой видимости оператора (VLOS), либо в изолированных полигонах, где риск встречи с самолётом минимизирован организационно. В пилотируемой авиации РФ традиционно применялись импортные системы TCAS II. Однако в свете импортозамещения и санкционных ограничений ведётся разработка отечественных СПС.

Одним из примеров является новая российская бортовая система предупреждения столкновений «СПСВ», созданная АО «Навигатор». СПСВ представляет собой функциональный аналог TCAS II: она обеспечивает предупреждение экипажа о потенциально опасном ВС-нарушителе и выдаёт рекомендации по предотвращению столкновения (т. н. RA – resolution advisory). В августе 2023 г. сообщалось, что СПСВ успешно прошла испытания на самолёте Let L-410 и планируется к установке на региональные авиалайнеры SSJ-100⁴. По данным производителя, СПСВ включает в себя функции TCAS II, встроенный ответчик (режимы А/С/В вторичного радара) и модуль ADS-B. Система интегрируется с бортовым оборудованием (ГНСС, инерциальной системой и т. д.) и обеспечивает экипаж информацией о воздушной обстановке. Таким образом, Россия получила собственный аналог ACAS, что повышает технологическую независимость в пилотируемой авиации. Теоретически СПСВ может быть установлена и на крупноразмерные БВС (тяжёлого класса) для обеспечения их совместимости с требованиями АТС и взаимодействия с самолётами. Однако для малого и среднего классов БВС такая громоздкая авионика не подойдёт, поэтому требуются иные архитектурные решения.

В целях разработки специализированных решений Росавиация инициировала упомянутую выше НИР по теме СПС для БВС. Ожидается, что в ходе этой работы будут определены требования к архитектуре СПС БВС, после чего начнётся опытно-конструкторская работа по созданию прототипа. Вновь создаваемая СПС должна учитывать как многообразие конструктивных решений и массогабаритных характеристик БВС (от многокилограммовых вертолётов до лёгких квадрокоптеров), так и сценариев эксплуатации БВС [1] и эффективно предотвращать их столкновения как друг с другом, так и с пилотируемыми судами. На текущий момент отечественных готовых решений СПС для БВС не существует, так же как и за рубежом в виде коммерческого продукта.

Перечень решений СПС за рубежом и в России приведён в таблице.

Перечень решений СПС за рубежом и в России

Разработка	Описание и применение	Статус
TCAS II / ACAS II		
Международный стандарт (США, ИКАО)	Бортовая система предупреждения столкновений для пилотируемых ВС; использует ответчики SSR, выдаёт команды уклонения (вертикальные). Подходит для крупных БВС при наличии удалённого пилота или автопилота, способных выполнить манёвр.	Широко внедрена на пассажирских и транспортных самолётах; для БВС напрямую не применяется (требуется адаптация).
ACAS Xu / ACAS sXu		
США / Евросоюз	Новое поколение СПС для беспилотных систем (БВС). Включает горизонтальные манёвры уклонения, использует сигналы ADS-B и другие датчики. ACAS sXu – вариант для малых БВС (размах <15 м) [3].	Стандарты (MOPS DO-386/ED-275) утверждены в 2020 г. [4, 5]. Проводятся испытания; коммерческая реализация ожидается после 2025 г.

⁴ New Airborne Collision Avoidance System Boosts Russia's Tech Independence. Sputnik, 31.08.2023. URL: <https://goo.su/7Jxu3>

Окончание таблицы

Разработка	Описание и применение	Статус
MIDCAS (Sense & Avoid)		
Евросоюз (консорциум)	Экспериментальная система обнаружения и предотвращения столкновений: комбинирует кооперативные (ADS-B, транспондер) и некооперативные датчики (радар, EO/IR) на борту БВС. Выполняет автоматическое уклонение от препятствий [9].	Демонстрационные полёты проведены (2014–2015) [9]. Развитие продолжается в рамках стандартов EASA; коммерческий продукт не выпущен.
FLARM для БВС		
Швейцария / мировое распространение	Кооперативная система предупреждения столкновений для малой авиации и БВС. Обмен навигационными данными по радиоканалу; расчёт траекторий и предупреждение об угрозе столкновения. Особенно полезна для малых БВС и авиации общего назначения (где нет транспондеров).	Широко используется в планёрном спорте, малой авиации. Для БВС доступны компактные устройства (например, FLARM Atom UAV). Не является обязательным стандартом.
DJI AirSense (ADS-B In)		
Китай	Система ситуационной осведомлённости: приёмник ADS-B на коммерческих БВС DJI предупреждает оператора о приближении самолётов [14].	Установлена на некоторых моделях DJI с 2020 г. (БВС массой >250 г). Является предупреждающей системой (без автоматического уклонения).
СПСВ (АО «Навигатор»)		
Россия	Отечественная бортовая СПС (аналог TCAS II). Функции: предупреждение столкновений, выдача команд уклонения; встроенный ответчик и ADS-B. Предназначена в первую очередь для пилотируемых самолётов; может применяться на тяжёлых БВС.	Испытана на L-410, планируется установка на SSJ-100. В стадии внедрения. Для БВС специально не адаптирована (может использоваться частично).
Перспективная СПС для БВС		
Россия	Разрабатываемая система предупреждения столкновений для БВС всех категорий. Вероятно, включает многоуровневую архитектуру с разными датчиками (кооперативными и некооперативными), интеграцией с автопилотом и наземными службами. Требования: снижение вероятности столкновения до 10^{-9} [1].	НИР (2024–2025) по формированию требований к системе запущена Росавиацией [1]. Коммерческое внедрение – ~2030 год.

Данные таблицы свидетельствуют о том, что зарубежные решения продвинулись в основном в области крупных БВС (ACAS Xu, MIDCAS) и кооперативных методов (FLARM, ADS-B для малых БВС), тогда как в России идёт становление собственной элементной базы бортовых средств наблюдения для СПСВ и формирование задела для специальных СПС БВС. Общая тенденция – движение от полностью разделённых полётов к совместным, с техническим обеспечением безопасности полёта БВС как бортовыми, так и наземными средствами наблюдения.

Нормативно-правовая база интеграции БВС в Российской Федерации

Эффективное внедрение систем предупреждения столкновений неразрывно связано с нормативной базой, которая устанавливает правила полётов БВС и требования к оборудованию.

В Российской Федерации вопрос интеграции БВС в общее воздушное пространство на текущий момент решается организационно за счёт ограничений и специальных режимов.

Действующие ограничения. На сегодняшний день в РФ действуют достаточно жёсткие ограничения на полёты гражданских БВС. Согласно постановлениям Правительства Российской Федерации от 25.05.2019 № 658⁵ и от 19.03.2022 № 415⁶, с 2022 года любое беспилотное воздушное судно массой более 150 грамм подлежит обязательной регистрации в Росавиации. Полёты же аппаратов массой более 30 кг разрешены только в рамках специальных экспериментальных правовых режимов (ЭПР), которые устанавливают ограниченную зону и условия выполнения таких полётов. Фактически крупные БВС (например, тяжёлые БВС вертолётного или самолётного типа) не могут летать свободно по стране – им отведены полигоны или коридоры, закрытые для остального движения. Аналогично полёты БВС вблизи аэродромов существенно ограничены: если оператору БВС выдано разрешение на использование участка воздушного пространства, этот участок закрывается для пилотируемой авиации. Такой подход обеспечивает безопасность разделением в пространстве/времени, но не является долгосрочным решением при росте плотности воздушного движения.

Федеральные правила и стандарты. В Воздушном кодексе РФ пока нет отдельной главы, полностью регламентирующей совместные полёты БВС с пилотируемыми судами, однако ведётся работа над изменениями. Федеральные авиационные правила (ФАП) для БВС находятся в стадии разработки и экспериментального внедрения. Например, в 2021–2023 гг. принимались нормативные акты, определяющие понятия классификации БВС, порядок регистрации, требования к оператору и т. п. В контексте СПС важно, что нормативы безопасности полётов для БВС будут во многом эквивалентны пилотируемым: т. е. БВС, выполняющее полёт в общем воздушном пространстве, должно обеспечивать уровень безопасности, эквивалентный тому, как если бы на борту находился пилот, способный видеть другие воздушные суда и избегать опасных сближений с ними.

Росавиация совместно с другими ведомствами разрабатывает требования к оснащению БВС для полётов за пределами прямой видимости (BVLOS) и в контролируемом воздушном пространстве. Эти требования включают наличие на борту средств связи, ответчиков вторичного радиолокатора (для крупных БВС), и в перспективе – системы обнаружения и предотвращения столкновений. До их официального утверждения полёты больших БВС осуществляются по разовым разрешениям с условиями: наличие наземных наблюдателей, использование резервных каналов связи, полёт в светлое время суток и т. п. В 2023 году вышла «дорожная карта» по интеграции БАС (беспилотных авиационных систем) в общее пространство, предполагающая поэтапное снятие ограничений к 2030 г. по мере появления необходимых технологий и правил.

Отдельно стоит отметить влияние международных норм. Россия как член ИКАО при разработке системной архитектуры и алгоритмов СПС опирается на нормативно-техническую документацию ИКАО, RCTA и EUROCAE. Это необходимо для совместимости: например, БВС международного сообщения, летящий в чужом воздушном пространстве, должен соответствовать общемировым требованиям по оборудованию. Таким образом, нормативно-правовая база РФ постепенно эволюционирует от временных ограничительных мер к системе стандартов, гармонизированной с мировыми, где системы предупреждения столкновений будут обязательным элементом для соответствующих категорий БВС.

⁵ Об утверждении Правил учёта беспилотных гражданских воздушных судов с максимальной взлётной массой от 0,25 килограмма до 30 килограммов, ввезённых в Российскую Федерацию или произведённых в Российской Федерации. Постановление Правительства Российской Федерации от 25.05.2019 № 658.

⁶ О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 25 мая 2019 г. № 658. Постановление Правительства Российской Федерации от 19.03.2022 № 415.

Особенности системной архитектуры СПС при интеграции БВС

Учитывая вышеизложенное, можно сформулировать ключевые особенности системной архитектуры системы предупреждения столкновений для БВС, необходимой для их безопасной интеграции в общее воздушное пространство Российской Федерации:

1. Многоуровневая подсистема датчиков (кооперативные и некооперативные датчики). Архитектура СПС для БВС должна предусматривать использование разнородных источников информации о воздушной обстановке. Кооперативные средства включают в себя бортовой радиолокационный ответчик (режимы А/С/С), средства ADS-B, средства обмена данными через линию связи. Они позволяют обнаруживать оборудованные объекты (самолёты с транспондерами, другие БВС с передатчиками). Некооперативные датчики – бортовой первичный радиолокатор, оптические камеры, инфракрасные датчики, акустические микрофоны и т. п. необходимы для обнаружения объектов, не излучающих опознавательных сигналов (малогабаритные БВС, воздушные шары, птицы, ВС без транспондеров). Интеграция данных от нескольких датчиков является важной особенностью архитектуры: система должна объединять информацию, чтобы повысить вероятность правильного обнаружения и уменьшить количество ложных срабатываний. Опыт европейского MIDCAS подтвердил эффективность подобного подхода: только совокупное использование ADS-B, запроса ответчика и радара/камер обеспечило необходимую полноту обзора пространства [9]. Таким образом, многоуровневая подсистема датчиков делает СПС БВС универсальной для разных эксплуатационных условий – от аэродромного пространства с развитой инфраструктурой до низковысотного полёта над сельской местностью.

2. Встроенное прогнозирование и оценка риска столкновения. Собранные данные должны в реальном времени обрабатываться бортовой системой для выявления потенциально опасных сближений БВС с окружающими воздушными судами. Алгоритмы СПС непрерывно прогнозируют траекторию собственного БВС и траектории ближайших воздушных объектов. Если результаты расчёта параметров, характеризующих степень опасности взаимного сближения, превышают пороговые значения (нарушения установленных минимальных расстояний или времени до момента максимального сближения), система генерирует предупреждение. Здесь важно разграничить два уровня: (а) обеспечение «достаточного удаления» (Well-Clear) – т. е. выполнение манёвра по уклонению на значительном удалении, при котором обеспечивается приемлемая вероятность потенциального столкновения; (б) непосредственно предотвращение столкновения – крайний случай, когда без немедленного манёвра столкновение неизбежно. Архитектура СПС должна учитывать оба уровня. В современных концепциях ДАА этот функционал делят на подсистему Detect (обнаружение и предотвращение конфликта на тактическом уровне, зачастую посредством изменения курса заблаговременно) и, собственно, Avoid (манёвр последнего шага для уклонения от столкновения, аналог TCAS RA). Например, в ACAS Xi заложена логика как предупреждения пилота/оператора о нарушении безопасного разделения (для сохранения Well-Clear), так и выдачи рекомендаций по уклонению, если вероятность столкновения становится реальной [3]. Таким образом, архитектура СПС включает модуль оценки обстановки и модуль принятия решений по защите от столкновения с разными порогами срабатывания.

3. Автономность и взаимодействие с автопилотом. В отличие от пилотируемого самолёта, где решение об уклонении выполняет человек, в беспилотной системе может потребоваться полностью автоматическое выполнение манёвра. Системная архитектура должна предусматривать тесную интеграцию СПС с автопилотом БВС. При возникновении предупреждения о столкновении возможны несколько сценариев:

- Если оператор находится на связи и время позволяет, система может передать предупреждение на наземную станцию, и пилот-оператор вручную скорректирует траекторию полёта. Однако при быстрых сближениях или задержке связи это недостаточно надёжно.

- Поэтому в критических ситуациях СПС должна напрямую выдавать команду автопилоту на выполнение уклонения (например, немедленно снизиться или изменить курс). Такой режим аналогичен режимам AP/FD TCAS в самолётах разработки Airbus, но для БВС это приоритетный режим.

- При этом алгоритмы расчёта траектории должны гарантировать, что манёвр уклонения не приведёт к новым угрозам (например, столкновению с другим объектом или потерей устойчивости полёта).

Архитектурно это требует высоконадёжного интерфейса между системой обнаружения угроз и системой управления полётом. Команды СПС должны иметь приоритет (override) над штатными задачами полёта, если того требует безопасность. Например, БВС на маршруте может отклониться от плана полёта, чтобы избежать столкновения, и уже затем получить команду от наземного центра вернуться на заданный маршрут. Высокая степень автономности системы уклонения – необходимое условие выполнения целевого уровня безопасности 10^{-9} , заявленного в требованиях Росавиации, так как рассчитывать только на человека-оператора недопустимо.

4. Связь и координация с внешними системами. Несмотря на автономность, СПС БВС не должна действовать независимо от остальной системы организации воздушного движения. Архитектура предусматривает взаимодействие с наземными службами и бортовыми системами других участников движения. Это включает:

- Работу бортового ответчика и ADS-B передатчика: БВС должен быть «видимым» на экранах вторичного радиолокатора у диспетчеров, а также отображаться на индикаторах TCAS самолётов как полноценный элемент воздушного движения. Это условие для интеграции в контролируемое пространство. Так, тяжёлый БВС обязан нести транспондер Mode S с высотомером и, возможно, оборудование ADS-B Out.

- Приём команд от диспетчера/служб UTM: если диспетчер воздушного движения даёт команду уклониться (своевременно заметив возможный конфликт), БВС должен уметь принять её по радио или через цифровую сеть. В дальнейшем развитие концепции UTM (Unmanned Traffic Management) позволит автоматизировать обмен информацией о траекториях между БВС и системой организации воздушного движения. Архитектура СПС должна быть совместима с такими протоколами обмена.

- Координацию манёвров уклонения: в идеале, если два летательных аппарата, оснащённых СПС, сближаются, их системы должны предварительно согласовать свои манёвры (подобно тому, как согласовывают два TCAS – один самолёт набирает высоту, другой снижается). Для этого используются стандартизованные сигналы (например, обмен сообщениями с помощью Mode S или ADS-B). ACAS Xu предполагает такую координацию с TCAS других самолётов [3]. Для БВС малого класса прямая координация сложнее, но возможна через сетевое взаимодействие (например, через сервер UTM, если задержки малы). В архитектуре это выражается в наличии модуля СПС, обеспечивающего обмен данными уклонения между аппаратами.

5. Масштабируемость под разные категории БВС. Требования и технические решения СПС для малых и крупных БВС разнятся. Малые БВС ограничены по массе и энергопотреблению, поэтому не могут ни нести тяжёлый радар или мощный вычислитель, ни обеспечить их питание. Для малых БВС упор делается на «лёгкие» датчики (например, камеры, ультразвуковые дальномеры) и на вынесение части функционала на землю или в сеть (средства наблюдения с земли, геозоны, сетевые уведомления). Напротив, большой БВС, летающий по правилам приборного пилотирования, должен иметь полнофункциональную бортовую систему, сопоставимую с пилотируемым самолётом. Архитектура СПС должна быть модульной, позволяя конфигурировать систему под класс аппарата:

- Для тяжёлых БВС (массой сотни кг и выше): полноценный набор датчиков (транспондер, ADS-B, радар переднего обзора, возможно, камеры), вычислительный блок, алгоритмы уклонения, интегрированные с автопилотом. Фактически это эквивалент ACAS Xu. Например,

перспективные российские БВС типа «Орион» или «Альтиус» для полётов в общем пространстве могли бы нести такой комплекс аппаратуры.

- Для средних БВС (десятки кг): облегчённая версия – возможно, без тяжелого радара, но с ADS-B In/Out, небольшим лидаром или несколькими камерами для обеспечения кругового обзора, с использованием средств геозонирования. Основная угроза для таких аппаратов – столкновение с вертолётom или лёгким самолётom на малом удалении в пределах нескольких километров.

- Для малых БВС (менее 25 кг): минимальный набор – например, ретрансляция координат через сеть на сервер, предупреждения оператору, базовые алгоритмы обхода обнаруженных препятствий. Здесь большую роль играют внешние инфраструктурные средства: геокарты запретов, кураторы полётов, локальные РЛС на критических объектах и т. п. Бортовая СПС у самых маленьких БВС может ограничиваться просто датчиком ADS-B и оптической системой обнаружения ВС на основе камер.

Таким образом, масштабируемость и модульность – важная особенность архитектуры. По сути, СПС для БВС – это комплекс систем, набор компонентов которых зависит от специфики решаемых задач, эксплуатационного окружения и характеристик конкретного аппарата.

6. Надёжность, отказобезопасность и сертификация. Поскольку СПС относится к критически важному оборудованию, обеспечивающему безопасность полёта, её архитектура должна предусматривать функциональное и структурное резервирование и контроль исправности. Например, может предусматриваться дублирование критичных датчиков (два независимых канала обнаружения, например, ADS-B и оптический, для подтверждения достоверности данных). Алгоритмы должны проходить верификацию на предмет «непревышения» приемлемого уровня ложных срабатываний, которые могли бы привести к непредвиденным и опасным манёврам. Важна и кибербезопасность: кооперативные системы (ADS-B, FLARM) уязвимы к зашумлению и поддельным сигналам, поэтому СПС должна уметь фильтровать неправдоподобные данные. Эти аспекты выходят за рамки данной работы, но являются неотъемлемой частью требований к архитектуре СПС.

Сертификация СПС для БВС должна опираться на существующие нормы (КТ-178С/ДО-178С [15] для программного обеспечения и КТ-254/ДО-254 [16] для бортовой электронной аппаратуры) с учётом критичности СПС в зависимости от класса БВС и ожидаемых условий его эксплуатации. В России сертификация таких систем будет проводиться уполномоченным органом с учётом международных стандартов. Вероятно, появятся отдельные главы в своде норм лётной годности беспилотных авиационных систем (НЛГ Л-БАС), регламентирующие требования к СПС в разных категориях БВС.

Заключение

Интеграция БВС всех классов в общее воздушное пространство Российской Федерации – сложная междисциплинарная задача, требующая одновременного развития технологий и обновления нормативно-технической базы. Системы предупреждения столкновений (СПС) выступают одним из ключевых элементов, обеспечивающих безопасное сосуществование БВС и пилотируемых воздушных судов. Проведённый обзор показал, что за рубежом накоплен существенный опыт разработки таких систем: от традиционной TCAS, эволюционирующей в ACAS Xu для БВС, до экспериментальных комплексов с применением радаров и оптических датчиков. В России предпринимаются шаги к созданию собственных СПС – как путём адаптации существующих решений (СПСВ), так и через инициативные НИОКР в области беспилотной авиации.

Система должна обладать мультисенсорным «зрением» (совмещать данные от разных датчиков), оценкой ситуации на основе наиболее достоверных данных и принятием решений по манёвру уклонения, действовать автономно и в реальном времени, но при этом быть способной к координации действий с внешними участниками (другими судами, диспетчерами).

Архитектура должна масштабироваться под разные технические и массогабаритные характеристики аппаратов и учитывать высокие требования к надёжности.

Нормативно установленные требования (например, уровень безопасности не ниже 10^{-9} столкновений на полёт) задают высокую планку, достичь которой возможно лишь при комплексном подходе, когда технические решения (СПС на борту, наземная инфраструктура UTM) дополняются продуманными правилами использования воздушного пространства. В ближайшие годы ожидается разработка и испытание прототипов СПС для БВС в России, их поэтапная сертификация и внедрение. Это откроет путь к более широкому применению БВС – от грузовых БВС на магистральных маршрутах до городских аэротакси – без ущерба для безопасности.

Научный и технический задел, рассмотренный в статье, свидетельствует о том, что интеграция БВС в общее воздушное пространство может быть осуществлена без потери уровня безопасности. Построение эффективной системной архитектуры СПС станет краеугольным камнем этой интеграции, обеспечивая «цифровое зрение» беспилотным системам и доверие со стороны авиационного сообщества. Работа в данном направлении продолжается как на международном уровне, так и в Российской Федерации, приближая время, когда беспилотные и пилотируемые аппараты будут равноправно разделять воздушное пространство.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список источников / References

1. В России готовят технологию предотвращения столкновений беспилотников и самолётов. Таких систем пока нет нигде в мире // Сетевое издание «CNews», 25.06.2024. [Russia is preparing technology to prevent collisions between drones and airplanes. There are no such systems anywhere in the world yet. CNews, 25.06.2024]. URL: <https://goo.su/rSez>
2. TCAS II v7.1 Introduction Booklet. U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Washington, 2011, 50 p.
3. ACAS Guide. Airborne Collision Avoidance Systems. Eurocontrol, 2022, 144 p.
4. RTCA DO-386. Minimum operational performance standards for Airborne Collision Avoidance System X (ACAS X). In 2 vol., RTSA, 2020, 1935 p.
5. EUROCAE ED-275. Minimum Operational Performance Standard (MOPS) for ACAS X. In 2 vol., EUROCAE, 2020, 1810 p.
6. Kolditz S., Klarer D., Hennig J., Erwe M., Wohler M. Detect and Avoid Technologies. *Journal of Aerospace Sciences and Technologies*, 2023, vol. 71, no. 1A, pp. 143–148.
7. Stroeve S., Villanueva-Cañizares C.-J., Dean G. The critical impact of remote pilot modelling in evaluation of detect-and-avoid system explained for ACAS X. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 2024, vol. 24, no. 4, pp. 1–17. <https://doi.org/10.59490/ejtir.2024.24.4.7380>
8. Jensen K., Andersen K., Jepsen J. H. A Detect And Avoid concept for UAS operations near Hospital Emergency Medical Services helipads in uncontrolled urban airspace. *Proceedings 15th Annual International Micro Air Vehicle Conference And Competition (IMAV2024)*, 2024, pp. 218–226.
9. Unlocking European skies for UAVs. Royal Aeronautical Society (RAeS), 2015, available at: <https://goo.su/q0WyRe> (accessed: 05.09.2025).
10. Johan Pellebergs. The MIDCAS Project. *27th International Congress of the Aeronautical Sciences*, 19–24 September 2010, Nice, France, available at: https://www.icas.org/icas_archive/ICAS2010/PAPERS/821.PDF (accessed: 21.08.2025).
11. MIDCAS Program Results Brings Closer Integration of RPAS in European Civil Airspace. ATC Network, 2015, available at: <https://www.atc-network.com/atc-news/indra-sistemas-s-a/midcas-program-results-brings-closer-integration-of-rpas-in-european-civil-airspace> (accessed: 21.08.2025).

12. Wang B., Tresoldi G., Strohmeier M., Lenders V. 2022. On the Security of the FLARM Collision Warning System. *Proceedings of the 2022 ACM on Asia Conference on Computer and Communications Security (ASIA CCS '22)*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 267–278. <https://doi.org/10.1145/3488932.3517409>
13. John Damush. Iris Automation: Onboard detect and avoid for beyond visual line of sight drone flight. *CIOReview*, Dec-Yan 2021, pp 30–31, available at: <https://www.cioreview.com/iris-automation> (accessed: 21.08.2025).
14. Today I learned just how good DJI integrates ADS-B. Reddit, available at: <https://goo.su/hIJeIS> (accessed: 21.08.2025).
15. RTCA DO-178C. Software Considerations in Airborne Systems and Equipment Certification, RTSA, 2012, 144 p.
16. RTCA DO-254. Design Assurance Guidance for Airborne Electronic Hardware. RTSA, 2000, 137 p.

Информация об авторах

Автин Игорь Викторович, ведущий инженер по ЛИ ВС – эксперт, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, IV_Avtin@gosniiga.ru

Карачин Сергей Владимирович, ведущий инженер по ЛИ ВС, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, KarachinSV@gosniiga.ru

Лунев Евгений Маркович, заместитель директора научно-исследовательского центра гражданской авиационной техники, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, lunev_em@gosniiga.ru

Худошин Владимир Викторович, начальник отдела, АО «Навигатор», Санкт-Петербург, Россия, hudoshinvv@navigat.ru

Authors information

Avtin Igor V., Leading Aircraft Flight Test Engineer - Expert, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, IV_Avtin@gosniiga.ru

Karachin Sergey V., Leading Aircraft Flight Test Engineer, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, KarachinSV@gosniiga.ru

Lunev Evgeny M., Deputy Head of Civil Aviation Research Center, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, lunev_em@gosniiga.ru

Khudoshin Vladimir V., Head of the Department, JSC “Navigator”, St. Petersburg, Russia, hudoshinvv@navigat.ru

Статья поступила в редакцию 24.04.2025; одобрена после рецензирования 03.09.2025; принята к публикации 10.09.2025.

The article was submitted 24.04.2025; approved after reviewing 03.09.2025; accepted for publication 10.09.2025.

Обзорная статья
УДК 629.7.018.77

ЛЁТНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ БОРТОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

В. Е. БАРСУК¹, В. В. ГЛАСОВ², Е. Ю. ЗЫБИН³, В. В. КОСЬЯНЧУК³, Г. А. ПЛАТОШИН³,
Д. Н. СМІРНОВ¹, В. С. ШАПКИН²

¹ Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С. А. Чаплыгина, Новосибирск, Россия

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

³ Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, Москва, Россия

Аннотация. Обоснована высокая актуальность проведения лётных экспериментальных исследований при разработке технологий интеллектуализации бортового оборудования перспективных гражданских воздушных судов (ВС). Кратко описаны формирующие комплекс бортового оборудования (КБО) перспективных ВС технологии интеллектуализации и интеллектуальные функции, основанные на данных технологиях, а также их взаимосвязь. Приведено определение лётных экспериментальных исследований технологий бортового оборудования. Описаны состав лётных экспериментальных исследований для системы внешнего видения, функции наблюдения, функции навигации, интеллектуального информационно-управляющего поля кабины (ИУП) экипажа и функции управления, которые реализуются с использованием разрабатываемых технологий. Представлены показатели, получаемые в результате проводимых исследований. Проведены исследования функционирования технологий без участия человека, а также технологий, включающих человека в контур своей работы. Показано, что несколько параметров функционирования исследуемых технологий, которые невозможно симитировать при стендовой отработке, играют решающую роль для подтверждения уровня готовности данных технологий и возможности использования их в КБО в составе перспективного ВС. Обоснованы положительные факторы, способствующие развитию перспективных технологий при проведении лётных экспериментальных исследований КБО и сформированы задачи на дальнейшие исследования.

Ключевые слова: лётные экспериментальные исследования, технологии интеллектуализации, бортовое оборудование, перспективное воздушное судно, интеллектуальные транспортные системы

Для цитирования: Барсук В. Е., Гласов В. В., Зыбин Е. Ю., Косьянчук В. В., Платошин Г. А., Смирнов Д. Н., Шапкин В. С. Лётные экспериментальные исследования при разработке технологий интеллектуализации бортового оборудования перспективных воздушных судов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 51. С. 122–132.

FLIGHT EXPERIMENTAL RESEARCH IN THE DEVELOPMENT OF INTELLECTUALIZATION TECHNOLOGIES FOR AVIONICS OF PROSPECTIVE AIRCRAFT

V. E. BARSUK¹, V. V. GLASOV², E. YU. ZYBIN³, V. V. KOSYANCHUK³, G. A. PLATOSHIN³, D. N. SMIRNOV¹,
V. S. SHAPKIN²

¹ Chaplygin Siberian Scientific Research Institute of Aviation, Novosibirsk, Russia

² National Research Center “Zhukovsky Institute”, Moscow, Russia

³ State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, Russia

Abstract. The article substantiates the high relevance of flight experimental research in the development of technologies for intellectualization of avionics of prospective aircraft. The intellectualization technologies and intellectual functions of prospective avionics based on these technologies are briefly described, and their interrelation is described. The definition of flight experimental research of avionics technologies is formed. The composition of flight experimental research for the external vision system, surveillance functions, navigation functions, intelligent information and control field of the cockpit and control functions that are implemented using the developed technologies are described. The indicators obtained as a result of the conducted research are presented. The researches of the functioning of technologies without human, as well as human-in-the-loop technologies are considered. It is shown that a number of parameters of the functioning of the technologies under research, which cannot be simulated during bench testing, play a decisive role in confirming their readiness levels and the possibility of using them in the avionics of a prospective aircraft. The positive factors contributing to the development of promising technologies in conducting flight experimental studies of the avionics are substantiated and tasks for further research are formulated.

Keywords: flight experimental research, intellectualization technologies, avionics, prospective aircraft, intelligent transport systems

For citation: Barsuk V. E., Glasov V. V., Zybin E. Yu., Kosyanchuk V. V., Platoshin G. A., Smirnov D. N., Shapkin V. S. Flight experimental research in the development of intellectualization technologies for avionics of prospective aircraft. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2025, no. 51, pp. 122–132. (In Russ.)

Введение

История испытаний авиационной техники (АТ) началась с момента появления первых летательных аппаратов тяжелее воздуха. Для начального периода испытаний было характерно совмещение функций конструктора, испытателя и лётчика. «24 марта 1918 года под личным руководством Н. Е. Жуковского была организована научно-исследовательская и испытательная “Летучая лаборатория”. Основной её задачей было исследование аэродинамики натурных моделей самолётов ... Начало 30-х годов характеризовалось интенсивным развитием научной, теоретической и экспериментальной базы, а также научно-исследовательской и испытательной работы. Это привело к тому, что для обеспечения испытаний АТ и её компонентов проводилась специализация целых коллективов, что привело к значительному повышению качества и уровня исследований, а также к увеличению их объёма» [1]. В это время лётные испытания стали неотъемлемым этапом разработки воздушных судов (ВС).

На сегодняшний день при проектировании перспективных ВС в них закладываются сложнейшие современные технологические решения, которые сами по себе до передачи в опытную эксплуатацию должны подтвердить свою работоспособность в окружении, близком к реальному.

Испытания изделий АТ в лабораторных условиях имеют существенные отличия от функционирования в условиях реальной эксплуатации. Лабораторные условия не позволяют обеспечить одновременное воздействие на изделие АТ всех тех факторов, которые имеют место в условиях реальной эксплуатации.

Как сказано далее в [1], «Экспериментальную отработку новых технологий необходимо проводить одновременно с разработкой эскизного проекта, а в ряде случаев и со значительным опережением, так как в эскизный проект должны вноситься решения, в той или иной степени апробированные расчётом или экспериментом. Несоблюдение этого требования при отсутствии на сегодняшний день адекватной теории оптимального управления всеми этапами жизненного

цикла изделий АТ неоднократно приводило к тому, что спроектированное и изготовленное изделие после проведённых испытаний приходилось в значительной степени проектировать заново».

Актуальность разработки, технологии и функции интеллектуального КБО перспективного ВС

Анализ аварий и авиакатастроф последних лет позволяет сформировать перечень основных причин, приводящих к авиационным происшествиям. Эти причины можно объединить в следующие группы:

- человеческий фактор (ошибки экипажа или диспетчерской службы, плохое самочувствие или усталость пилотов) – до 57 % от общего числа;
- неисправность техники (поломка бортовой техники, плохое качество топлива) – до 25 %;
- воздействие внешней среды (туман, ливень, резкое похолодание, высокая влажность воздуха, метель, турбулентность, сдвиг ветра) – до 15 %;
- прочие (террористический акт, саботаж, невыясненные) – до 3 %.

Таким образом, не менее половины авиационных происшествий случается из-за ошибок человека, в подавляющем большинстве случаев – членов экипажа.

Более половины авиационных происшествий происходит на аэродромах и прилегающей территории. По элементам полёта они разделяются следующим образом:

- при посадке – 36 % от общего числа происшествий по причине ошибок экипажа;
- при взлёте – 30 %;
- в крейсерском полёте – 18 %;
- при заходе на посадку – 16 %.

«Снижение вероятности ошибок, связанных с человеческим фактором, – одна из основных задач ФГБУ «НИЦ «Институт имени Н. Е. Жуковского» при интеллектуализации КБО перспективных ВС. В настоящее время в рамках этого направления осуществляется формирование научно-технического задела в виде развития ряда технологий с использованием искусственного интеллекта (ИИ)» [2, 3]. И далее в [2] указано:

«Среди этих технологий следующие:

- распознавание объектов в воздухе и на поверхности;
- распознавание элементов взлётно-посадочных полос (ВПП) и рулёжных дорожек;
- формирование синтезированного, улучшенного и комбинированного видения;
- формирование индикации закабинной обстановки в кабине без остекления;
- обработка данных для мониторинга состояния и действий экипажа;
- прогнозирование параметров полёта на основе анализа текущих данных;
- обработка данных для обеспечения бесшовности и приоритизации каналов связи;
- определение конфликтных ситуаций при взлёте, заходе на посадку и впоследствии в полёте в целом;
- выбор уровня автоматизации в полёте».

Совместное использование технического зрения в качестве источника данных и алгоритмов ИИ как в их обработке, так и в процессах связи и обмена данными вкупе с комплексным учётом психофизиологического состояния экипажа позволяет реализовать все перечисленные технологии, входящие в КБО перспективного ВС. Функционирование КБО предполагает комплексную автоматизацию функций связи, навигации, наблюдения и управления с помощью технологий с использованием ИИ. Снижение рабочей нагрузки на членов экипажа достигается за счёт использования когнитивных человеко-машинных интерфейсов на основе учёта и оценки физиологических параметров членов экипажа.

Система внешнего видения предназначена для сбора и первичной обработки данных, используемых интеллектуальными функциями наблюдения и навигации, а также ИУП кабины

экипажа. Интеллектуальная функция навигации определяет абсолютное положение ВС и его положение относительно других ВС, на основе функциональной избыточности обнаруживает отказ навигационного компонента на всех этапах полёта и обеспечивает непрерывность навигации. Интеллектуальная функция наблюдения непрерывно собирает информацию об окружающей обстановке в любых условиях полёта, распознаёт другие ВС и препятствия, формирует оценки угроз на всех этапах полёта. Интеллектуальное ИУП кабины осуществляет контроль состояния и действий экипажа с последующей адаптацией ИУП кабины на основе данных о пилотах и ВС.

Перечисленные функции и технологические решения комплексно используются для обеспечения работы интеллектуальной функции управления ВС, которая способна полностью автоматизировать управление на всех этапах полёта, реализовать автоматическое изменение маршрута в сложных метеорологических условиях и при отказах систем ВС, а также прогнозировать и оптимизировать параметры полёта на основе анализа данных о ВС с использованием технологий ИИ, что позволит реализовать в КБО перспективных ВС автоматический взлёт, пробег и руление, а также расширить условия эксплуатации ВС за счёт возможности осуществления автоматической посадки на все аэродромы, оборудованные по CAT I (категория 1).

План лётных экспериментальных исследований технологий интеллектуализации КБО перспективного ВС

Достаточность созданного в рамках комплексных научно-технологических проектов Института имени Н. Е. Жуковского задела к использованию в программах создания¹ образцов АТ подтверждается уровнями готовности технологий (УГТ) от УГТ 4 до УГТ 6, шкала которых представлена в ГОСТ Р 58048-2017². УГТ 6 предусматривает разработку демонстраторов технологий в виде элементов, подсистем или систем АТ и их испытаний в условиях, близких к эксплуатационным, с использованием стендов, летающих лабораторий, экспериментальных аппаратов и прототипов, а также верифицированных и валидированных расчётных методов. Лётные экспериментальные исследования являются средством для исследования ограничений принципиально новых технологических решений, обоснования требований к ним и подтверждения работоспособности в условиях, близких к эксплуатационным.

Основными целями лётных экспериментальных исследований при разработке технологий КБО перспективных ВС являются:

- экспериментальное подтверждение проведённых расчётов показателей функционирования в условиях, близких к эксплуатационным;
- определение эксплуатационных ограничений и резервов повышения качества и точности функционирования КБО;
- устранение дефектов взаимодействия элементов КБО в составе систем или комплекса в целом.

Способом исследований и подтверждения работоспособности технологий, рассматриваемых в данной статье, определено проведение лётных экспериментальных исследований разработанного в ФАУ «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем» (ГосНИИАС) лётного демонстратора элементов интеллектуального КБО перспективного ВС, устанавливаемого на одну из летающих лабораторий ФАУ «Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С. А. Чаплыгина» (СибНИА).

План лётных экспериментальных исследований системы внешнего видения.

В рамках данного направления будут проведены исследования системы внешнего видения перспективного ВС, которая должна обеспечивать ситуационную осведомлённость экипажа на

¹ ГОСТ Р 58849-2020. Авиационная техника гражданского назначения. ПОРЯДОК СОЗДАНИЯ. Основные положения.

² ГОСТ Р 58048-2017. Трансфер технологий. Методические указания по оценке уровня зрелости технологий.

протяжении всех этапов полёта – руление, взлёт, полёт по маршруту, посадка. На первом этапе исследований проводится сбор натурных данных для подготовки обучающих и тестовых выборок функции интеллектуальной обработки информации и алгоритмов сшивки видеосигналов. Функция интеллектуальной обработки информации включает в себя нейросетевые алгоритмы распознавания рулёжных дорожек ВПП и обнаружения препятствий на лётном поле.

На втором этапе будет проведена оценка работоспособности и характеристик системы внешнего видения. Целью данного лётного исследования является измерение временной задержки передачи данных от видеокамеры до отображения на системе индикации, а также проверка синхронизации между видеокамерами, работающими в различных диапазонах (видимом и инфракрасном). Это необходимо для оценки того, насколько оперативно экипаж сможет реагировать на изменения в окружающей среде при высоких скоростях и сложных условиях полёта.

Исследования будут проводиться в стандартных и сложных метеоусловиях. Они позволят определить допустимую задержку передачи данных и выявить возможные технические ограничения системы. Результаты также помогут оптимизировать работу системы внешнего видения в части минимизации задержек и улучшения синхронизации между различными источниками данных.

План лётных экспериментальных исследований функции наблюдения.

В рамках данного направления проводятся исследования оборудования перспективного ВС, отвечающего за обнаружение экипажем угроз. От параметров данного оборудования (поле зрения индикатора, оптические характеристики видеокамер системы технического зрения, условия видимости) зависят ограничения по времени и дальности обнаружения угроз ВС. В ходе работ определяются эти ограничения в зависимости от размеров ВС, угла и угловой скорости сближения.

Вторым этапом будут проведены исследования таких ограничений в условиях «закрытой кабины» посредством новых технических решений: ИУП с отображением трафика ВС на основе АЗН-В и системы внешнего видения. Исследования проводятся с целью подтверждения выбранных характеристик системы внешнего видения и системы дополненной реальности при решении задачи обнаружения угроз ВС.

Исследования будут проводиться в дневных и ночных условиях. По результатам исследований будут сформированы зависимости ограничений на обнаружение угроз ВС от внешних факторов, технических характеристик оборудования и параметров полёта. На первом этапе исследований будет производиться сравнение параметров (времени и дальности) обнаружения угроз ВС при работе экипажа в обычной кабине и в условиях «закрытой кабины». На втором этапе исследований будет произведено сравнение параметров обнаружения угроз ВС при работе экипажа в условиях «закрытой кабины» с системой дополненной реальности и с «изолированным» широкоформатным индикатором.

План лётных экспериментальных исследований функции навигации.

В рамках данного направления проводятся исследования по оценке точности определения пространственного положения ВС с целью оценки погрешности определения положения ВС бортовыми средствами навигации перспективного ВС. В исследовании определяются погрешности оценки линейных и угловых параметров относительного пространственного положения ВС, а также временной задержки их формирования в следующих случаях.

а) Относительно ВПП на посадке. Осуществляется оценка принципиальной возможности использования функции навигации перспективного ВС для посадки по категории ППС с точки зрения точности.

б) Относительно ВПП и рулёжных дорожек при движении/рулении по поверхности аэродрома. Осуществляется оценка принципиальной возможности использования функции навигации перспективного ВС для организации движения/руления по поверхности аэродрома с точки зрения точности.

в) Относительно другого ВС на поверхности аэродрома при движении/рулении по поверхности аэродрома. Осуществляется оценка принципиальной возможности использования функции навигации перспективного ВС для определения взаимного положения между ВС на этапе движения/руления по поверхности аэродрома с точки зрения точности.

Исследования по оценке вероятности обнаружения ВПП и элементов разметки ВПП на посадке проводятся при помощи системы технического зрения. В исследовании осуществляется оценка статистических характеристик обнаружения ВПП и элементов её разметки. В качестве обнаруживаемых элементов рассматриваются торцевые линии, боковые линии, осевая линия. Проводится оценка принципиальной возможности использования нейросетевых алгоритмов для обнаружения ВПП и элементов разметки ВПП на этапе посадки в составе функции навигации перспективного ВС для посадки по категории IIIС.

Все исследования проводятся днём и ночью при простых и сложных метеоусловиях. По результатам планируется сформировать зависимости погрешностей определения положения ВС функцией навигации от внешних факторов, технических характеристик оборудования и параметров полёта и движения по поверхности аэродрома.

План лётных экспериментальных исследований интеллектуального ИУП кабины.

В рамках данного направления проводятся исследования системы психофизиологической оценки состояния пилота. Эта система в случае недееспособности пилота (по причине потери сознания) активирует автоматический аварийный режим возврата.

На первом этапе исследования проверяется возможность использования внутренней видеокамеры для определения состояния пилота по его зрачкам. Цель исследования заключается в проверке эффективности и точности мониторинга состояния пилота на основе анализа его зрачков и частоты моргания глаз, включая выявление признаков усталости и потери сознания. В ходе полётов исследуются различные сценарии, такие как обычные полёты, ситуации стресса и имитация потери сознания. На данном этапе проводится количественная оценка точности определения состояния пилота и влияния на точность внешних факторов (вибрации самолёта, движения пилота и пр.).

На втором этапе проводится исследование браслета для оценки психофизиологического состояния пилота на основании его пульса. В рамках этого этапа браслет тестируется на пилотах в различных условиях полёта, включая стандартные и стрессовые режимы. Данные, полученные от браслета, будут сравниваться с результатами медицинских мониторов и электрокардиографического анализа с целью проверки точности измерений. Ожидается, что браслет будет обеспечивать точность измерений сердечного ритма с отклонением не более 2 %, а также корректно регистрировать изменения в уровне стресса. По результатам лётных экспериментальных исследований необходимо подтвердить, что браслет надёжно фиксирует данные без значительных искажений и сбоев в течение всего полёта.

Также в рамках второго этапа планируется осуществить тестирование браслета и видеокамеры в интегрированном режиме для оценки того, как данные от двух устройств взаимодействуют и дополняют друг друга, создавая более полную и точную картину состояния пилота. Будет измерено время от обнаружения критических изменений до активации аварийного режима. Оно должно составлять не более 2 секунд, что обеспечит быструю и эффективную реакцию автоматики в экстренных ситуациях. Ожидается, что комбинация данных от браслета и камеры повысит вероятность определения критических состояний пилота по сравнению с индивидуальным использованием каждого устройства.

План лётных экспериментальных исследований функции управления.

В рамках данного направления планируется проведение серии исследований, направленных на формирование требований к оборудованию и функциям лётного демонстратора в целях обеспечения управления ВС «от терминала до терминала» в условиях «закрытой кабины». Исследования проводятся по отдельным этапам полёта: руления по поверхности аэродрома, разбега, захода на посадку и пробега.

В процессе проведения исследований будут определены особенности работы экипажа при управлении ВС в условиях «закрытой кабины» и уточнены подходы к представлению пилотажно-навигационной и закабинной обстановки. Будет прорабатываться вопрос дистанционного управления ВС и перераспределения функции управления между бортовым и наземными сегментами информационно-вычислительной платформы лётного демонстратора. Результатами проведения исследований будут являться требования к управлению ВС в условиях «закрытой кабины».

Далее планируется проведение исследований функции управления полётом ВС «от терминала до терминала» с применением новых технических решений в условиях «закрытой кабины» по отдельным этапам полёта: руления по поверхности аэродрома, разбега, захода на посадку и пробега.

В процессе проведения исследований будет оцениваться эффективность новых технических решений, к которым относятся элементы «виртуального» пилота: виртуальные операционные помощники прерванного и продолженного взлёта и прерванной посадки, применение улучшенного и внешнего видения в средствах индикации, расширение ИУП экипажа путём реализации функции голосового помощника и функции пространственного звука.

На этапе руления по поверхности аэродрома будет определена возможность прокладки маршрута руления по аэродрому и его обновления от наземного сегмента с учётом текущего трафика, оценена возможность дистанционного и автоматизированного руления ВС с возможностью автоматического выдерживания дистанции. На этапе разбега будет оцениваться работа виртуального операционного помощника прерванного и продолженного взлёта при выполнении нормальных, аварийных и экстренных процедур. На этапе захода на посадку и пробега будет оцениваться работа виртуального операционного помощника прерванной посадки при выполнении нормальных, аварийных и экстренных процедур.

Также планируется проведение исследований работы системы управления перспективного ВС «от терминала до терминала» в части построения плана полёта, включая высотно-скоростной профиль полёта. При проведении исследований будет производиться оценка построения плана полёта «от терминала до терминала». План полёта будет формироваться с учётом текущих внешних угроз на поверхности аэродрома и в воздухе. Будет осуществлена оценка точности прогнозируемых навигационных параметров с учётом прогнозных метеоусловий и трафика.

Немоделируемые факторы, обуславливающие необходимость проведения лётных экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования изделий АТ проводятся в эксплуатационных и лабораторных условиях. Если по результатам лабораторных исследований можно полностью проверить тактико-технические характеристики опытного образца, то лётные экспериментальные исследования не проводятся. Однако «лабораторные исследования отличаются от условий реальной эксплуатации тем, что при их проведении не удаётся создать все возможные внешние воздействия одновременно. Обычно в лабораторных исследованиях объекты подвергаются воздействию одного-двух определённых факторов, что приводит к результатам, отличающимся от полученных при реальной эксплуатации.

Факторы, оказывающие влияние на изделия в процессе эксплуатации, разделяют на внутренние и внешние. Внутренние возмущающие факторы применительно к летательным аппаратам – это процессы тепловыделения работающей силовой установки и бортовых систем, несбалансированность быстро вращающихся масс, переходные процессы в бортовых системах, пульсации давления в трубопроводах, изменение центровки вследствие несовершенства работы топливной системы и т. п. Внешние воздействия, в свою очередь, можно разделить на: температурные воздействия; воздействия климатических механических, биологических и космических факторов.

В реальных условиях эксплуатации изделие подвергается одновременному воздействию комплекса климатических факторов» [1]. Данные факторы указаны в таблице. Искусственное создание таких условий при испытаниях представляет значительные трудности.

Комплекс климатических факторов, которым подвергается изделие авиационной техники в реальных условиях эксплуатации

Климатические факторы	Результаты воздействия
Высокая температура	Изменение индуктивности, ёмкостного и удельного сопротивления, диэлектрической проницаемости. Разрушение движущихся частей из-за размягчения и разбухания термоизоляционных материалов. Старение материалов. Ускорение процесса окисления и течения некоторых других химических реакций. Изменение вязкости смазок.
Низкая температура	Уменьшение эластичности, изменение диэлектрической проницаемости и вязкости материалов, замерзание жидкостей. Увеличение теплотерь. Структурная перегрузка из-за температурного изменения размеров материалов.
Влажность	Проникновение влаги в пористые материалы, что вызывает их увеличение в объёме, окисление материалов с хорошей электропроводимостью. Низкая влажность приводит к повышению хрупкости материалов, их гранулированию.
Соляной туман	Удельная проводимость солевого раствора уменьшает удельное сопротивление изоляционных материалов и способствует электролитическому травлению и химической коррозии металлов.
Осадки (роса, иней, дождь, снег, дождь со снегом)	Коррозия и разрушение структуры материала, повреждение электрических частей.
Солнечная радиация	Изменение цвета и свойств материалов, ускоренное старение.
Высокое или низкое давление	Разрывы структуры материалов. Изменение функциональных характеристик.

Проведение лётных экспериментальных исследований обеспечивает получение полной и достоверной информации о комплексном влиянии факторов окружающей среды на параметры функционирования разрабатываемых технологических решений.

Применительно к КБО перспективных ВС и их элементам, так же, как и множеству других самолётных систем, моделирование в лабораторных условиях комплексного одновременного воздействия внутренних и внешних возмущающих факторов не всегда может быть реализовано в полной мере, а также в большинстве случаев приводит к необходимости создания порой уникального и дорогостоящего испытательного оборудования, по стоимости и срокам создания соизмеримого или даже превышающего испытываемый объект. Более того, отдельные факторы, например, воздействие электромагнитных помех от работающего бортового электрического и радиоэлектронного самолётного оборудования не могут быть рассчитаны или смоделированы в лабораторных условиях. В связи с этим представляет практический интерес проведение испытаний КБО и их элементов в условиях, максимально приближённых к натурным, в темпе лётного эксперимента на летающей лаборатории, созданной на базе одного из существующих ВС. Это позволяет существенно сократить сроки и стоимость отработки разрабатываемых решений, а также, оперативно внося изменения по мере необходимости, повторно выводить на испытания доработанный объект испытаний.

Лётные экспериментальные исследования КБО и их элементов на летающей лаборатории обеспечивают:

- проверку работоспособности и эксплуатационной надёжности на реальных режимах полёта во всем диапазоне эксплуатационных параметров;
- отработку электромагнитной совместимости с электрическим и радиоэлектронным оборудованием реального самолёта;
- оперативную доводку и совершенствование испытываемого оборудования;
- определение эксплуатационных ограничений и особенностей реальной эксплуатации на ВС;
- минимизацию рисков утраты испытываемого оборудования в случае его отказа, так как оно не является основным оборудованием, обеспечивающим полёт летающей лаборатории;
- отсутствие необходимости создания оборудования для моделирования возмущающих факторов, которые реализуются за счёт выбора соответствующих режимов и условий полёта летающей лаборатории, в частности: климатических (температура, влажность, атмосферное давление и пр. (см. табл.) и механических (центробежные нагрузки, ускорения, вибрации и пр.).

Заключение

Проведение лётных экспериментальных исследований при разработке технологий интеллектуализации перспективных КБО позволит оценить функционирование объекта исследования при одновременном воздействии сложно моделируемых, а порой и не моделируемых в лабораторных условиях факторов.

В части разработки алгоритмов функционирования системы внешнего видения в ходе осуществляемых экспериментальных полётов собраны данные для обучающих выборок нейросетевых алгоритмов. Полученные данные позволяют провести анализ качества обучения нейронной сети на эталонных данных и дообучить её с использованием натуральных данных.

В результате ряда проведённых лётных экспериментальных исследований:

- экспериментальным путём подтверждена принципиальная возможность использования системы внешнего видения для автоматизации этапов полёта;
- сформированы дополнительные требования и ограничения к составу и размещению элементов перспективного КБО;
- обнаружены недостатки предложенных технических решений в части передачи сигналов и взаимодействия отдельных элементов систем и сформированы требования по их дальнейшему устранению;
- оценена степень влияния внутренних и внешних факторов в полёте на функционирование исследуемых технологических решений;
- экспериментальным путём подтверждена принципиальная возможность оценки недееспособности члена экипажа с целью активации автоматического режима «возврат».

Дальнейшие лётные экспериментальные исследования будут направлены на устранение обнаруженных недостатков и оценку функционирования различных сочетаний технологических решений в условиях, близких к эксплуатационным.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Список источников

1. Скорина С. Ф. Испытания изделий авиационной, ракетной и космической техники. Санкт-Петербург: ГУАП, 2017. 137 с.

2. Шапкин В., Гласов В. Искусственный интеллект в задачах повышения уровня безопасности полётов воздушных судов гражданской авиации // Авиасоюз. 2024. Т. 100. № 3/4. С. 8–11.

3. Дутов А. В., Гласов В. В., Шапкин А. В., Косьянчук В. В., Зыбин Е. Ю., Леликов М. А. Основные цели, задачи, этапы и технологии интеллектуализации комплексов бортового оборудования перспективных воздушных судов гражданской авиации // Техника воздушного флота. 2023. № 1. С. 11–20.

References

1. Skorina S. F. *Testing of Aviation, Rocket and Space Technology Products*. St. Petersburg, GUAP, 2017, 137 p. (In Russ.)

2. Shapkin V., Glasov V. Artificial intelligence in improving civil aviation aircraft flight safety. *Aviasoyuz*, 2024, vol. 100, no. 3/4, pp. 8–11. (In Russ.)

3. Dutov A. V., Glasov V. V., Shapun A. V., Kosyanchuk V. V., Zybin E. Yu., Lelikov M. A. Main goals, objectives, stages and technologies for intellectualization of on-board equipment complexes of promising civil aviation aircraft. *Air fleet technology*, 2023, no. 1, pp. 11–20. (In Russ.)

Информация об авторах

Барсук Владимир Евгеньевич, кандидат технических наук, директор, Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С. А. Чаплыгина, Новосибирск, Россия, sibnia@sibnia.ru

Гласов Владислав Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, директор проектного комплекса «Интеллектуальный борт», Национальный исследовательский центр «Институт имени Н. Е. Жуковского», Москва, Россия, glasovvv@nrczh.ru

Зыбин Евгений Юрьевич, доктор технических наук, начальник подразделения, Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, Москва, Россия, zybin@gosniias.ru

Косьянчук Владислав Викторович, доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора, Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, Москва, Россия, vvk@gosniias.ru

Платошин Георгий Александрович, кандидат технических наук, заместитель начальника подразделения по научной работе, Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, Москва, Россия, pga@gosniias.ru

Смирнов Дмитрий Николаевич, кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе, Сибирский научно-исследовательский институт авиации им. С. А. Чаплыгина, Новосибирск, Россия, smirnovd@sibnia.ru

Шапкин Василий Сергеевич, доктор технических наук, профессор, первый заместитель генерального директора, Национальный исследовательский центр «Институт имени Н. Е. Жуковского», Москва, Россия, shapkinvs@nrczh.ru

Authors information

Barsuk Vladimir E., Candidate of Sciences (Engineering), Director, Chaplygin Siberian Scientific Research Institute of Aviation, Novosibirsk, Russia, sibnia@sibnia.ru

Glasov Vladislav V., Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Director of the “Intelligent Avionics” project complex, National Research Center “Zhukovsky Institute”, Moscow, Russia, glasovvv@nrczh.ru

Zybin Evgenii Yu., Doctor of Sciences (Engineering), Head of Division, State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, Russia, zybin@gosniias.ru

Kosyanchuk Vladislav V., Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Deputy General Director, State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, Russia, vvk@gosniias.ru

Platoshin Georgy A., Candidate of Sciences (Engineering), Deputy Head of the Division for Scientific Work, State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, Russia, pga@gosniias.ru

Smirnov Dmitry N., Candidate of Sciences (Engineering), Deputy Director for Scientific Work, Chaplygin Siberian Scientific Research Institute of Aviation, Novosibirsk, Russia, smirnovd@sibnia.ru

Shapkin Vasily S., Doctor of Sciences (Engineering), Professor, First Deputy Director General, National Research Center “Zhukovsky Institute”, Moscow, Russia, shapkinvs@nrczh.ru

Статья поступила в редакцию 22.05.2025; одобрена после рецензирования 28.08.2025; принята к публикации 05.09.2025.

The article was submitted 22.05.2025; approved after reviewing 28.08.2025; accepted for publication 05.09.2025.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-61476 от 24 апреля 2015 г.

Подписано в печать 24.09.2025

Печать офсетная
14,7 усл. печ. л.

Формат 60x84 1/8
Заказ № 25-114к

10,5 уч.-изд. л.
Тираж 120 экз.

Изготовлено и оформлено: ООО «Типография Миттель Пресс»

e-mail: mittelpress@mail.ru

Автор вёрстки: Михеева А. В.