

**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 (№ 361)

№ 50

**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. Абдужабаров, 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
--

№ 50

2025

СОДЕРЖАНИЕ

Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники

- Ерохин В. В., Лежанкин Б. В., Шалаев А. А., Болелов Э. А., Козлов А. И.** Траекторная фильтрация в задаче слежения за радионавигационными параметрами приёмника спутниковой навигации на основе адаптивных методов обработки информации 9
- Сергеев А. В., Спрысков В. Б., Кузнецов С. В.** Предельные вероятностные смеси навигационных ошибок при описании фактических координат воздушных судов в прикладных задачах аэронавигации 20
- Смирнов А. В., Степанов В. Н.** Сравнительный анализ штампованного и поверхностно упрочнённого элементов конструкции планера самолёта 29
- Гусейнов Г., Машошин О. Ф.** Экспериментальная апробация алгоритма обработки диагностических параметров авиационных двигателей на основе многослойных нейронных сетей 39
- Масленникова Г. Е., Дмитриева С. В., Тажетдинов Р. Р.** Разработка рекомендаций по улучшению основных лётных характеристик самолётов Ан-24 и Ан-26 52
- Шувалова Е. В., Кузнецов С. В., Спрысков В. Б.** Оценка риска катастроф воздушных судов при применении российских правил продольного эшелонирования, основанных на времени 62
- Шувалова Е. В., Кузнецов С. В., Козлов Д. К., Калинин А. С., Спрысков В. Б.** Безопасность полётов воздушных судов с известными навигационными спецификациями без использования информации наблюдения 73

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

- Громов М. С., Евдокимов Ю. И., Дроздова О. Е., [Арепьев А. Н.]** О выборе схемы регионального самолёта с учётом эксплуатации на грунтовых аэродромах 82

Фридлянд А. А., Меланин В. А., Горбунов В. П. Проблемы и направления развития инфраструктурного обеспечения авиаперевозок населения в отдалённых и труднодоступных районах Российской Федерации к 2030 году	89
Лесничий И. В., Самойлов И. А., Самойлов В. И., Страдомский О. Ю. Мониторинг результатов достижения стратегических целей развития отечественного рынка авиаперевозок и парка воздушных судов	98
Фридлянд А. А., Чубуков А. П., Горбунов В. П. Прогнозирование производственных показателей аэропортов	108

Интеллектуальные транспортные системы

Миронова Л. В., Волков А. К. Кластеризация рентгеновских изображений багажа и ручной клади пассажиров с применением предварительно обученных нейронных сетей	120
Огунвоул Б. И. Адаптивные алгоритмы построения карт Пуанкаре для анализа нелинейной динамики полёта воздушных судов в турбулентной атмосфере	129

SCIENTIFIC BULLETIN OF THE STATE SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE OF CIVIL AVIATION

No. 50

2025

CONTENTS

Navigation and operation of aircraft

Erokhin V. V., Lezhankin B. V., Shalaev A. A., Bolelov E. A., Kozlov A. I. Trajectory filtering in the problem of tracking radio navigation parameters of a satellite navigation receiver based on adaptive information processing methods	9
Sergeev A. V., Spryskov V. B., Kuznetsov S. V. Limiting probabilistic mixtures of navigation errors for describing actual aircraft coordinates in applied aeronavigation tasks	20
Smirnov A. V., Stepanov V. N. Comparative analysis of stamped and surface-hardened aircraft airframe structure elements	29
Huseynov H., Mashoshin O. F. Experimental validation of the algorithm for processing diagnostic parameters of aviation engines on the basis of multilayer neural networks.....	39
Maslennikova G. E., Dmitrieva S. V., Tazhetdinov R. R. Development of recommendations for improvement of main flight characteristics of An-24 and An-26 aircraft	52
Shuvalova E. V., Kuznetsov S. V., Spryskov V. B. Risk assessment of aircraft catastrophes when applying Russian time-based longitudinal separation rules	62
Shuvalova E. V., Kuznetsov S. V., Kozlov D. K., Kalintsev A. S., Spryskov V. B. Aircraft flight safety with known navigation specifications without using surveillance data	73

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

Gromov M. S., Evdokimov Yu. I., Drozdova O.E., Arepyev A. N. On the choice of a regional aircraft layout, taking into account operation at unpaved airfields	82
Fridlyand A. A., Melanin V. A., Gorbunov V. P. Problems and directions of development of infrastructural support for air transportation of the population in remote and hard-to-reach areas of the Russian Federation by 2030	89

Lesnichiy I. V., Samoylov I. A., Samoylov V. I., Stradomskiy O. Yu. Monitoring of the achievement results of strategic goals for the development of the russian air transportation market and aircraft fleet ...	98
---	----

Fridlyand A. A., Chubukov A. P., Gorbunov V. P. Forecasting of airport production indicators	108
---	-----

Intelligent transport systems

Mironova L. V., Volkov A. K. Clustering of X-ray images of passengers' luggage and hand luggage using pre-trained neural networks	120
--	-----

Ogunvoul B. I. Adaptive algorithms for mapping Poincaré sections to analyse nonlinear aircraft flight dynamics in turbulent atmosphere	129
---	-----

Научная статья

УДК 621.396.933:629.783

ТРАЕКТОРНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ В ЗАДАЧЕ СЛЕЖЕНИЯ ЗА РАДИОНАВИГАЦИОННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ПРИЁМНИКА СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ НА ОСНОВЕ АДАПТИВНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

В. В. ЕРОХИН¹, Б. В. ЛЕЖАНКИН¹, А. А. ШАЛАЕВ¹, Э. А. БОЛЕЛОВ², А. И. КОЗЛОВ³

¹ Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации, Иркутск, Россия

² Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия

³ Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. Современные глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), обеспечивая беспрецедентно высокую точность навигационно-временных определений (НВО) подвержены влиянию шумов и помех. Характеристики приёмников спутниковой навигации зависят от эффективности системы слежения за радионавигационными параметрами (РНП) сигнала. В системах слежения за РНП широкое применение находят алгоритмы на основе расширенного фильтра Калмана (РФК), недостатком которого является расходимость при малых отношениях сигнал/шум (ОСШ). Для устранения указанного недостатка предлагается использовать адаптивный РФК (АРФК). Проанализированы особенности применения методов оптимальной нелинейной фильтрации к решению задачи оценки РНП. Приведены результаты синтеза алгоритма слежения за задержкой сигнала на основе методов Калмановской теории фильтрации. Предложен алгоритм оценивания РНП приёмника спутниковой навигации на основе АРФК, особенность которого в том, что в нём взвешенная сумма выходных значений обновляющего процесса используется для оценки ковариации шума текущего времени, что позволяет повысить точность оценки. Представлены результаты оценки точностных характеристик синтезированного алгоритма путём имитационного моделирования. Сравнительный анализ характеристик предложенного алгоритма и традиционного показал эффективность функционирования алгоритма на основе АРФК при низких значениях ОСШ. Реализация АРФК позволит повысить эффективность слежения за РНП приёмника спутниковой навигации, что улучшит навигационно-временные определения всех потребителей ГНСС.

Ключевые слова: воздушное судно, адаптивный фильтр Калмана, радионавигационные параметры, система слежения, приёмник спутниковой навигации, траекторная фильтрация, эксплуатация авиационной техники, интеллектуальные транспортные системы

Для цитирования: Ерохин В. В., Лежанкин Б. В., Шалаев А. А., Болелов Э. А., Козлов А. И. Траекторная фильтрация в задаче слежения за радионавигационными параметрами приёмника спутниковой навигации на основе адаптивных методов обработки информации // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 50. С. 9–19.

TRAJECTORY FILTERING IN THE PROBLEM OF TRACKING RADIO NAVIGATION PARAMETERS OF A SATELLITE NAVIGATION RECEIVER BASED ON ADAPTIVE INFORMATION PROCESSING METHODS

V. V. EROKHIN¹, B. V. LEZHANKIN¹, A. A. SHALAEV¹, E. A. BOLELOV², A. I. KOZLOV³

¹ Irkutsk Branch of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, Irkutsk, Russia² Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia³ The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract. Modern global navigation satellite systems (GNSS), providing unprecedentedly high accuracy of navigation and timing determinations, have a significant drawback – strong susceptibility to noise and interference. Characteristics of satellite navigation receivers depend on the efficiency of the tracking system for radio navigation parameters (RNP) of the signal. In RNP tracking systems, extended Kalman filter (EKF) algorithms are widely used, the drawback of which is divergence at small signal-to-noise ratios (SNR). To eliminate this drawback, it is proposed to use an adaptive EKF (AEKF). The features of applying optimal nonlinear filtering methods to solving the problem of RNP estimation are analyzed. The results of synthesis of an algorithm for tracking a signal delay based on the methods of Kalman filtering theory are presented. An algorithm for estimating the RNP of a satellite navigation receiver based on AEKF is proposed, the difference of which is that a weighted sum of the output values of the updating process is used to estimate the covariance of the current time noise, which allows increasing the accuracy of the estimate. The results of the study of the accuracy characteristics of the synthesized algorithm obtained by simulation modeling are presented. A comparative analysis of the characteristics of the proposed algorithm with the traditional one showed the efficiency of the algorithm based on the AEKF at low SNR values. The implementation of the AEKF will increase the efficiency of tracking the RNP of the satellite navigation receiver, which will improve the navigation and time determination of all GNSS consumers.

Keywords: aircraft, adaptive Kalman filter, radio navigation parameters, tracking system, satellite navigation receiver, trajectory filtering, aircraft operation, intelligent transport systems

For citation: Erokhin V. V., Lezhankin B. V., Shalaev A. A., Bolelov E. A., Kozlov A. I. Trajectory filtering in the problem of tracking radio navigation parameters of a satellite navigation receiver based on adaptive information processing methods. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2025, no. 50, pp. 9–19. (In Russ.)

Введение

Приёмники сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS/GALILEO/BEIDOU широко применяются в различных сферах хозяйственной деятельности. Обеспечивая беспрецедентно высокую точность НВО, ГНСС обладают существенным недостатком – сильной подверженностью влиянию шумов и помех. Обусловлено это в первую очередь тем, что ГНСС-приёмники работают при низком уровне полезного радиосигнала, принимаемого от навигационных спутников (НС), мощность которого составляет $\sim 10^{-16}$ Вт [1].

Характеристики ГНСС-приёмника зависят от качества работы системы слежения за РНП сигнала. Для слежения за частотой и задержкой сигнала в большинстве случаев используют алгоритмы в виде РФК [2]. В случае пропадания сигнала происходит срыв слежения, неконтролируемый рост ошибок оценки РНП, в результате чего при появлении сигнала РФК уже не способен вернуться в режим слежения. Данное обстоятельство приводит к необходимости обнаружения факта пропажи сигнала, перехода в режим поиска, возврата на слежение. Разнообразные режимы работы и переключения между ними обычно реализуется без должного теоретического обоснования. Именно переходы между режимами, как правило, являются основными источниками трудностей при приёме сигналов в сложных условиях.

В типовом ГНСС-приёмнике одним из условий достижения потенциальных характеристик является замена традиционных алгоритмов квазиоптимальной фильтрации сигнала на новые методы, подходящие для фильтрации перспективных сигналов, существенно повышающих качество НВО. Применение оптимальных алгоритмов позволит получить большую помехоустойчивость

навигационной аппаратуры потребителей (НАП) [3]. В качестве одной из альтернатив предлагается алгоритм оптимальной траекторной фильтрации [4].

Исследование возможностей повышения помехоустойчивости приёмников спутниковой навигации в процессе слежения за РНП является актуальной научно-прикладной задачей.

Недостатком РФК является неудовлетворительная работа при низких ОСШ. ОСШ можно повысить различными способами, такими как увеличение мощности полезного сигнала, снижение уровня шума, фильтрация нежелательного шума или применение методов исправления ошибок. Авторами настоящей статьи для повышения эффективности функционирования алгоритма оценки РНП в ГНСС-приёмнике предлагается использовать АРФК.

Цель работы – синтез алгоритма оптимальной траекторной фильтрации РНП ГНСС-приёмников на основе АРФК и анализ работы алгоритма при малом ОСШ.

Постановка задачи

Первым этапом работы ГНСС-приёмников является поиск навигационных сигналов. В зависимости от наличия априорных сведений пространство неопределённости поиска может иметь до трёх измерений [5]: номер спутника (номер литеры или номер псевдослучайной последовательности (ПСП) в зависимости от типа разделения) N_c ; значение доплеровского смещения частоты Δf_d ; значение задержки сигнала τ .

В работе [5] рассматривается поиск по третьему измерению – задержке сигнала τ . Из общей теории оптимального приёма известен алгоритм оценки времени прихода радиосигнала со случайной фазой:

$$\hat{\tau} = \max_{\tau}^{-1} \left\{ \int_0^{\tau} \xi(t) S(t-\tau) dt \right\}, \quad (1)$$

справедливый для приёма сигнала любой формы на фоне белого шума. В (1) предполагается поиск по непрерывному пространству задержки τ . На вход системы обработки сигнала поступают наблюдения вида [1, 6]:

$$\xi_{k,i} = S(t_{k,i}, G_{HC}, x_k) + n_{k,i} = A G_{DK}(t_{k,i} - \tau_k) G_{HC}(t_{k,i} - \tau_k) \cos(\omega_k t_{k,i} + \varphi_k) + n_{k,i}, \quad (2)$$

где $S(t_{k,i}, G_{HC}, x_k)$ – полезный сигнал; τ_k , ω_k , φ_k – задержка, частота и фаза сигнала в момент времени $t_{k,i} = kT + iT_d$; A – амплитуда сигнала; $G_{DK}(t)$ – функция модуляции дальномерным кодом (ДК); $G_{HC}(t)$ – функция модуляции навигационным сообщением (НС); $i \in [0, M-1]$, $M = T/T_d$ – количество отсчётов на интервале дискретизации; T_d – длительность интервала дискретизации; T – время накопления сигнала в корреляторах приёмника; n_i – дискретный белый гауссовский шум (ДБГШ) с дисперсией $\sigma_n^2 = N_0/(2T_d)$; N_0 – односторонняя спектральная плотность шума.

Полагая амплитуду заданной и принимая фазу сигнала за случайный неинформативный параметр, равномерно распределённый на интервале $[0; 2\pi]$, оставшиеся неизвестные параметры – псевдодальность и частоту – можно представить нелинейной моделью вида [6]:

$$\left. \begin{aligned} \tau_k &= (1-\alpha)\tau_{k-1} + K\omega_{k-1} + n_{\tau,k}, \\ \omega_k &= (1-\alpha)\omega_{k-1} + n_{\omega,k}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где α – параметр коррелированности процесса; K – коэффициент, связывающий доплеровское смещение частоты и скорость; $n_{\tau,k}$ и $n_{\omega,k}$ – формирующие ДБГШ с дисперсиями D_{τ} и D_{ω} .

Вектор состояния, включающий информативные параметры сигнала, подлежащие оценке, имеет вид $\mathbf{x}_k = [\tau_k \omega_k]^T$. Для оценки частоты и задержки сигнала требуется синтезировать алгоритм функционирования системы слежения, который позволяет сформировать оптимальную

оценку вектора состояния $\mathbf{x}_k$ в дискретные отсчёты времени t_k , $k=1, 2, \dots, M-1$ при динамике изменения оцениваемых параметров (3) путем обработки принятой реализации (2).

Материалы и методы

Известно строгое решение задачи оценки марковского процесса (3), входящего в виде параметра в наблюдаемый процесс (2). Точные алгоритмы обработки сигналов [7], следующие из теории оптимальной фильтрации (ОФ), представляют собой решение уравнения Стратоновича, которое описывает эволюцию апостериорной плотности вероятности (АПВ), а не непосредственную оценку значения параметра [8]. Размерность плотности вероятности совпадает с размерностью вектора состояния $\mathbf{x}_k$. Основные уравнения алгоритмов ОФ [7] в дискретном времени для вектора состояния $\mathbf{x}_k$ имеют вид:

$$\begin{aligned} p(\mathbf{x}_k | \xi_0^k) &= c p(\mathbf{x}_k | \xi_0^{k-1}) p(\xi_k | \mathbf{x}_k) \text{ (учёт наблюдения),} \\ p(\mathbf{x}_k | \xi_0^{k-1}) &= \int p(\mathbf{x}_{k-1} | \xi_0^{k-1}) p(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1}) d\mathbf{x}_{k-1} \text{ (этап прогноза),} \end{aligned}$$

где ξ_0^{k-1} – совокупность наблюдений на интервале $[0; t_{k-1}]$; $p(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1})$ – переходная плотность вероятности, определяемая моделью процесса (3); $p(\xi_k | \mathbf{x}_k)$ – функция правдоподобия, вид которой зависит от уравнения наблюдения (2); c – нормировочная константа.

Главные сложности реализации алгоритма ОФ связаны с этапом прогноза, так как на каждом шаге нужно вычислить огромное количество многомерных интегралов. Если использовать классический метод сеток, видно, что вычислительная сложность квадратично растёт от размерности $\mathbf{x}_k$. В основе успеха новых алгоритмов ОФ помимо роста вычислительных мощностей лежит разумное интегрирование [3].

Для получения точного результата необходимо решать уравнение относительно многомерной плотности вероятности, что сложно в реализации. Поэтому на практике применяется упрощённое решение данного уравнения в гауссовском приближении АПВ. Гауссовская плотность вероятности полностью определяется двумя параметрами – математическим ожиданием и дисперсионной матрицей, что позволяет получить упрощённый алгоритм относительно двух параметров на основе РФК, который даёт хорошие результаты при большом ОСШ. Однако при малом ОСШ гауссовская аппроксимация не позволяет описать возникающие нелинейные эффекты, в результате чего характеристики алгоритма существенно ухудшаются. С этим связано понятие «срыва слежения», отсутствующее при решении исходного уравнения Стратоновича [6].

В качестве альтернативы полным уравнениям оптимальной нелинейной фильтрации в [4] предложен метод оптимальной траекторной фильтрации. Вместо АПВ вектора состояния в текущий момент формируется АПВ траектории вектора состояния с начала наблюдений до текущего момента. После ряда преобразований [6] получаются упрощённые уравнения фильтрации:

$$\Phi(\mathbf{x}_k | \xi_0^{k-1}) = \max_{\mathbf{x}_{k-1}} p(\mathbf{x}_k | \mathbf{x}_{k-1}) \Phi(\mathbf{x}_{k-1} | \xi_0^{k-1}), \quad (4)$$

$$\Phi(\mathbf{x}_k | \xi_0^k) = c p(\xi_k | \mathbf{x}_k) \Phi(\mathbf{x}_k | \xi_0^{k-1}), \quad (5)$$

где $\Phi(\mathbf{x}_k | \xi_0^k) = \max_{\mathbf{x}_0^{k-1}} p(\mathbf{x}_0^0 | \xi_0^k)$ – максимум апостериорной плотности вероятности траектории вектора $\mathbf{x}_0^k$ на интервале $[0; t_k]$ для заданного $\mathbf{x}_k$.

Алгоритм слежения за радионавигационными параметрами

Для наблюдаемого процесса (2) и уравнений динамики вектора состояния (3) в работе [6] предложен алгоритм оценки на основе уравнений (4)–(5). Наиболее существенным является

вопрос практической реализуемости предложенного алгоритма. При приёме аддитивной смеси навигационного сигнала и ДБГШ в теории оптимальной оценки параметров сигнал на выходе дискриминатора системы слежения определяется соотношением [1, 2]:

$$u_{Д, k}(\tilde{\mathbf{x}}_k) = \left(\frac{\partial \ln f(\xi_{k-1}^k | \mathbf{x}_k)}{\partial \mathbf{x}_k} \right)^T \Big|_{\mathbf{x}_k = \tilde{\mathbf{x}}},$$

где ξ_{k-1}^k – интервал реализации наблюдения (2) на отрезке времени $[t_{k-1}; t_k]$, $f(\xi_{k-1}^k | \mathbf{x}_k)$ – функция наблюдаемого интервала реализации ξ_{k-1}^k и оцениваемого параметра сигнала $\mathbf{x}_k$; $\tilde{\mathbf{x}}_k$ – экстраполированная оценка вектора состояния.

Если все параметры сигнала известны, кроме оцениваемых, то $f(\xi_{k-1}^k | \mathbf{x}_k)$ является функцией правдоподобия наблюдаемого интервала реализации ξ_{k-1}^k [7, 8]:

$$p(\xi_0^{M-1} | \mathbf{x}_k) = c \exp \left\{ \frac{1}{\sigma_n^2} \sum_{i=0}^{M-1} \xi(t_{k-1, i}, \mathbf{x}_k) S(t_{k-1, i}) \right\}.$$

В [6] показано, что в системе слежения за задержкой (ССЗ) задержку сигнала на длительности интервала накопления допустимо аппроксимировать моделью вида $\tau_{k-1, i} = \tau_{k-1}$, в которой значение задержки изменяется в моменты времени $t_{k, 0}$. Данная модель описывается в виде элемента Марковского процесса [1, 6]:

$$\mathbf{x}_k = F \mathbf{x}_{k-1} + G \mathbf{n}_{x, k-1}, \quad (6)$$

где $\mathbf{n}_{x, k-1}$ – вектор формирующих ДБГШ с корреляционной матрицей $D_{n, k}$;

$$F = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad G = \begin{bmatrix} 0 \\ T \end{bmatrix}.$$

Для оценки параметра τ_{k-1} в работе синтезирован алгоритм, оптимальный по критерию минимума среднеквадратического отклонения ошибки оценки.

При реализации в ГНСС-приёмнике ССЗ эквивалентное наблюдение можно представить в виде:

$$\xi_k = \tau_k + n_{\xi, k},$$

где $n_{\xi, k}$ – ДБГШ с дисперсией D_{ξ} .

Выражение, демонстрирующее зависимость дисперсии ошибки оценки времени задержки от ОСШ $Q_{s/n}$, имеет вид [2]:

$$D_{\tau} = \frac{\Delta f_{CC3} \tau_s^2}{2 Q_{s/n}} \left(1 + \frac{2}{Q_{s/n}} \right),$$

где Δf_{CC3} – полоса пропускания ССЗ; $\tau_s = 1/511$ мс – длительность элементарного символа дальномерного кода.

Как показано в [6], для синтеза алгоритма ССЗ необходимо выполнить линеаризацию дискриминатора времени задержки:

$$U_{Д, k} = s_{Д} (\tau_k - \tilde{\tau}_k) + \eta_{\tau, k},$$

где $s_{Д} = 4 Q_{s/n} T / \Delta_{\tau}$ – крутизна дискриминационной характеристики ССЗ; Δ_{τ} – сдвиг между опережающей и запаздывающей опорными ПСП; $\tau_k - \tilde{\tau}_k = \varepsilon_{\tau, k}$ – ошибка слежения за задержкой; $\eta_{\tau, k}$ – ДБГШ с дисперсией $D_{\eta} = (4 Q_{s/n} T)^{-1}$.

Эквивалентные наблюдения, получаемые для ошибки слежения за задержкой, можно представить в виде:

$$\tilde{\xi}_{\tau,k} = \varepsilon_{\tau,k} + \tilde{\eta}_{\tau,k},$$

где $\tilde{\eta}_{\tau,k}$ – ДБГШ дискриминатора с дисперсией

$$D_{\tilde{\eta}} = \frac{\Delta_{\tau}^2}{4Q_{s/n}T} \left(1 + \frac{2}{Q_{s/n}T} \right). \quad (7)$$

Для повышения эффективности функционирования ССЗ в [6] предлагается для оценки времени задержки учитывать выходные данные схемы фазовой автоподстройки скорости изменения времени задержки сигнала:

$$\tilde{\xi}_{\omega,k} = \varepsilon_{\omega,k} + \tilde{\eta}_{\omega,k},$$

где $\tilde{\eta}_{\omega,k}$ – ДБГШ с дисперсией $D_{\tilde{\eta}_{\omega}}$.

Для синтеза алгоритма в векторно-матричной форме целесообразно объединить наблюдения в вектор:

$$\xi_{CC3,k} = \begin{bmatrix} \tilde{\xi}_{\tau,k} \\ \tilde{\xi}_{\omega,k} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Тогда матрицу шумов наблюдений можно представить в виде:

$$D_{CC3} = \begin{bmatrix} D_{\tilde{\eta}_{\tau}} & 0 \\ 0 & D_{\tilde{\eta}_{\omega}} \end{bmatrix}.$$

Алгоритм оптимальной фильтрации применительно к уравнениям наблюдения (8) и динамики оцениваемого процесса (6) имеет вид:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}_k &= \tilde{\mathbf{x}}_k + L_{x,k}(\xi_{CC3,k} - H\tilde{\mathbf{x}}_k); \\ \tilde{\mathbf{x}}_k &= F\hat{\mathbf{x}}_{k-1}; \\ L_{x,k} &= D_{x,k}H^TD_{CC3}^{-1}; \end{aligned} \quad (9)$$

$$D_{x,k}^{-1} = (FD_{x,k-1}F^T + G\sigma_x^2G^T)^{-1} + HD_{CC3}^{-1}H^T. \quad (10)$$

В данном алгоритме матрица H характеризует связь наблюдений ξ_{CC3} и вектора состояния $\mathbf{x}_k$:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Анализ выражений алгоритма фильтра ССЗ показывает, что в выражении для дисперсии приведённого шума дискриминатора (7) присутствует ОСШ, значение которого принимается постоянной величиной. В реальных условиях эксплуатации приёмников спутниковой навигации наблюдаются значительные изменения ОСШ. Вариации ОСШ приводят к расхождению процесса фильтрации и срыву слежения. Поэтому актуальной задачей является разработка алгоритма, адаптивного к изменению ОСШ.

Алгоритм на основе адаптивного расширенного фильтра Калмана

Для устранения эффекта расхождении и срыва слежения авторами применён усовершенствованный алгоритм оценки РНП на основе АРФК. Отличие данного алгоритма от стандартного

заключается в том, что в нём взвешенная сумма выходных значений обновляющего процесса используется для определения ковариационной матрицы шумов наблюдений в текущий момент времени [9]. Полученная таким путём ковариация шума обновляется во времени с помощью обратной связи, что позволяет повысить точность оценки РНП [10]. В соответствии с предлагаемым подходом уравнение для нахождения оптимальной оценки вектора состояния имеет вид:

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \tilde{\mathbf{x}}_k + L_{x,k} (\xi_{CC3,k} - \tilde{\xi}_{CC3,k}).$$

Оценка апостериорной дисперсии выполняется по формуле:

$$D_{x,A,k} = \tilde{D}_{x,A,k} - L_{x,A,k} D_{\xi,A,k} L_{x,A,k}^T.$$

Матричный коэффициент усиления фильтра рассчитывается следующим образом:

$$L_{x,A,k} = D_{\xi,A,k} D_{\xi,A,k}^{-1} = \sum_{j=0}^{2v} \left((\mathbf{x}_{k,j} - \tilde{\mathbf{x}}_{\tau,k}) (\xi_{CC3,k,j} - \tilde{\xi}_{CC3,k})^T \right) \sum_{j=0}^{2v} \left((\xi_{CC3,k,j} - \tilde{\xi}_{CC3,k}) (\xi_{CC3,k,j} - \tilde{\xi}_{CC3,k})^T \right)^{-1},$$

где v – количество точек выборки.

В реальных условиях дисперсии шумов наблюдений и измерений изменяются во времени, поэтому, чтобы обновить ковариацию шума в реальном времени, используется обновляющий процесс:

$$\boldsymbol{\mu}_k = \xi_{CC3,k,j} - \tilde{\xi}_{CC3,k},$$

тогда

$$R_{A,k} = \boldsymbol{\mu}_k \boldsymbol{\mu}_k^T,$$

$$D_{CC3,A,k} = \left(R_{A,k} + \sum_{j=0}^{2v} \left((\xi_{CC3,k,j} - \tilde{\xi}_{CC3,k}) (\xi_{CC3,k,j} - \tilde{\xi}_{CC3,k})^T \right) \right) / 2; \quad (11)$$

$$D_{x,A,k} = L_{A,k} R_{A,k} L_{A,k}^T, \quad (12)$$

где $\boldsymbol{\mu}_k$ и $\xi_{CC3,k,j}$ являются обновляющими выходными данными измерения при формировании оценки вектора состояния.

С помощью (11), (12) шум процесса и шум измерения могут обновляться в реальном времени, после подстановки в (9), (10) устанавливается адаптивный алгоритм фильтра Калмана без расходимости процесса фильтрации.

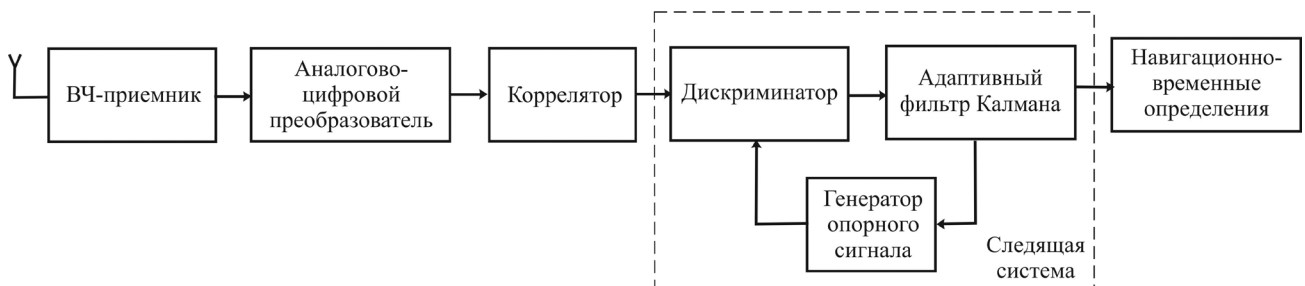


Рис. 1. Структурная схема ГНСС-приёмника

На рис. 1 приведена структурная схема ГНСС-приёмника с системой слежения за радионавигационными параметрами на основе АФК.

Специфика применения цифровой техники в алгоритме функционирования АРФК заключается в использовании специализированных навигационных ГНСС-вычислителей, которые предназначены для решения общих и специальных навигационных задач в сложных видах деятельности. ГНСС-вычислители обладают высокой скоростью вычислений, точностью, возможностями реализации сложных алгоритмов в реальном времени. Такие характеристики дают возможность реализовать большое количество вычислительных и логических операций при выполнении адаптации РФК, в частности, при расчёте взвешенной суммы выходных значений обновляющего процесса для оценки ковариации шума в текущем времени, что позволяет повысить точность определения радионавигационных параметров.

Результаты моделирования и исследования

Для исследования качества функционирования синтезированного алгоритма его эффективность и точность проверены и сравнены с традиционным алгоритмом оценки фильтра Калмана. Так как моделирование производится на компьютере, то в качестве базовых математических моделей непрерывных процессов в радиочастотном блоке ГНСС-приёмника используются дискретные отсчёты сигналов.

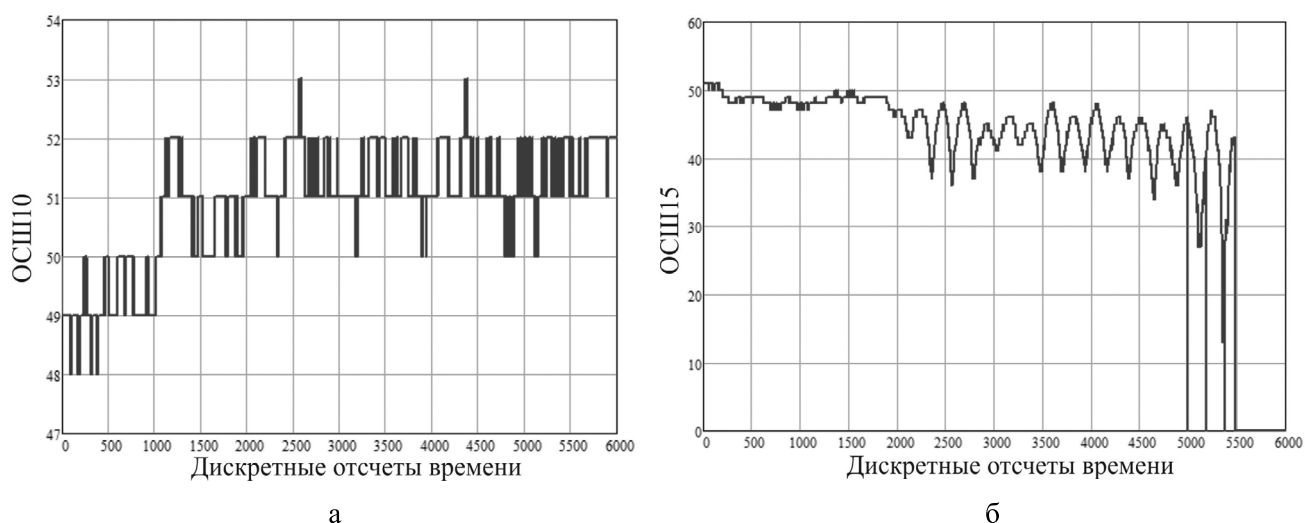


Рис. 2. ОСШ для сигнала 10 НС ГЛОНАСС – а, для сигнала 15 НС ГЛОНАСС – б

На рис. 2, а и рис. 2, б представлены графики динамики значений ОСШ для 10 и 15 навигационных спутников (НС) ГЛОНАСС соответственно.

Анализ графиков показывает, что разным НС ГНСС свойственна отличающаяся динамика изменения ОСШ, что целесообразно учитывать в алгоритме траекторной фильтрации РНП, в противном случае наблюдается процесс расходимости, как показано на рис. 3, а и рис. 3, б.

На графиках видно, что при несоответствии расчётных значений ОСШ, принятых при синтезе алгоритма функционирования системы слежения, фактическим, наблюдается расходимость процесса фильтрации и как следствие – срыв слежения за РНП.

Для устранения эффекта расходимости для фильтрации РНП авторами настоящей статьи использован АРФК, результаты исследования характеристик которого показаны на рис. 4, а и рис. 4, б.

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что применение АРФК позволит повысить стабильность траекторной фильтрации в системе слежения за РНП приёмника спутниковой навигации.

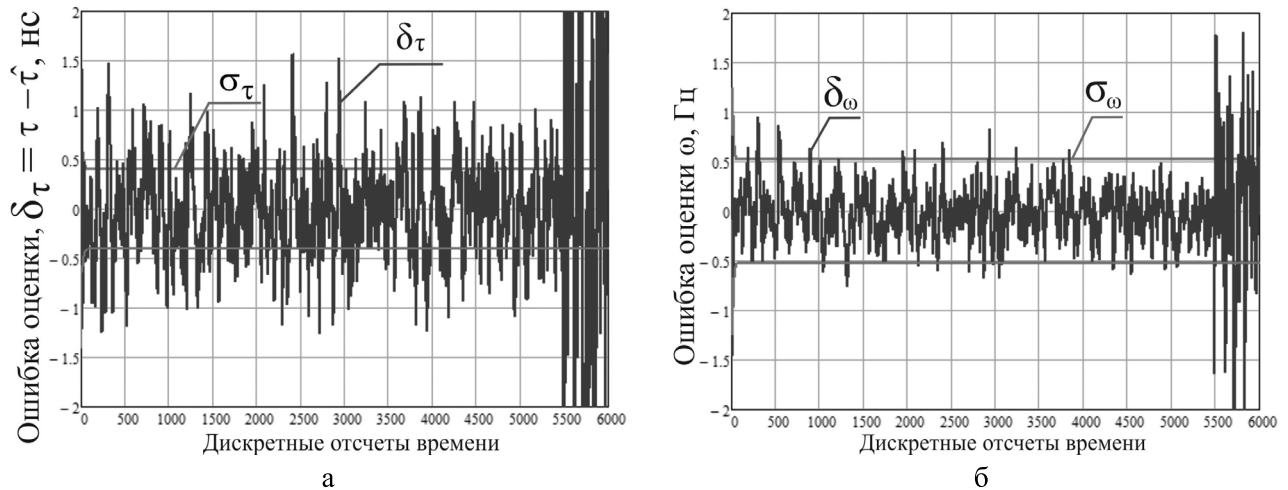


Рис. 3. Ошибка оценки времени задержки – а, и ошибка оценки частоты – б, полученные на выходе традиционного ФК

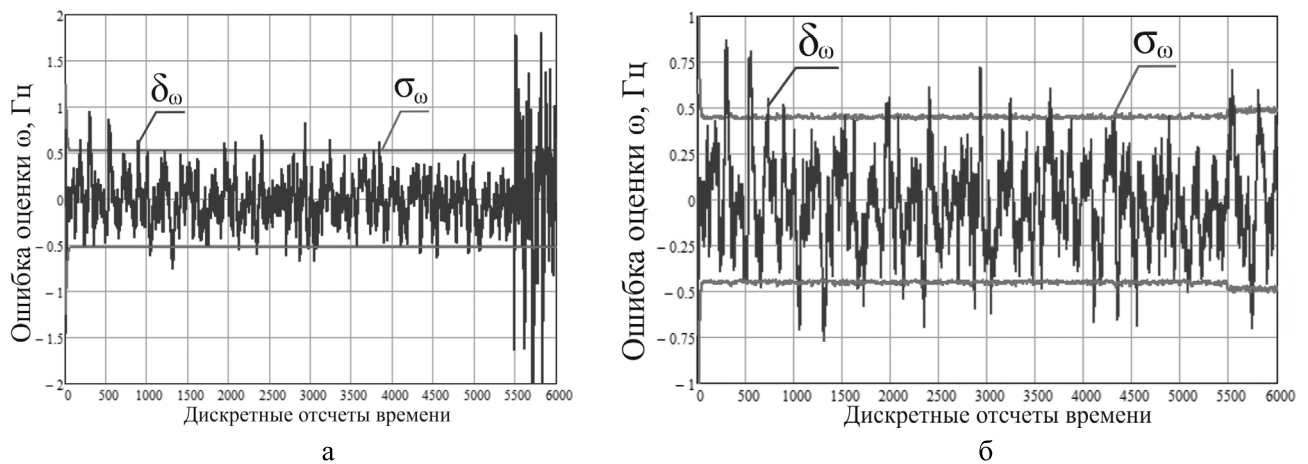


Рис. 4. Ошибка оценки времени задержки – а, и ошибка оценки частоты – б, полученные на выходе адаптивного РФК

Заключение

Изложены результаты синтеза алгоритма оптимальной траекторной фильтрации РНП ГНСС-приёмника на основе АРФК. Отличие предлагаемого алгоритма от традиционного заключается в том, что в нём взвешенная сумма выходных значений обновляющего процесса используется для оценки ковариации шума измерений текущего времени. Полученная таким путём ковариация шума обновляется во времени с помощью обратной связи, что позволяет повысить точность оценки РНП. С использованием методов статистического моделирования проведено исследование характеристик синтезированного алгоритма и сравнение с традиционным алгоритмом оценки фильтра Калмана. Анализ процесса фильтрации и точностных характеристик предложенного алгоритма показал эффективность его функционирования при низких ОСШ. Реализация алгоритма на основе АРФК позволит повысить точность слежения за радионавигационными параметрами приёмника спутниковой навигации, что обеспечит повышение эффективности навигационно-временных определений всех потребителей ГНСС.

Полученные результаты предполагается внедрить в интеллектуальных транспортных системах в системах слежения за радионавигационными параметрами приёмников спутниковой навигации.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников

1. Перов А. И. Синтез оптимального алгоритма обработки сигналов в приёмнике спутниковой навигации при воздействии гармонической помехи // Радиотехника. 2005. № 7. С. 70–76.
2. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. 4-е изд., перераб. и доп. Москва: Радиотехника, 2010. 800 с.
3. Ефименко В. С., Ворончихин Д. Н., Карутин А. Н. Оптимальная фильтрация на основе метода Монте-Карло // Радионавигационные технологии. Выпуск 3. 2013. С. 25–28.
4. Харисов В. Н., Перьков А. Е., Аникин А. Л. Оптимальная оценка траекторий марковских процессов // Радиотехника. 2003. № 7. С. 35–49.
5. Харисов В. Н., Головин П. М. Алгоритм оценки задержки ВОС-сигнала на этапе обнаружения // Радиотехника. 2012. № 10. С. 9–14.
6. Болденков Е. Н. Оптимальная траекторная фильтрация в задаче восстановления слежения // Радиотехника. 2013. № 3. С. 21–24.
7. Тихонов В. И., Харисов В. Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. Москва: Радио и связь, 1991. 608 с.
8. Перов А. И. Статистическая теория радиотехнических систем. Москва: Радиотехника, 2003. 400 с.
9. Li B., Bei S. Estimation algorithm research for lithium battery SOC in electric vehicles based on adaptive unscented Kalman filter. *Neural Comput & Applic*, vol. 31, 8171–8183 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3901-7>
10. Ерохин В. В., Лежанкин Б. В., Болелов Э. А., Урбанский Д. Ю. Оценка параметров многопозиционной системы наблюдения на основе адаптивного фильтра Калмана // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2024. № 46. С. 9–19.

References

1. Perov A. I. Synthesis of an optimal signal processing algorithm in a satellite navigation receiver under the influence of harmonic interference. *Radio Engineering*, 2005, no. 7, pp. 70–76. (In Russ.)
2. *GLONASS. Principles of construction and operation*. Ed. A. I. Perov, V. N. Kharisov, 4th ed., revised and enlarged. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010, 800 p. (In Russ.)
3. Efimenko V. S., Voronchikhin D. N., Karutin A. N. Optimal filtering based on the Monte-Carlo method. *Radio Navigation Technologies*, Issue 3, 2013, pp. 25–28. (In Russ.)
4. Kharisov V. N., Perkov A. E., Anikin A. L. Optimal estimation of Markov process trajectories. *Radio Engineering*, 2003, no. 7, pp. 35–49. (In Russ.)
5. Kharisov V. N., Golovin P. M. An algorithm for estimating the delay of an optical signal at the detection stage. *Radio Engineering*, 2012, no. 10, pp. 9–14. (In Russ.)
6. Boldenkov E. N. Optimal trajectory filtering in the task of tracking recovery. *Radio Engineering*, 2013, no. 3, pp. 21–24. (In Russ.)
7. Tikhonov V. I., Kharisov V. N. *Statistical analysis and synthesis of radio engineering devices and systems*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1991, 608 p. (In Russ.)
8. Perov A. I. *Statistical theory of radio engineering systems*, Moscow, Radiotekhnika Publ., 2003, 400 p. (In Russ.)
9. Li B., Bei S. Estimation algorithm research for lithium battery SOC in electric vehicles based on adaptive unscented Kalman filter. *Neural Comput & Applic*, vol. 31, 8171–8183 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00521-018-3901-7>

10. Erokhin V. V., Lezhankin B. V., Bolelov E. A., Urbansky D. Y. Estimation of the parameters of a multi-position surveillance system based on an adaptive Kalman filter. *Scientific Bulletin of the State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2024, no. 46, pp. 9–19. (In Russ.)

Информация об авторах

Ерохин Вячеслав Владимирович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры, Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации, Иркутск, Россия, ww_erohin@mail.ru

Лежанкин Борис Валентинович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации, Иркутск, Россия, lezhbor@mail.ru

Шалаев Алексей Александрович, преподаватель, Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации, Иркутск, Россия, alexsnow9999@gmail.com

Болелов Эдуард Анатольевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия, e.bolelov@mstuca.aero

Козлов Анатолий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, главный специалист, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, vilandes@yandex.ru

Authors information

Erokhin Vyacheslav V., Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Professor of Department, Irkutsk Branch of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, Irkutsk, Russia, ww_erohin@mail.ru

Lezhankin Boris V., Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Head of the Department, Irkutsk Branch of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, Irkutsk, Russia, lezhbor@mail.ru

Shalaev Alexey A., Teacher, Irkutsk Branch of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, Irkutsk, Russia, alexsnow9999@gmail.com

Bolelov Eduard A., Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Head of the Department, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia, e.bolelov@mstuca.aero

Kozlov Anatoly I., Doctor of Sciences (Physical and Mathematical), Professor, Chief Specialist, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, vilandes@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 20.02.2025; одобрена после рецензирования 16.06.2025; принята к публикации 23.06.2025.

The article was submitted 20.02.2025; approved after review 16.06.2025; accepted for publication 23.06.2025.

Научная статья
УДК 656.7.052

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ВЕРОЯТНОСТНЫЕ СМЕСИ НАВИГАЦИОННЫХ ОШИБОК ПРИ ОПИСАНИИ ФАКТИЧЕСКИХ КООРДИНАТ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧАХ АЭРОНАВИГАЦИИ

А. В. СЕРГЕЕВ, В. Б. СПРЫСКОВ, С. В. КУЗНЕЦОВ

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. При решении задач обслуживания воздушного движения и воздушной навигации широко используют смешанные случайные величины. Смешивание широко стало применяться во времена Второй Мировой войны в задачах наблюдения, а в 60-е годы 20-го столетия – в задачах аэронавигации. На ранних этапах использования смешивания плотностей вероятностей для получения лучшего математического описания фактических данных обычно смешивали две плотности, а весовые коэффициенты определяли по критерию согласия теоретической плотности и статистической гистограммы. В рамках настоящей статьи рассмотрены так называемые предельные вероятностные смеси, когда в роли весов при смешивании непрерывных случайных величин используют плотность вероятности некоторого параметра исходных плотностей. Одна из предельных смесей, рассмотренных в статье, неизвестна аэронавигационной науке, а описание сразу двух предельных смесей в одной научной статье публикуется впервые в мире.

Ключевые слова: аэронавигация, воздушное судно, обслуживание воздушного движения, навигация, навигационные ошибки, продольное эшелонирование, процедурное эшелонирование, риск катастроф

Для цитирования: 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.

LIMITING PROBABILISTIC MIXTURES OF NAVIGATION ERRORS FOR DESCRIBING ACTUAL AIRCRAFT COORDINATES IN APPLIED AERONAVIGATION TASKS

A. V. SERGEEV, V. B. SPRYSKOV, S. V. KUZNETSOV

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

Abstract. In solving air traffic control and air navigation problems, mixed random variables are widely used. Mixing began to be extensively applied during World War II in surveillance tasks, and in the 1960s, it was used in aeronavigation problems. In the early stages, two probabilistic objects were typically mixed. This article examines so-called limiting probabilistic mixtures, where the probability density of a certain parameter of the original densities is used as the weighting factor in mixing continuous random variables. One of the limiting mixtures discussed in the article is previously unknown in aeronavigation science, while the description of two limiting mixtures in a single scientific paper is being published for the first time in the world.

Keywords: aeronavigation, aircraft, air traffic service, navigation, Navigation errors, longitudinal separation, procedural separation, collision risk

For citation: 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.)

Введение

При решении задач по тематике научной специальности Высшей аттестационной Комиссии Российской Федерации 2.9.6 «Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники» широко применяются разделы математики, которые оперируют смешанными случайными величинами. Так, мировое признание [1, 2] и повсеместное использование получило описание ошибок определения координат цели радиолокатором в виде «засорённого» нормального закона. Несмотря на то, что плотность этого распределения трёхпараметрическая, его настройка для определения фактических координат ВС осуществляется посредством оценки одного параметра – нецентрированного среднеквадратического отклонения [3].

Смешанные распределения широко используются в Российской Федерации с начала 80-х годов 20-го века. Так, в известном издании [4] глава 5 названа: «Непрерывные и смешанные случайные величины».

В настоящей статье представлено описание двух предельных смесей, полученных на основе использования разных параметров исходной плотности вероятности.

Плотность вероятности предельной смеси нормальных (гауссовских) случайных величин, у которых параметр дисперсии является непрерывной случайной экспоненциальной величиной

Пусть в некотором воздушном пространстве существует линия заданного пути (ЛЗП), соединяющая точки А и В. Пусть воздушное судно (ВС) выполняет полёт из точки А в точку В по ЛЗП. Известно [5], что ВС объективно выполняет полёт с навигационными отклонениями от ЛЗП, имеющими гауссовские плотности вероятности с нулевыми математическими ожиданиями и конечной дисперсией:

$$f(x; 0, \sigma^2) = \frac{1}{\sigma^2 \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где x – аргумент (независимая переменная); σ^2 – дисперсия навигационных отклонений ВС от ЛЗП.

Пусть из точки А в точку В при заданной ЛЗП выполняет полёты неограниченное счётное число ВС, для каждого из которых параметр навигационных отклонений σ^2 будет разным.

Рассмотрим случай, когда параметр гауссовской плотности σ^2 является случайной величиной с экспоненциальной плотностью вероятности

$$h(\sigma^2) = \frac{1}{2\lambda^2} e^{-\frac{\sigma^2}{2\lambda^2}}, \quad 0 < \sigma^2 < \infty, \quad 0 < \lambda < \infty, \quad (2)$$

где λ – параметр, описывающий плотность вероятности случайной переменной σ^2 .

Тогда предельная вероятность смеси гауссовских плотностей (1) при условии, что плотность вероятности случайной величины σ^2 задано формулой (2), будет равна:

$$p(x; 0, \lambda) = \int_0^\infty f(x; 0, \sigma^2) h(\sigma^2) d\sigma^2 = \frac{1}{2\lambda^2 \sqrt{2\pi}} \int_0^\infty \frac{1}{\sigma} \exp\left\{-\left(\frac{x^2}{2\sigma^2} + \frac{\sigma^2}{2\lambda^2}\right)\right\} d\sigma^2 = \frac{1}{2\lambda} e^{\frac{|x|}{\lambda}}. \quad (3)$$

Вывод формулы (3) был опубликован в 1979 году [6], и с тех пор при решении специальных задач аэронавигации, например, выбора минимального безопасного эшелонирования для

разных ЛЗП, используют плотности не гауссовских навигационных ошибок, а двусторонние экспоненциальные (DE) плотности

$$p(x; 0, \lambda) = \frac{1}{2\lambda} e^{-\frac{|x|}{\lambda}}. \quad (4)$$

Параметр λ является единственным параметром плотности (3). Область определения λ точно такая же, как область определения σ^2 . Рассмотрим вопрос о том, какую сущность описывает λ при описании навигационных отклонений ВС от ЛЗП в (2).

Как уже было указано, плотность (2) является плотностью вероятности одностороннего экспоненциального распределения положительной ограниченной случайной величины σ^2 . В отечественной терминологии такое распределение принято называть показательным (см., например, [4]).

Перепишем (2) в привычной нам форме показательной плотности, введя замену переменных:

$$\mu = \frac{1}{2\lambda^2}; \quad \sigma^2 = q.$$

Тогда получим $h(q) = \mu e^{-\mu q}$, $0 < q < \infty$, $0 < \mu < \infty$. Для показательной плотности математическое ожидание M , среднее квадратическое отклонение и дисперсия хорошо известны [7], в частности $M[q] = \mu^{-1} = 2\lambda^2$. Таким образом, математическое ожидание гауссовских навигационных отклонений σ^2 равно $2\lambda^2$ и параметр λ является параметром средней дисперсии гауссовских навигационных отклонений. Теперь рассмотрим плотность предельной вероятностной смеси гауссовских навигационных плотностей по параметру σ^2 (3). Найдём дисперсию $D[x]$ плотности (4). Очевидно, $D[x] = 2\lambda^2$. Итак, параметр λ и в (2), и в (3) является параметром дисперсии навигационных отклонений. Причём дисперсия отклонений, описанных предельной вероятностной смесью (3), строго равна параметру математического ожидания весовой функции (2) изменения дисперсий навигационных отклонений.

Плотность вероятности предельной смеси нормальных (гауссовских) или двусторонних экспоненциальных навигационных случайных отклонений, у которых параметр математического ожидания является непрерывной случайной величиной с равномерной плотностью распределения

В предыдущем разделе была описана предельная смесь гауссовских плотностей, описывающих навигационные отклонения ВС от ЛЗП при условии, что дисперсии отклонений сами являются непрерывной случайной величиной с показательной или односторонней экспоненциальной плотностью вероятности. Было показано, что если получена оценка дисперсии навигационных отклонений потока ВС, следующего из точки А в точку В, от ЛЗП, то плотность вероятности смеси гауссовских плотностей имеет форму двустороннего экспоненциального распределения с плотностью (4), у которой параметр $2\lambda^2$ равен оценённой средней дисперсии навигационных отклонений потока ВС. Существуют задачи формализации навигационных отклонений, когда рассматривается полёт отдельного ВС, например, в зоне пилотирования при выполнении испытательных полётов. В этом случае отсутствуют условия применения вероятностной смеси плотностей по параметру «дисперсия» и фактические положения ВС описываются гауссовской плотностью вероятности.

Кроме выполнения экспериментальных полётов в зоне пилотирования существуют другие условия полётов ВС, при которых следует рассматривать вероятностную смесь навигационных плотностей с изменяющимся математическим ожиданием, например, полёты по заданному маршруту с боковым смещением. Полёты в зоне пилотирования или по установленному маршруту, но с произвольным боковым смещением $\pm R_y$, объединяет то, что математическое ожидание

плотности навигационных отклонений является непрерывной случайной величиной с заданной областью определения (в связи с этим в формулах ниже будем использовать индекс «zone»). В этом случае для описания фактических положений ВС необходимо оперировать предельными вероятностными смесями навигационных плотностей по параметру математического ожидания.

Решим эту задачу по отношению к двум типам навигационных отклонений от ЛЗП: гауссовскому G и DE при равномерной плотности математических ожиданий x в диапазоне $\pm R_y$:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{2R_y}, & -R_y \leq x \leq R_y; \\ 0, & x \notin [-R_y, R_y]. \end{cases}$$

Так же как и в случае смешивания по параметру «дисперсия», предельная смесь по параметру математического ожидания будет равна

$$f_y^{zone}(y; x) = \int_{-R_y}^{+R_y} \frac{1}{2R_y} f_y(y; x) dx, \quad (5)$$

где:

$$f_y(y; x) = f_y^G(y; x) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(y-x)^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (6)$$

для гауссовской G плотности распределения, или

$$f_y(y; x) = f_y^{DE}(y; x) = \frac{1}{2\lambda_y} \exp\left(-\frac{y-x}{\lambda_y}\right) \quad (7)$$

для DE плотности распределения, σ_y^2 – дисперсия навигационных отклонений при описании их плотностью вероятности Гаусса. Дисперсия навигационных отклонений при описании их DE плотностью вероятности $2\lambda_y^2 = \sigma_y^2$.

Если использовать плотность (7), то предельная вероятностная смесь выражается в элементарных функциях следующим образом.

Для представления интеграла (5) в элементарных функциях надо разделить области определения переменных y и x на такие подобласти, в которых показатель экспоненты в (7) $(y-x)$ не меняет знака. Анализ показал, что для общей области $\left\{ \begin{matrix} -\infty < y < \infty \\ -R_y \leq x \leq R_y \end{matrix} \right\}$ достаточно рассмотреть следующие подобласти:

$$\begin{aligned} &(-\infty < y < -R_y) \& (-R_y \leq x \leq R_y); \quad (-R_y \leq y \leq 0) \& (0 \leq x \leq R_y); \quad (-R_y \leq y \leq 0) \& (-R_y \leq x \leq y); \\ &(-R_y \leq y \leq 0) \& (y \leq x \leq 0); \quad (0 \leq y \leq R_y) \& (-R_y \leq x \leq 0); \quad (0 \leq y \leq R_y) \& (0 \leq x \leq y); \\ &(0 \leq y \leq R_y) \& (y \leq x \leq R_y); \quad (R_y \leq y \leq \infty) \& (-R_y \leq x \leq R_y). \end{aligned}$$

Интегрирование модели (5) в перечисленных восьми областях даёт восемь плотностей, а их правильная группировка даст искомую плотность $f_{zone}^{DE}(y)$.

Для формализации отрицательных «хвостов» переменной y проинтегрируем выражение (5) в подобласти $(-\infty < y < -R_y) \& (-R_y \leq x \leq R_y)$:

$$\begin{aligned} f_{zone}^{DE}(y) &= \int_{-R_y}^{R_y} \frac{1}{2R_y} \frac{1}{2\lambda_y} \exp\left(-\frac{y-x}{\lambda_y}\right) dx = \\ &= \frac{\exp(R_y/\lambda_y) - \exp(-R_y/\lambda_y)}{4R_y} \exp\left(\frac{y}{\lambda_y}\right), \quad -\infty < y \leq -R_y. \end{aligned} \quad (8)$$

В центральной части отрицательных значений y плотность $f_{zone}^{DE}(y)$ равна сумме трёх плотностей, полученных при интегрировании (5) по областям $(-R_y \leq y \leq 0) \& (0 \leq x \leq R_y)$, $(-R_y \leq y \leq 0) \& (-R_y \leq x \leq y)$ и $(-R_y \leq y \leq 0) \& (y \leq x \leq 0)$:

$$\begin{aligned} f_{zone}^{DE}(y) &= \int_0^{R_y} \frac{1}{2R_y} \frac{1}{2\lambda_y} \exp\left(\frac{y-x}{\lambda_y}\right) dx + \int_{-R_y}^y \frac{1}{2R_y} \frac{1}{2\lambda_y} \exp\left(-\frac{y-x}{\lambda_y}\right) dx + \int_y^0 \frac{1}{2R_y} \frac{1}{2\lambda_y} \exp\left(\frac{y-x}{\lambda_y}\right) dx = \\ &= \frac{1}{2R_y} - \frac{\exp(R_y/\lambda_y)}{4R_y} \left(\exp\left(-\frac{y}{\lambda_y}\right) + \exp\left(\frac{y}{\lambda_y}\right) \right), \quad -R_y < y \leq 0. \end{aligned} \quad (9)$$

В центральной части положительных значений y плотность $f_{zone}^{DE}(y)$ равна сумме трёх плотностей, полученных из (5) по областям $(0 \leq y \leq R_y) \& (-R_y \leq x \leq 0)$, $(0 \leq y \leq R_y) \& (0 \leq x \leq y)$ и $(0 \leq y \leq R_y) \& (y \leq x \leq R_y)$:

$$\begin{aligned} f_{zone}^{DE}(y) &= \int_{-R_y}^0 \frac{1}{2R_y} \frac{1}{2\lambda_y} \exp\left(-\frac{y-x}{\lambda_y}\right) dx + \int_0^y \frac{1}{2R_y} \frac{1}{2\lambda_y} \exp\left(-\frac{y-x}{\lambda_y}\right) dx + \int_y^{R_y} \frac{1}{2R_y} \frac{1}{2\lambda_y} \exp\left(\frac{y-x}{\lambda_y}\right) dx = \\ &= \frac{1}{2R_y} - \frac{\exp(-R_y/\lambda_y)}{4R_y} \left(\exp\left(\frac{y}{\lambda_y}\right) + \exp\left(-\frac{y}{\lambda_y}\right) \right), \quad 0 < y \leq R_y. \end{aligned} \quad (10)$$

Для описания положительных «хвостов» переменной y плотности $f_{zone}^{DE}(y)$ проинтегрируем (5) по области $(R_y \leq y \leq \infty) \& (-R_y \leq x \leq R_y)$. Получим:

$$\begin{aligned} f_{zone}^{DE}(y) &= \int_{-R_y}^{R_y} \frac{1}{2R_y} \frac{1}{2\lambda_y} \exp\left(-\frac{y-x}{\lambda_y}\right) dx = \\ &= \frac{\exp(R_y/\lambda_y) - \exp(-R_y/\lambda_y)}{4R_y} \exp\left(-\frac{y}{\lambda_y}\right), \quad R_y < y \leq \infty. \end{aligned} \quad (11)$$

Группируя результаты (8), (9), (10) и (11) по областям их определения, запишем составную полную плотность $f_{zone}^{DE}(y)$ в виде:

$$f_{zone}^{DE}(y) = \begin{cases} \frac{1}{4R_y} \left[\exp\left(\frac{R_y}{\lambda_y}\right) - \exp\left(-\frac{R_y}{\lambda_y}\right) \right] \exp\left(\frac{y}{\lambda_y}\right), & -\infty < y \leq -R_y; \\ \frac{1}{2R_y} - \frac{\exp(R_y/\lambda_y)}{4R_y} \left(\exp\left(-\frac{y}{\lambda_y}\right) + \exp\left(\frac{y}{\lambda_y}\right) \right), & -R_y < y \leq 0; \\ \frac{1}{2R_y} - \frac{\exp(-R_y/\lambda_y)}{4R_y} \left(\exp\left(\frac{y}{\lambda_y}\right) + \exp\left(-\frac{y}{\lambda_y}\right) \right), & 0 < y \leq R_y; \\ \frac{1}{4R_y} \left[\exp\left(\frac{R_y}{\lambda_y}\right) - \exp\left(-\frac{R_y}{\lambda_y}\right) \right] \exp\left(-\frac{y}{\lambda_y}\right), & R_y < y \leq \infty. \end{cases} \quad (12)$$

Можно показать, что $\int_{-\infty}^{\infty} f_{zone}^{DE}(y) dy = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$.

Ещё одним шагом верификации полученного результата (12) является сравнение графиков аналитических $f_{zone}^{DE}(y)$ и симуляционных $f_{zone_sim}^{DE}(y)$ плотностей вероятности [8] для одних и тех же параметров R_y и λ_y . На рис. 1 показаны соответствующие плотности.

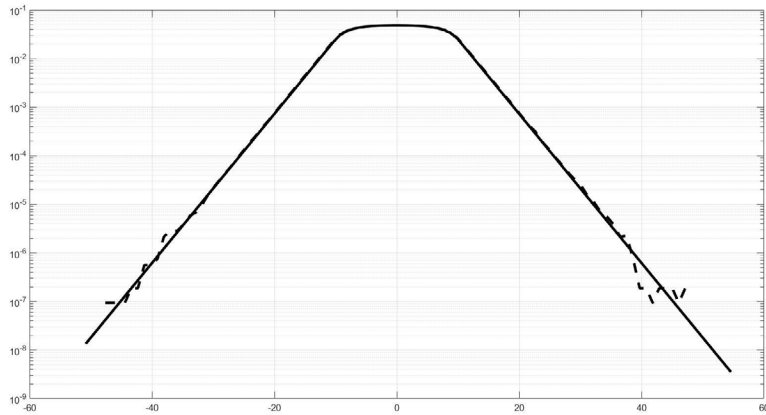


Рис. 1. Симуляционная (штриховая линия) и аналитическая плотности вероятностей фактических положений ВС при полётах в зоне пилотирования с характерным габаритом $\pm R_y$ при DE отклонениях от ЛЗП: $\sigma_y = 4$ км, $\lambda_y = \sigma_y / \sqrt{2}$, $R_y = 10$ км

Использование плотности (6) в выражении (5) позволяет получить плотность предельной смеси гауссовских навигационных отклонений в зоне полётов по параметру математического ожидания в виде:

$$f_{zone}^G(y) = \int_{-R_y}^{R_y} \frac{1}{2R_y} \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(y-x)^2}{2\sigma_y^2}\right) dx. \quad (13)$$

Формула (13) для любой точки y ($-\infty < y < \infty$) однозначно определяет значение плотности $f_{zone}^G(y)$.

Однако записать плотность (13) в элементарных функциях невозможно в связи с тем, что определённый интеграл с конечными пределами от функции $\exp(-t^2/2)$ не выражается в элементарных функциях [7].

Таким образом $f_{zone}^G(y)$ в форме (13) является аналитической формой искомой плотности положений ВС при полётах в зоне пилотирования при нормальных отклонениях от линии намеченного пути, а современные математические оболочки типа Matlab, Matcard и другие позволяют надёжно получать значения $f_{zone}^G(y)$ для заданных параметров σ_y , R_y .

На рис. 2 представлены симуляционная и аналитическая плотности $f_{zone}^G(y)$ для тех же значений параметров σ_y , R_y , что и на рис. 1.

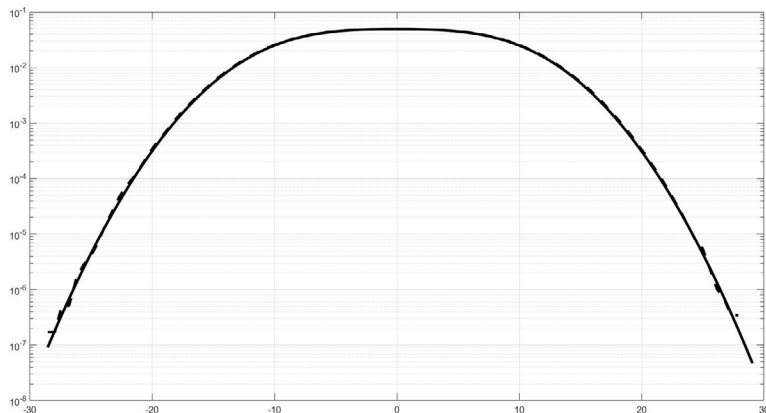


Рис. 2. Симуляционная (штриховая линия) и аналитическая плотности вероятностей фактических положений ВС при полётах в зоне пилотирования с характерным габаритом $\pm R_y$ при нормальных (гауссовских) отклонениях от ЛЗП: $\sigma_y = 4$ км, $R_y = 10$ км

Сравнительный анализ аналитических плотностей $f_{zone}^{DE}(y)$ и $f_{zone}^G(y)$ положений ВС при полётах в зоне пилотирования при DE и G отклонениях ВС от ЛЗП в зоне

На рис. 3 представлены графики аналитических плотностей $f_{zone}^{DE}(y)$ (12) и $f_{zone}^G(y)$ (13) для одних и тех же параметров $\lambda_y(\sigma_y)$ и R_y .

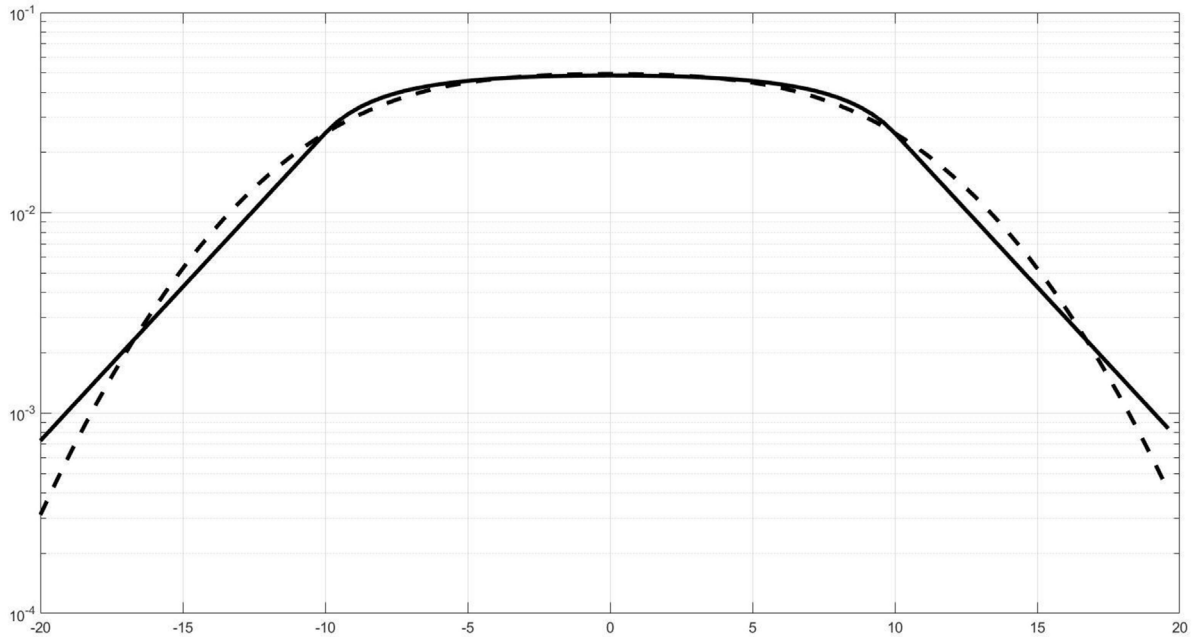


Рис. 3. Графики $f_{zone}^{DE}(y)$ (11) (сплошная линия) и $f_{zone}^G(y)$ (12) (штриховая линия) для $\sigma_y=4$ км, $\lambda_y=\sigma_y/\sqrt{2}$, $R_y=10$ км

Функции $f_{zone}^{DE}(y, R_y, \sigma_y)$ и $f_{zone}^G(y, R_y, \sigma_y)$ являются функциями трёх аргументов: y , R_y , σ_y . Полное аналитическое сравнение значений функций при $-\infty < y < \infty$, $0 < R_y < \infty$, $0 < \sigma_y < \infty$ не входит в предметную область аэронавигации. Однако можно констатировать, что при $R_y/\sigma_y > 1,681$:

$$f_{zone}^G(0) \cong f_{zone}^{DE}(0) \cong \frac{1}{2R_y} \text{ и } f_{zone}^G(0) > f_{zone}^{DE}(0);$$

$$f_{zone}^G(|R_y|) \cong f_{zone}^{DE}(|R_y|) \cong \frac{1}{4R_y} \text{ и } f_{zone}^G(|R_y|) < f_{zone}^{DE}(|R_y|);$$

$$\text{при } (-x_1 R_y \leq y \leq x_1 R_y) \quad f_{zone}^G(y) > f_{zone}^{DE}(y);$$

$$\text{при } y \in (|x_1, R_y|) \quad f_{zone}^G(y) < f_{zone}^{DE}(y);$$

$$\text{при } y \in (|R_y, x_2|) \quad f_{zone}^G(|y|) > f_{zone}^{DE}(|y|);$$

$$\text{при } y \in (|x_2|, \infty) \quad f_{zone}^G(|y|) < f_{zone}^{DE}(|y|).$$

При $R_y/\sigma_y \leq 1,681$:

$$\text{при } y \in (-R_y, R_y) \quad f_{zone}^G(y) < f_{zone}^{DE}(y);$$

$$\text{при } y = \pm R_y \quad f_{zone}^{DE}(\pm R_y) \cong \frac{1}{4R_y};$$

$$\text{при } y \in (|R_y|, x_2) \quad f_{zone}^G(|y|) > f_{zone}^{DE}(|y|);$$

$$\text{при } y \in (|x_2|, \infty) \quad f_{zone}^G(|y|) < f_{zone}^{DE}(|y|).$$

Заключение

Получены аналитические плотности вероятностей фактических положений воздушного судна, в том числе беспилотного воздушного судна, при плановом полёте в зоне пилотирования шириной $2R_y$ для двусторонних экспоненциальных (DE) и гауссовских отклонений от намеченной траектории полёта ВС в зоне пилотирования.

Аналитические записи плотностей вероятностей фактических положений ВС $f_{zone}^{DE}(y)$ и $f_{zone}^G(y)$ представляют собой предельные вероятностные смеси плотностей $f_{DE}(y; MO_y)$ и $f_G(y; MO_y)$ по параметру MO_y , который равномерно распределён в диапазоне $[-R_y, +R_y]$.

Смеси $f_{zone}^{DE}(y)$ и $f_{zone}^G(y)$ описывают фактическое положение ВС как внутри зоны в диапазоне $y \in [-R_y, +R_y]$, так и за её пределами при $y \in (-\infty; -R_y]$ и $y \in [+R_y; +\infty)$.

В статье представлены сравнения графиков аналитических предельных плотностей и их симуляционных аналогов, полученных в более ранних исследованиях авторов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников

1. Safety, Performance and Interoperability Requirements Document for the ADS-B Radar-Controller Airspace (RAD) Application, DO-318. RTCA, February, 2009.
2. ИКАО Cir 326 AN/188. Оценка наблюдения с использованием систем ADS-B и мультилатерации в целях обеспечения обслуживания воздушного движения и рекомендации по их внедрению. ИКАО, 2012. 46 с.
3. EUROCONTROL Specification for ATM Surveillance System Performance. Vol. 1, 2, edition 1.2, 20.04.2021.
4. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Прикладные задачи теории вероятностей. Москва: Радио и связь, 1983. 441 с.
5. ИКАО Doc 9613 AN/937. Руководство по навигации, основанной на характеристиках (PBN). Изд. 5. ИКАО, 2023. 468 с.
6. 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. 62–67.
7. Пугачёв В. С. Теория вероятностей и математическая статистика. Москва: Наука, 1979. 490 с.

References

1. Safety, Performance and Interoperability Requirements Document for the ADS-B Radar-Controller Airspace (RAD) Application, DO-318. RTCA, February, 2009.
2. ICAO Cir 326 AN/188. Assessment of ADS-B and Multilateration Surveillance to Support Air Traffic Services and Guidelines for Implementation. ICAO, 2012, 42 p.
3. EUROCONTROL Specification for ATM Surveillance System Performance. Vol. 1, 2, edition 1.2, 20.04.2021.
4. Venttsel' E. S., Ovcharov L. A. *Applied problems of probability theory*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1983, 441 p. (In Russ.)
5. ICAO Doc 9613 AN/937. Performance-based Navigation (PBN) Manual. Fifth Ed. ICAO, 2023, 398 p.
6. 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. 62–67.
7. Pugachyov V. S. *Probability theory and mathematical statistics*. Moscow, Nauka Publ., 1979, 490 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Сергеев Андрей Владимирович, директор НТК ОрВД, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, sergeev_av@gosniiga.ru

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

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

Authors information

Sergeev Andrey V., Head of STC ATM, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, sergeev_av@gosniiga.ru

Spryskov Vladimir B., Doctor of Sciences (Engineering), Chief Scientific Officer, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, Spryskov_VB@gosniiga.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 28.05.2025; одобрена после рецензирования 11.06.2025; принята к публикации 19.06.2025.

The article was submitted 28.05.2025; approved after reviewing 11.06.2025; accepted for publication 19.06.2025.

Научная статья

УДК 629.7.015.4: 629.7.021.2

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ШТАМПОВАННОГО И ПОВЕРХНОСТНО УПРОЧНЁННОГО ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ПЛАНЕРА САМОЛЁТА

А. В. СМЕРНОВ¹, В. Н. СТЕПАНОВ^{2,3}

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

² Ростовский завод гражданской авиации № 412, Ростов-на-Дону, Россия

³ Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия

Аннотация. В статье методами имитационного моделирования проведена оценка усталостных характеристик штампованного и фрезерованного, поверхностно упрочнённого изделия из алюминиевого материала на примере скулового фитинга самолёта Ан-24. Проведён анализ напряжённо-деформированного состояния скулового фитинга в условиях его «реального» нагружения от избыточного давления в фюзеляже. Исследовались фитинги, выполненные из материала АК-6 и из материала Д16Т с поверхностным упрочнением. Полученные значения коэффициентов запаса по усталостной прочности показывают, что для данного типа нагружения и применённых материалов возможно использовать поверхностно упрочнённые материалы наряду со штампованными.

Ключевые слова: штамповка, механическая обработка, качество поверхности, дробеструйная обработка, поверхностное упрочнение, напряжения упрочнения, напряжённо-деформируемое состояние, усталостная прочность

Для цитирования: Смирнов А. В., Степанов В. Н. Сравнительный анализ штампованного и поверхностно упрочнённого элементов конструкции планера самолёта // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 50. С. 29–38.

COMPARATIVE ANALYSIS OF STAMPED AND SURFACE-HARDENED AIRCRAFT AIRFRAME STRUCTURE ELEMENTS

A. V. SMIRNOV¹, V. N. STEPANOV^{2,3}

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

²Rostov Civil Aircraft Factory no. 412, Rostov-on-Don, Russia

³Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract. The article attempts to use simulation modeling methods to evaluate the fatigue characteristics of stamped and milled work-hardened aluminum material using the example of the chin fitting of the An-24 aircraft. An analysis of the stress-strain state of the chin fitting under the conditions of its “real” loading from excess pressure in the fuselage made of AK-6 material and D16T material with surface hardening is carried out. The obtained values of the fatigue strength safety factors allow, for this type of loading and the materials used, to use surface-hardened materials along with stamped ones.

Keywords: pressing, shot peening, patch, repair, stress-strain state, fatigue strength

For citation: Smirnov A. V., Stepanov V. N. Comparative analysis of stamped and surface-hardened aircraft airframe structure elements. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2025, no. 50, pp. 29-38. (In Russ.)

Введение

После распада Советского Союза вопрос ремонтной базы теперь уже иностранной авиатехники стал особенно актуален. Прекращение выпуска заводами-изготовителями самолётов привело к экономически невыгодному изготовлению деталей по крайне небольшим или единичным заказам, а для деталей штамповочного производства потребовалось ещё и хранение, и обслуживание оснастки. Изготовление деталей методом горячей штамповки нецелесообразно в виде мелкосерийного производства, которое прекращено много лет назад.

Штамповка – вид металлообработки, позволяющий значительно сократить количество материала и повысить прочность и ударную вязкость заготовки или детали. При формоизменении давлением в результате пластической деформации, состоящей из деформации и относительного перемещения зёрен металла, многокристалльная структура упрочняется, зёрна получают кристаллографическую направленность в направлении главных деформаций. Зёрна измельчаются и вытягиваются, структура материала становится волокнистой. При горячей штамповке происходит частичное или полное снятие упрочнения за счёт рекристаллизации.

Однако, как отмечается в работах по определению усталостной долговечности [1–4], определяющим параметром материала является качество и механические свойства поверхностного слоя. Поверхностные концентраторы напряжений можно разделить на конструктивные (отверстия, галтели, радиусные переходы), технологические (зависящие от чистоты механической обработки) и эксплуатационные (коррозия, сколы, царапины). Все эти поверхностные концентраторы напряжений могут служить источниками образования усталостных трещин. При низком качестве поверхностной обработки деталей предел выносливости испытываемых образцов из легированной стали уменьшается более чем на 50 % [2]. Коэффициент влияния качества обработки поверхности на сопротивление усталости для алюминиевых сплавов в зависимости от величины параметра шероховатости, а именно высоты неровностей профиля по десяти точкам Rz^1 в пределах 0,5–100 соответствует величинам коэффициента влияния качества поверхности $K_{F\sigma}$ на сопротивление усталости в пределах 1,00–0,75. Маркировка клеймлением снижает предел выносливости на 30 %, маркировка электрокарандашом снижает коэффициент $K_{F\sigma}$ до 0,8 [4]. Предел выносливости гладких обкатанных алюминиевых образцов в 2–4 раза выше, чем полированных. Поверхностное упрочнение наклёпом позволяет снизить эффект концентрации напряжений даже при уже имеющемся коррозионном повреждении. Эффективность наклёпа преобладает до средних значений напряжений, действующих в конструкции, вплоть до 0,7 предела текучести [5]. Наклёп и остаточные напряжения на поверхности детали в результате технологических процессов могут иметь значения и знак (растяжение или сжатие), зависящий от свойств материала и режимов технологической обработки, и могут усиливать или снижать величину действующих напряжений. Остаточные напряжения сжатия на поверхности детали повышают сопротивление усталости, а остаточные растягивающие напряжения существенно снижают предел выносливости. Увеличение степени разориентации фрагментов и блоков кристаллической решётки (поликристаллов) дополнительно повышает сопротивление деформации. При величинах деформаций бóльших предела пропорциональности происходит измельчение зёрен поликристалла, механическое сцепление зёрен, что способствует созданию остаточных напряжений между отдельными зёрнами. Для создания благоприятных напряжений на поверхности детали необходимо учитывать выбор режимов наклёпа и свойства поверхностного слоя

¹ ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения.

материала. Предел выносливости элементов конструкции крыла из материала Д16 после поверхностного упрочнения увеличивается с 112 до 144 МПа, т. е. на 28 % [6, 7]. Относительная глубина упрочнённого слоя алюминиевых сплавов составляет 0,2–0,8 мм, для стали 0,08–0,36 мм [5, 6, 8]. Следует отметить, что эффект поверхностного упрочнения при прокатке, штамповке, нагартовке полностью или почти полностью снижается (в зависимости от температуры рекристаллизации) при отпуске и закалке.

Метод поверхностного упрочнения металлов уходит далеко в прошлое, начиная с процессовковки холодного оружия. Методы поверхностного упрочнения можно подразделить на статические и ударные: обкатывание роликом, обкатывание шариком, ударный наклёп, наклёп дробью, центробежная обработка шариками. На машиностроительных предприятиях процессы поверхностного упрочнения валов и шестерён, рессор и пружин, балок прокатных станов и гибочных матриц и др. выполняют на промышленных установках [6, 9]. Для авиационных деталей, имеющих специфическую форму и размеры, до и после установки на агрегат наиболее предпочтителен вибронаклёп² и пневмодинамический наклёп³.

Основными материалами в конструкции фюзеляжа самолёта Ан-24 являются: Д16АТ – листы, Д16Т – профили, Д16АМ – гнутые и формованные элементы с последующей закалкой и старением, АК-6 – фитинги и кронштейны.

Механические характеристики поковок и штамповок из сплава АК-6 (система Al-Cu-Mg-Si) после закалки и старения: предел прочности в продольном направлении 380 МПа, предел прочности в поперечном направлении 365 МПа; предел текучести ($\sigma_{0,2}$) в продольном направлении 275 МПа, предел текучести ($\sigma_{0,2}$) в поперечном направлении 245 МПа; коэффициент вязкости в продольном направлении 39 МПа·м^{1/2}, коэффициент вязкости в поперечном направлении 31 МПа·м^{1/2}. Температурный интервал горячей деформации при производстве 420–470 °C⁴ [10–11].

Механические характеристики поковок и плит из сплава Д16 (система Al-Cu-Mg) после закалки и старения: предел прочности в продольном направлении 430–410 МПа; предел текучести ($\sigma_{0,2}$) в продольном направлении 315–345 МПа; коэффициент вязкости в продольном направлении 31–34 МПа·м^{1/2}. Температурный интервал горячей деформации при производстве 430–350 °C⁵ [10, 12].

В данной работе исследуется напряжённо-деформируемое состояние скулового фитинга в конструкции фюзеляжа без и с поверхностным упрочнением. Поверхностное упрочнение (наклёп) имитировано остаточными напряжениями в наружном слое материала.

Постановка задачи

Целью данной работы является оценка напряжённого состояния фитингов скуловой балки самолёта Ан-24 от избыточного давления наддува пассажирского салона при стандартных параметрах материала фитинга и при остаточных напряжениях на поверхности фитинга, имитирующих наклёп.

Скуловая балка самолёта Ан-24 является проблемной ресурсной зоной. Сопряжение верхнего радиуса фюзеляжа $R=1450$ мм и нижнего радиуса фюзеляжа $R=2290$ мм создают зону концентрации, где по нижней панели образуются трещины на обшивке и подкладной ленте, а по верхней панели трещины образуются по низинкам шпангоутов и скуловым фитингам.

² Инструкция № 949-69 «Поверхностное упрочнение деталей из алюминиевых сплавов». ВИАМ, 1969.

³ Технологическая инструкция по пневмодинамическому упрочнению деталей планера при ремонте изделий Ту-134, 134А. ВО «Авиаремонт», Завод № 407 ГА, 1981.

⁴ ОСТ 1 90073-85 Штамповки и поковки из алюминиевых сплавов. Технические условия.

⁵ ТУ1-92-161-90 Плиты авиационные из алюминиевых сплавов. Технические условия.

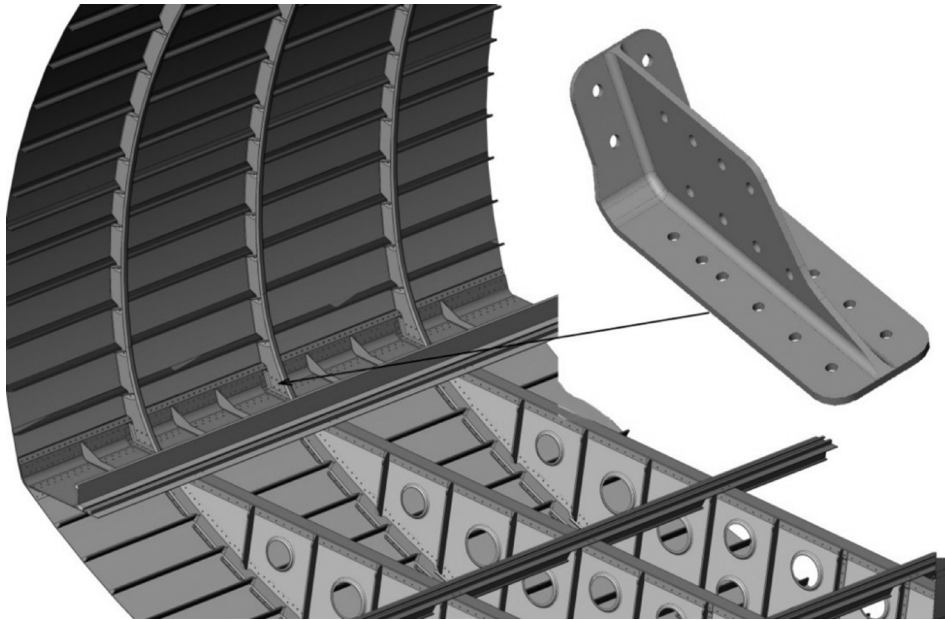


Рис. 1. Скуловая балка и скуловой фитинг

На самолёте Ан-26 эта проблема была решена разработчиком применением химфрезерованной утолщённой обшивки. Конструкция скуловой балки самолёта Ан-24 представлена на рис. 1.

Характерные дефекты скулового фитинга самолёта Ан-24 представлены на рис. 2 и рис. 3.



а

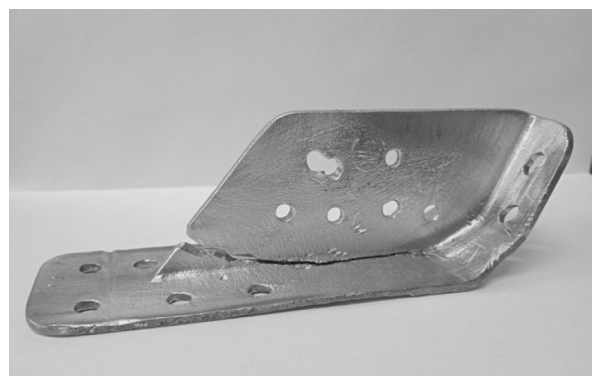


б

Рис. 2. Характерные дефекты скулового фитинга: трещина по основанию ребра (самолёт Ан-24РВ RA-47260) – а; трещина по радиусному переходу ребра (самолёт Ан-24РВ RA-46466) – б



а



б

Рис. 3. Характерные дефекты скулового фитинга: трещина по засверловке ребра (самолёт Ан-24РВ RA-4616) – а; трещина по забоине на ребре (самолёт Ан-24РВ RA-47359) – б

Если ремонт трещин нижней панели по обшивке и подкладному листу давно отработан, как и ремонт низинки шпангоута верхней панели, то ремонт скулового фитинга осуществляется исключительно заменой его на деталь первой категории, выполненную из штамповки АК-6. Оснастки для изготовления фитинга, как и самого предприятия, уже нет. Единственный способ получения фитингов для замены – изготовление из поковки или плиты. Если по механическим характеристикам материалы АК-6 и Д16 соответствуют друг другу, то вопрос усталостной долговечности остаётся нерешённым, и это касается не только скулового фитинга. Ввиду всё увеличивающейся наработки воздушных судов вопрос замены штампованных изделий из алюминиевых сплавов на поковки (плиты) обостряется.

Парк гражданских самолётов Ан-24 на 2022 год составляют 49 машин, имеющих наработку от 20000 до 73000 лётных часов [12].

Оценка коэффициентов запаса усталостной прочности для скулового фитинга 24-0320-117 проводилась в условиях нагружения цилиндрической части фюзеляжа от избыточного давления наддува в 30800 Па по двум вариантам:

- расчёт напряжённо-деформированного состояния для первого варианта с механическими характеристиками фитинга, заложенными в документации разработчика (АК-6 штамповка, закалка);

- расчёт напряжённо-деформированного состояния для второго варианта с механическими характеристиками фитинга Д16 (плита, закалка), с созданием предварительных напряжений на поверхности. Величина предварительных напряжений, имитирующих поверхностное упрочнение, на поверхности фитинга составляет 180 МПа [13, 14].

Выбор метода исследования

Для определения состояния скулового фитинга 24-0320-117 в конструкции фюзеляжа под напряжением от избыточного давления (наддув) использован метод конечно-элементного анализа. Интенсивность напряжений может быть представлена зависимостью:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)},$$

где σ_i – интенсивность напряжений; σ , τ – нормальные и касательные напряжения, соответственно, индексы указывают на: x , y , z – векторы главных напряжений; xy , xz , yz – плоскости касательных напряжений.

Интенсивность деформации может быть представлена зависимостью:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{2[(\varepsilon_\eta - \varepsilon_\iota)^2 + (\varepsilon_\iota - \varepsilon_\kappa)^2 + (\varepsilon_\kappa - \varepsilon_\eta)^2] + \frac{3}{2}(\gamma_{\eta\iota}^2 + \gamma_{\iota\kappa}^2 + \gamma_{\kappa\eta}^2)},$$

где ε_i – интенсивность деформации; ε – линейные деформации; γ – деформации сдвига, индексы указывают на: η , ι , κ – векторы главных деформаций; $\eta\iota$, $\iota\kappa$, $\kappa\eta$ – плоскости сдвига.

Основные уравнения деформационной теории пластичности совместно с граничными условиями нагружения и закрепления предоставляют инструмент оценки надёжности конструкции в упругопластической области работы материала.

Решение задачи

Моделирование провели со следующими параметрами, стандартными для Ан-24. Радиус скулы $R=25$ мм (пересечение верхней дуги $R=1450$ мм и нижней дуги $R=2290,5$ мм). Верхняя панель – Д16АТ лист 1,0 мм, нижняя панель – Д16АТ лист 1,2 мм, подкладной лист – Д16АТ лист 1,2 мм, скуловой гнутик – Д16АТ лист 2,5 мм, скуловой фитинг – АК-6 штамповка, толщина

в зоне прилегания к обшивке 2,5 мм, нижний обод шпангоута – Д16АТ лист 1,2 мм, верхний обод шпангоута – Д16АТ лист 1,2 мм. По конструкторской документации разработчика была создана цифровая модель регулярной «цилиндрической» неподжатой части фюзеляжа самолёта Ан-24 из трёх типовых шпангоутов, цифровая модель преобразована в конечно-элементную модель, основным элементом которой является четырёхузловой плоский элемент (CQUAD4). Расчётный фитинг выполнен четырёхузловыми тетра-элементами, заклёпки смоделированы балочным элементом (BEAM). Размер тетра-элемента фитинга в зоне отверстия 0,5 мм.

Выполнен статический расчёт скулочного фитинга и нелинейный расчёт скулочного фитинга с предварительно созданными напряжениями на поверхности в 200 МПа [13], имитирующими поверхностное упрочнение. Для получения напряжений в детали с максимальными размахами, значения которых представлены в табл. 1 и табл. 2, конструкция была нагружена маневренной силой от горизонтального оперения (отрицательные значения напряжений соответствуют напряжениям сжатия).

Таблица 1

Действующие напряжения у отверстия фитинга из материала АК-6, МПа

$\sigma_x^{\max}$	$\sigma_x^{\min}$	$\sigma_y^{\max}$	$\sigma_y^{\min}$	$\sigma_z^{\max}$	$\sigma_z^{\min}$	$\tau_{xy}^{\max}$	$\tau_{xy}^{\min}$	$\tau_{yz}^{\max}$	$\tau_{yz}^{\min}$	$\tau_{zx}^{\max}$	$\tau_{zx}^{\min}$
-117,4	-134,3	-153,7	-178,0	-201,4	-218,1	-113,9	-130,5	62,35	44,4	82,77	68,2

Таблица 2

Действующие напряжения у отверстия фитинга из материала Д16Т с поверхностным упрочнением, МПа

$\sigma_x^{\max}$	$\sigma_x^{\min}$	$\sigma_y^{\max}$	$\sigma_y^{\min}$	$\sigma_z^{\max}$	$\sigma_z^{\min}$	$\tau_{xy}^{\max}$	$\tau_{xy}^{\min}$	$\tau_{yz}^{\max}$	$\tau_{yz}^{\min}$	$\tau_{zx}^{\max}$	$\tau_{zx}^{\min}$
-126,9	-147,3	-152,3	-174,4	-184,8	-195,1	-86,63	-90,15	47,34	47,10	59,44	59,36

На основании амплитудных и средних значений напряжений были определены эквивалентные напряжения $\sigma_{\text{ЭКВ}}$ в фитинге в наиболее нагруженном месте, около отверстия. Эквивалентные напряжения дают возможность установления соответствия между напряжениями статической прочности или разрушения при сложном напряжённом состоянии и одноосным растяжением:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 2 \left(\frac{\sigma_{-1}^0}{\tau_{-1}^0} \right)^2 (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}.$$

Определение коэффициентов запаса усталостной прочности проводилось в отношении к пределам выносливости гладких лабораторных образцов. Корреляционные формулы пределов выносливости гладких лабораторных образцов имеют вид [1]:

$$\sigma_{-1}^0 = (0,55 - 0,0001 \sigma_B) \sigma_B; \quad \tau_{-1}^0 = 0,55 \sigma_{-1}^0,$$

где σ_{-1}^0 , τ_{-1}^0 – пределы выносливости лабораторного образца по нормальным и касательным напряжениям, соответственно, σ_B – предел прочности материала детали.

Пределы выносливости детали по нормальным и касательным пределам выносливости [1]:

$$\sigma_{-1Д} = \frac{\sigma_{-1}^0}{K_{\Sigma\sigma}}; \quad \tau_{-1Д} = \frac{\tau_{-1}^0}{K_{\Sigma\tau}}.$$

где $K_{\Sigma\sigma}$, $K_{\Sigma\tau}$, – суммарные коэффициенты влияния асимметрии цикла, концентрации напряжений, качества обработки поверхности, масштабного фактора на сопротивление усталости.

Коэффициенты запаса усталостной прочности по нормальным и касательным напряжениям:

$$n_{-1}^{\sigma} = \frac{\sigma_{-1Д}}{\sigma_{\text{ЭКВ}}}; \quad n_{-1}^{\tau} = \frac{\tau_{-1Д}}{\sigma_{\text{ЭКВ}}}.$$

Результаты расчётов представлены на рис. 4–6.

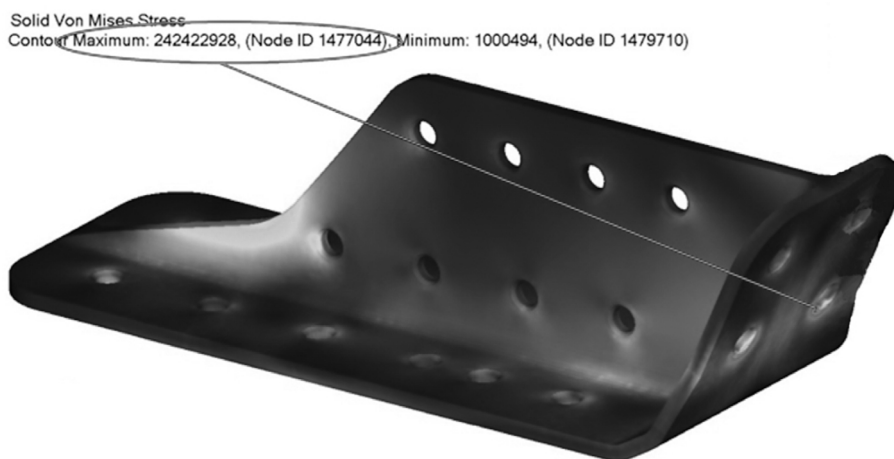


Рис. 4. Напряжённо-деформированное состояние скулового фитинга без поверхностного упрочнения. Напряжения по Мизесу, Па

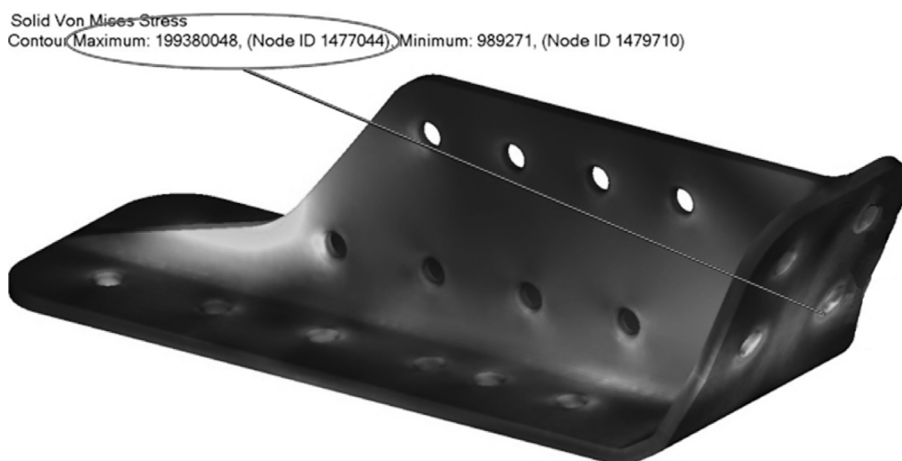


Рис. 5. Напряжённо-деформированное состояние скулового фитинга поверхностно упрочнённого. Напряжения по Мизесу, Па

На основании данных расчётов конструкции от нагружения избыточным давлением и избыточным давлением совместно с маневренной силой от горизонтального оперения выполнили расчёт коэффициента запаса прочности по усталостной долговечности фитинга в зоне концентрации напряжений у отверстия под заклёпку [1, 2].

Значения напряжений (рис. 4), полученные для эквивалентного напряжения и пределов выносливости образцов из материала АК-6:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = 27,06 \text{ МПа}; \quad \sigma_{-1}^0 = 194,56 \text{ МПа}; \quad \tau_{-1}^0 = 107 \text{ МПа}.$$

Пределы выносливости детали:

$$\sigma_{-1Д} = 72,12 \text{ МПа}; \quad \tau_{-1Д} = 51,48 \text{ МПа}.$$

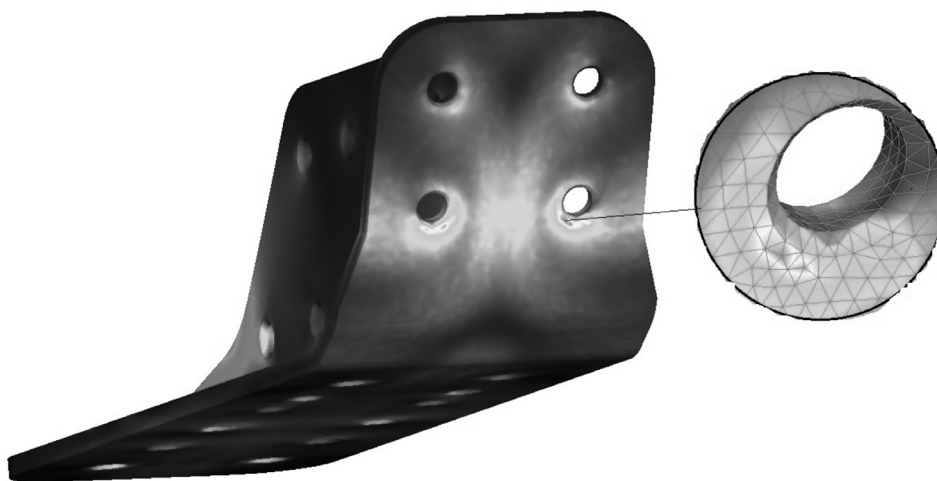


Рис. 6. Расчётный элемент отверстия с концентратором напряжений

Коэффициенты запаса усталостной прочности по нормальным и касательным напряжениям:

$$n_{-1}^{\sigma} = 2,66; \quad n_{-1}^{\tau} = 1,90.$$

Значения напряжений (рис. 5–6), полученные для эквивалентного напряжения и пределов выносливости образцов из материала Д16Т:

$$\sigma_{\text{экв}} = 7,64 \text{ МПа}; \quad \sigma_{-1}^0 = 208,69 \text{ МПа}; \quad \tau_{-1}^0 = 114,78 \text{ МПа}.$$

Пределы выносливости детали:

$$\sigma_{-1Д} = 77,52 \text{ МПа}; \quad \tau_{-1Д} = 55,2 \text{ МПа}.$$

Коэффициенты запаса усталостной прочности по нормальным и касательным напряжениям:

$$n_{-1}^{\sigma} = 10,1; \quad n_{-1}^{\tau} = 7,22.$$

Оценка полученных результатов

1. Предварительные напряжения, созданные на поверхности фитинга, значительно повышают запас усталостной прочности.

2. Значение эквивалентного напряжения в зоне максимальной концентрации (около отверстия) в одном и том же узле элемента (1477044) у упрочнённого фитинга (199380048 Па, рис. 5) на 43 МПа меньше чем у фитинга без упрочнения (242422928 Па, рис. 4).

3. Значения эквивалентных напряжений на радиусном переходе ребра фитинга практически не изменились (204 МПа) при определении амплитудных напряжений, так как эта зона не была «упрочнена». Этот факт позволяет оценить правильность выбора метода исследования.

Заключение

Выполненный конечно-элементный анализ напряжённого состояния скулового фитинга, нагруженного избыточным давлением и силой от горизонтального оперения, для двух вариантов состояния поверхностного слоя в конструкции фюзеляжа, созданной по конструкторской документации разработчика, позволяет судить об эффективности поверхностного упрочнения.

В дальнейшем целесообразно выявление закономерностей величины поверхностного упрочнения и усталостной прочности.

Для определения оптимальных параметров дробеструйного обдува необходимо провести гидродинамический анализ распределения шариков по поверхности геометрически сложных деталей типа скулового фитинга.

Базой для разработки технологического процесса дробеструйного упрочнения может стать Инструкция № 949-69 «Поверхностное упрочнение деталей из алюминиевых сплавов», ВИАМ и «Технологическая инструкция по пневмодинамическому упрочнению деталей планера при ремонте изделий Ту-134, 134А», ВО «Авиаремонт», Завод № 407 ГА.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников

1. Когаев В. П. Расчёты на прочность при напряжениях, переменных во времени / Ред. Гусенков А. П. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 1993. 363 с.
2. Серенсен С. В. Несущая способность и расчёты деталей машин на прочность. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Машгиз, 1963. 451 с.
3. Терентьев В. Ф. Усталость металлических материалов / Отв. ред. Лякишев Н. П. Москва: Наука, 2002. 247 с.
4. Биргер И. А. Остаточные напряжения. Москва: Машиностроение, 1963. 229 с.
5. Степнов М. Н., Гиацинтов Е. В. Усталость лёгких конструкционных сплавов. Под ред. Серенсена С. В. Москва: Машиностроение, 1973. 320 с.
6. Кравчук В. С., Абу Айаш Юсеф, Кравчук А. В. Сопротивление деформированию и разрушению поверхностно-упрочнённых деталей машин. Одесса: Астропринт, 2000. 160 с.
7. Гриневич А. В., Румянцев Ю. С., Морозова Л. В., Терехин А. Л. Исследование усталостной долговечности алюминиевых сплавов 1163-Т и В950.ч.-Т2 после поверхностного упрочнения. Авиационные материалы и технологии. 2014. № S4. С. 93–102. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2014-0-s4-93-102>
8. Саверин М. М. Дробеструйный наклеп. Теоретические основы и практика применения. Москва: МашГиз, 1955. 312 с.
9. Одинцов Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. Москва: Машиностроение, 1987. 328 с.
10. Промышленные алюминиевые сплавы: Справочник. Москва: Металлургия, 1984. 528 с.
11. Авиационные материалы. Алюминиевые и бериллиевые сплавы. Т. 4 / Под общей ред. д.т.н. Р. Е. Шалина. Москва: ОНТИ. 1982. 627 с.
12. Отчёт по обобщению опыта эксплуатации самолётов Ан-24. ФГУП ГосНИИ ГА. Москва. 2022. 133 с.
13. Лупкин Б. В., Лагутин А. И. Технология упрочнения поверхностным пластическим деформированием материала Д16Т // Авиационно-космическая техника и технология. 2006. № 1(27). С. 32–37.
14. Повышение усталостной прочности деталей машин поверхностной обработкой / Под ред. Серенсена С. В. Москва: МашГиз, 1952. 214 с.

References

1. Kogaev V. P. *Calculations for strength under time-varying stresses*. 2nd ed., revision and additions. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993, 363 p. (In Russ.)
2. Serensen S. V. *Bearing capacity and strength calculations of machine parts*. 2nd ed., revised and enlarged. Moscow, Mashgiz Publ., 1963, 451 p. (In Russ.)

3. Terentyev V. F. *Fatigue of metallic materials*. Ed. Lyakishev N. P. Moscow, Nauka Publ., 2002, 247 p. (In Russ.)
4. Birger I. A. *Residual stresses*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1963, 229 p. (In Russ.)
5. Stepnov M. N., Giatsintov E. V. *Fatigue of light structural alloys*. Ed. Serensen S. V. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973, 320 p. (In Russ.)
6. Kravchuk V. S., Abu Ayash Yusef, Kravchuk A. V. *Resistance to deformation and fracture of surface-hardened machine parts*. Odessa, Astroprint Publ., 2000, 160 p.
7. Grinevich A. V., Rumyantsev Yu. S., Morozova L. V., Terekhin A. L. Study of fatigue life of aluminum alloys 1163-T and B950.ch.-T2 after surface hardening. *Aviation materials and technologies*, 2014, no. S4, pp. 93–102. <https://doi.org/10.18577/2071-9140-2014-0-s4-93-102>
8. Saverin M. M. Shot peening. *Theoretical foundations and application practices*. Moscow, MashGiz Publ., 1955, 312 p. (In Russ.)
9. Odintsov L. G. *Hardening and finishing of parts by surface plastic deformation: Handbook*. Moscow, Mashinostroenie, 1987, 328 p. (In Russ.)
10. *Industrial aluminum alloys: Handbook*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1984, 528 p. (In Russ.)
11. Aviation materials. Vol. 4. *Aluminum and beryllium alloys*. Ed. R. E. Shalin. Moscow, ONTI, 1982, 627 p.
12. Report on the generalization of the experience of operating An-24 aircraft. GosNII GA, Moscow, 2022, 133 p. (In Russ.)
13. Lupkin B. V., Lagutin A. I. Technology of strengthening by surface plastic deformation of D16T material. *Aviation and space engineering and technology*, 2006, no. 1(27), pp. 32–37.
14. *Increasing the fatigue strength of machine parts by surface treatment*. Edited by S. V. Serensen. Moscow, MashGiz Publ., 1952, 214 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Смирнов Андрей Витальевич, руководитель направления, начальник службы № 155 – эксперт, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, smirnov_av@gosniiga.ru

Степанов Валентин Николаевич, инженер-конструктор, Ростовский завод гражданской авиации № 412, Ростов-на-Дону, Россия; старший преподаватель, Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия, st_fem@bk.ru

Authors information

Smirnov Andrey V., Head of Service – Expert, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, smirnov_av@gosniiga.ru

Stepanov Valentin N., Design Engineer, Rostov Civil Aircraft Factory no. 412, Rostov-on-Don, Russia; Senior Lecturer, Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia, st_fem@bk.ru

*Статья поступила в редакцию 18.02.2025; одобрена после рецензирования 26.06.2025; принята к публикации 04.07.2025.
The article was submitted 18.02.2025; approved after reviewing 26.06.2025; accepted for publication 04.07.2025.*

Научная статья
УДК 629.735.03

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ АПРОБАЦИЯ АЛГОРИТМА ОБРАБОТКИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ МНОГОСЛОЙНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Г. ГУСЕЙНОВ, О. Ф. МАШОШИН

Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. Представлен новый подход к диагностике технического состояния авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) на основе многослойных нейронных сетей. Разработанный алгоритм обеспечивает комплексную обработку диагностических параметров с учётом их взаимного влияния и временной динамики. Экспериментальные исследования на реальных данных эксплуатации двигателей CFM56 и ПС-90А показали существенное повышение точности классификации технического состояния (95,5 %) и сокращение времени обнаружения неисправностей на 69,7 % по сравнению с традиционными методами. Предложена оптимизированная архитектура нейронной сети и метод формирования диагностических признаков, обеспечивающие высокую эффективность обработки разнородных данных. Результаты работы могут быть использованы для повышения надёжности, экономичности и безопасности эксплуатации авиационной техники.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, техническая диагностика, многослойные нейронные сети, обработка диагностических параметров, раннее обнаружение неисправностей, оптимизация гиперпараметров, временная динамика сигналов, классификация технического состояния, воздушный транспорт, эксплуатация авиационной техники

Для цитирования: Гусейнов Г., Машошин О. Ф. Экспериментальная апробация алгоритма обработки диагностических параметров авиационных двигателей на основе многослойных нейронных сетей // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 50. С. 39–51.

EXPERIMENTAL VALIDATION OF THE ALGORITHM FOR PROCESSING DIAGNOSTIC PARAMETERS OF AVIATION ENGINES ON THE BASIS OF MULTILAYER NEURAL NETWORKS

H. HUSEYNOV, O. F. MASHOSHIN

Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract. The article presents a new approach to diagnosing the technical condition of aircraft gas turbine engines based on multilayer neural networks. The developed algorithm provides comprehensive processing of diagnostic parameters taking into account their mutual influence and temporal dynamics. Experimental studies on real operational data from CFM56 and PS-90A engines showed a significant increase in the accuracy of technical condition classification (95.5 %) and a reduction in fault detection time by 69.7 % compared to traditional methods. An optimized neural network architecture and a method for forming diagnostic features have been proposed, providing high efficiency in processing heterogeneous data. The results can be used to improve reliability, cost-effectiveness, and safety of aircraft operation.

Keywords: gas turbine engine, technical diagnostics, multilayer neural networks, diagnostic parameter processing, early fault detection, hyperparameter optimization, temporal signal dynamics, technical condition classification, air transportation, operation and maintenance of aircraft

For citation: Huseynov H., Mashoshin O. F. Experimental validation of the algorithm for processing diagnostic parameters of aviation engines on the basis of multilayer neural networks. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2025, no. 50, pp. 39–51. (In Russ.)

Введение

Важным для авиационной деятельности является разработка и экспериментальная апробация комплексного алгоритма обработки диагностических параметров авиационных ГТД на основе многослойных нейронных сетей, обеспечивающего повышение достоверности и оперативности диагностики технического состояния двигателей в условиях эксплуатации.

Существующие исследования в этой области [1–4] показывают перспективность нейросетевого подхода, однако большинство работ фокусируется на анализе отдельных параметров или их групп, не предлагая комплексного решения для обработки всего массива диагностических данных. Кроме того, остаются недостаточно проработанными вопросы оптимизации архитектуры нейронных сетей для задач диагностики ГТД, выбора наиболее информативных диагностических признаков и обеспечения высокого быстродействия алгоритмов при сохранении требуемой точности.

Особую актуальность имеет решение задачи учёта временной динамики диагностических параметров, содержащей важную информацию о развитии неисправностей и изменении технического состояния двигателя [5]. Существующие методы диагностики ГТД зачастую анализируют текущие значения параметров без должного учёта их изменения во времени, что ограничивает возможности прогнозирования и раннего выявления развивающихся дефектов.

Многослойные нейронные сети в задачах диагностики

Многослойные нейронные сети представляют собой класс моделей искусственного интеллекта, структура которых вдохновлена организацией биологических нейронных сетей [6]. Они состоят из множества взаимосвязанных искусственных нейронов, организованных в слои. Основными компонентами многослойной нейронной сети являются: входной слой, принимающий исходные данные; один или несколько скрытых слоев, выполняющих нелинейные преобразования входных данных; выходной слой, формирующий результат работы сети. В задачах диагностики ГТД многослойные нейронные сети могут эффективно использоваться для классификации технических состояний двигателя на основе анализа диагностических параметров. При этом входной слой сети принимает вектор признаков, сформированный на основе диагностических параметров, а выходной слой формирует вероятности принадлежности текущего состояния двигателя к различным классам.

Математически работу многослойной нейронной сети можно описать следующим образом. Пусть $\mathbf{x}$ – вектор входных данных, $W^{(l)}$ – матрица весовых коэффициентов l -го слоя, $\mathbf{b}^{(l)}$ – вектор смещений l -го слоя, $\mathbf{a}^{(l)}$ – вектор активаций нейронов l -го слоя. Тогда прямое распространение сигнала через сеть можно описать уравнениями:

$$\begin{aligned}\mathbf{z}^{(l)} &= W^{(l)} \mathbf{a}^{(l-1)} + \mathbf{b}^{(l)}; \\ \mathbf{a}^{(l)} &= f(\mathbf{z}^{(l)}),\end{aligned}$$

где f – функция активации, применяемая поэлементно к вектору $\mathbf{z}^{(l)}$.

В качестве функций активации в скрытых слоях часто используются:

1. Сигмоидальная функция: $f(z) = (1 + e^{-z})^{-1}$;
2. Гиперболический тангенс: $f(z) = \tanh(z)$;
3. ReLU (Rectified Linear Unit): $f(z) = \max(0, z)$.

Для выходного слоя в задачах классификации обычно применяется функция softmax:

$$f(z_i) = \frac{e^{z_i}}{\sum_{j=1}^m e^{z_j}},$$

где m – количество классов. Функция преобразует выходы нейронов в вероятности принадлежности к различным классам.

Обучение нейронной сети происходит путём минимизации функции потерь, которая количественно оценивает различие между предсказаниями сети и фактическими целевыми значениями. В задачах классификации технических состояний ГТД в качестве функции потерь часто используется перекрёстная энтропия:

$$L(\mathbf{y}, \hat{\mathbf{y}}) = - \sum_{i=1}^m y_i \log(\hat{y}_i),$$

где $\mathbf{y}$ – вектор фактических меток классов в форме one-hot encoding; $\hat{\mathbf{y}}$ – вектор предсказанных вероятностей.

Минимизация функции потерь производится методом градиентного спуска и его модификациями (Adam, RMSProp, Adagrad и др.). При этом градиенты функции потерь относительно весовых коэффициентов сети вычисляются с помощью алгоритма обратного распространения ошибки (backpropagation).

Для задач диагностики ГТД особое значение имеет выбор оптимальной архитектуры нейронной сети, учитывающей специфику диагностических данных. В частности, важно определить: количество и размеры скрытых слоев; типы функций активации для различных слоев; методы регуляризации для предотвращения переобучения; стратегии оптимизации для эффективного обучения. В рамках настоящего исследования предлагается специализированная архитектура многослойной нейронной сети, адаптированная к задачам диагностики ГТД и обеспечивающая высокую точность классификации технических состояний при сохранении вычислительной эффективности.

Предлагаемый комплексный алгоритм обработки диагностических параметров

На основе проведённого анализа теоретических основ диагностики ГТД и возможностей применения многослойных нейронных сетей разработан комплексный алгоритм обработки диагностических параметров. Алгоритм включает следующие основные этапы: предварительная обработка данных – фильтрация шумов, удаление выбросов, восполнение пропущенных значений; формирование расширенного вектора признаков, учитывающего временную динамику параметров; нормализация и отбор информативных признаков; классификация технического состояния с помощью многослойной нейронной сети; интерпретация результатов и формирование диагностических рекомендаций.

На этапе предварительной обработки для каждого диагностического параметра $x_i(t)$ выполняется фильтрация шумов с использованием медианного фильтра:

$$\tilde{x}_i(t) = \text{median}(x_i(t-k), \dots, x_i(t), \dots, x_i(t+k)),$$

где $i = 1, \dots, n$ (количество параметров); k – размер окна фильтрации, выбираемый в зависимости от характеристик шума и частоты дискретизации сигнала; t – дискретное время.

На этапе формирования расширенного вектора признаков для каждого параметра $x_i(t)$ на момент времени t вычисляются: скорость изменения (первая производная); ускорение изменения (вторая производная); статистические характеристики (среднее значение, стандартное отклонение, коэффициенты корреляции между параметрами) за определённый предшествующий промежуток времени $[t-T, t]$; спектральные характеристики (для вибрационных параметров); амплитуды гармонических составляющих; соотношения между гармониками; спектральная плотность мощности.

Для нормализации признаков используется метод минимакс-нормализации:

$$x_{i, \text{norm}} = \frac{x_i - x_{i, \min}}{x_{i, \max} - x_{i, \min}},$$

где $x_{i, \min}$ и $x_{i, \max}$ – минимальное и максимальное значения параметра x_i в обучающей выборке.

Для отбора наиболее информативных признаков применяются методы анализа главных компонент (РСА) и оценки важности признаков на основе метода случайного леса (Random Forest Feature Importance).

Классификация технического состояния выполняется с помощью многослойной нейронной сети. Для повышения достоверности результатов используется ансамблевый подход, сочетающий несколько моделей с различной архитектурой. Итоговое решение принимается на основе взвешенного голосования:

$$\hat{y} = \operatorname{argmax}_j \sum_{m=1}^M w_m P_m(y = j | X),$$

где $P_m(y = j | X)$ – вероятность принадлежности к классу j , предсказанная моделью m , w_m – весовой коэффициент модели m , M – общее количество моделей в ансамбле.

Для интерпретации результатов и формирования диагностических рекомендаций используется база знаний, содержащая информацию о типичных проявлениях различных неисправностей и рекомендуемых действиях по их устранению.

Ключевой особенностью предлагаемого алгоритма является его адаптивность к изменяющимся условиям эксплуатации и индивидуальным особенностям конкретных двигателей. Это достигается за счет периодического дообучения моделей на новых данных и коррекции параметров алгоритма на основе обратной связи от эксплуатационного персонала.

Численное решение задач диагностики ГТД

Формирование диагностических признаков. Эффективность нейросетевого алгоритма диагностики ГТД во многом зависит от качества и информативности используемых признаков. На основе теоретического анализа и экспериментальных исследований разработан комплексный подход к формированию диагностических признаков, учитывающий специфику задачи диагностики авиационных двигателей. Основные группы признаков включают: прямые признаки, временные признаки, частотные признаки, относительные признаки, статистические признаки.

Алгоритм обучения нейронной сети. На основе теоретического анализа и экспериментальных исследований разработан адаптивный алгоритм обучения нейронной сети для задач диагностики ГТД, представленный ниже в виде псевдокода.

Алгоритм: Адаптивное обучение нейронной сети для диагностики ГТД

Вход:

- Обучающая выборка $X_{\text{train}}, y_{\text{train}}$
- Валидационная выборка $X_{\text{val}}, y_{\text{val}}$
- Гиперпараметры модели: начальная скорость обучения η_0 , размер батча B , максимальное количество эпох max_epochs , порог раннего останова patience

Выход:

- Обученная нейронная сеть NN с оптимальными параметрами

1. Инициализация:

1.1. Инициализировать веса нейронной сети

1.2. Инициализировать параметры оптимизатора Adam: $\beta_1=0,9$, $\beta_2=0,999$, $\epsilon=10^{-8}$

1.3. Нормализовать входные данные

1.4. $best_val_loss=\infty$, $no_improvement_count=0$, $epoch=0$

2. Основной цикл обучения:

while $epoch < max_epochs$ and $no_improvement_count < patience$:

2.1. Перемешать обучающую выборку

2.2. Разбить обучающую выборку на батчи размера B

2.3. Для каждого батча (X_batch , y_batch):

a. Выполнить прямой проход через сеть:

- Рассчитать выходы сети

- Вычислить функцию потерь

b. Выполнить обратный проход:

- Вычислить градиенты функции потерь по параметрам сети

- Обновить параметры

2.4. Вычислить функцию потерь на валидационной выборке val_loss

2.5. Если $val_loss < best_val_loss$:

$best_val_loss = val_loss$

Сохранить текущие параметры сети как лучшие

$no_improvement_count=0$

Иначе:

$no_improvement_count++$

2.6. Обновить скорость обучения

2.7. $epoch++$

3. Восстановить лучшие параметры сети

4. Вернуть обученную сеть NN

Для повышения эффективности обучения и предотвращения застревания в локальных минимумах применяется техника перезапуска с различными инициализациями (random restarts). Обучение выполняется несколько раз с разной случайной инициализацией весов, и в качестве итоговой модели выбирается та, которая демонстрирует наилучшую производительность на валидационной выборке.

Оптимизация параметров модели

Для достижения максимальной эффективности нейросетевого алгоритма диагностики ГТД проведена комплексная оптимизация параметров модели с использованием методов автоматического подбора гиперпараметров. Основные оптимизируемые гиперпараметры включают:

- архитектуру сети: количество скрытых слоев; количество нейронов в каждом слое; функции активации;

- параметры обучения: начальная скорость обучения; коэффициент регуляризации; размер батча; параметры оптимизатора Adam (β_1 , β_2);

- параметры регуляризации: вероятность Dropout; коэффициент L2-регуляризации.

Для оптимизации гиперпараметров используется комбинация следующих методов: байесовской оптимизации [7], случайного поиска с ранней остановкой [8] и генетических алгоритмов [9].

В результате оптимизации определены оптимальные значения гиперпараметров для задачи диагностики ГТД (табл. 1).

Таблица 1

Оптимальные значения гиперпараметров нейросетевой модели

Гиперпараметр	Оптимальное значение
Количество скрытых слоев	3
Количество нейронов в слоях	[128, 64, 32]
Функция активации	Leaky ReLU ($\alpha=0,01$)
Начальная скорость обучения	0,001
Коэффициент затухания скорости обучения	0,01
Размер батча	64
Коэффициент регуляризации L2	0,0005
Вероятность Dropout	0,3
Параметры Adam	$\beta_1=0,9$, $\beta_2=0,999$
Порог раннего останова	10 эпох

Оптимальные значения гиперпараметров получены с использованием байесовской оптимизации с 200 итерациями на валидационной выборке. Целевой функцией служила метрика F1-макро, оценивающая сбалансированность классификации для всех типов неисправностей. Наибольшее влияние на результат оказали количество нейронов в скрытых слоях и вероятность Dropout.

Критерии оценки эффективности

Для всесторонней оценки эффективности разработанного алгоритма диагностики ГТД определена система критериев, учитывающая специфику задачи и требования к надёжности диагностики авиационных двигателей. Основные критерии оценки эффективности включают: точность классификации, полноту (Recall) и точность (Precision) для каждого класса неисправностей, F1-меру, AUC-ROC (Area Under the Receiver Operating Characteristic curve), время обнаружения неисправности, вычислительную эффективность, надёжность и устойчивость. Для комплексной оценки эффективности используется интегральный критерий, учитывающий все перечисленные аспекты с соответствующими весовыми коэффициентами:

$$Q = \sum_{i=1}^n w_i q_i,$$

где q_i – нормализованное значение i -го критерия, w_i – весовой коэффициент, отражающий важность данного критерия для общей оценки эффективности, n – общее количество критериев.

Для оценки эффективности предложенного алгоритма использованы метрики, рекомендованные в работах [10–12]. В частности, автор [10] подчеркивает важность сочетания точности классификации с временем обнаружения неисправностей, а авторы [12] предлагают использовать интегральный критерий, учитывающий как характеристики диагностики, так и вычислительную эффективность алгоритма.

Весовые коэффициенты определяются на основе экспертных оценок с учётом специфики конкретного применения.

Алгоритмическое решение

Структура предлагаемого алгоритма. На основе проведённого теоретического анализа и результатов численного решения разработан комплексный алгоритм обработки диагностических параметров ГТД с использованием многослойных нейронных сетей. Алгоритм включает следующие основные блоки:

- блок предварительной обработки данных осуществляет фильтрацию высокочастотных шумов с использованием адаптивного медианного фильтра, удаление выбросов на основе z -оценок и нормализацию параметров в диапазон $[0, 1]$;
- блок формирования диагностических признаков реализует вычисление производных, статистических характеристик временных рядов и частотных признаков на основе быстрого преобразования Фурье;
- блок нейросетевого анализа осуществляет классификацию технического состояния с использованием многослойной нейронной сети с архитектурой, представленной в табл. 1. Для повышения надёжности применяется ансамблевый подход с механизмом взвешенного голосования.

Для обеспечения достоверности диагностики применяется мультимодальный подход, сочетающий нейросетевой анализ с традиционными методами диагностики. Результаты нейросетевого анализа сопоставляются с данными параметрического контроля, вибродиагностики и эндоскопического контроля, что позволяет повысить достоверность выявления неисправностей и снизить вероятность ложных тревог.

Особенности реализации. Для практической реализации предложенного алгоритма авторами разработаны программные модули на языках C++ и Python. Выбор двух языков программирования обусловлен различными задачами: C++ используется для создания высокопроизводительной библиотеки, которая может быть встроена в системы реального времени, а Python применяется для исследований, тестирования и визуализации результатов.

Реализация на C++. Основная библиотека для обработки диагностических параметров и нейросетевого анализа реализована на C++ с использованием современных стандартов (C++17) и оптимизирована для высокой производительности. Библиотека имеет модульную структуру, что обеспечивает гибкость и возможность адаптации к различным аппаратным платформам.

Ключевой модуль C++ библиотеки – **DataProcessor** – модуль предварительной обработки данных, включающий классы для фильтрации, нормализации и синхронизации временных рядов.

Для обеспечения максимальной производительности применены следующие оптимизации: использование SIMD инструкций (SSE, AVX) для параллельной обработки данных; многопоточная обработка с применением библиотеки `std::thread`; оптимизация алгоритмов для минимизации выделения памяти и копирования данных; применение техник кэширования для повторно используемых результатов; компиляция с оптимизациями уровня ОЗ и профиль-направленными оптимизациями (PGO).

Python реализация. Для исследований, тестирования и визуализации результатов разработана Python-библиотека, которая реализует те же алгоритмы, что и C++ версия, но с акцентом на удобство использования и интеграцию с экосистемой научных вычислений Python.

Обсуждение численного решения

Экспериментальные исследования. Для оценки эффективности разработанного алгоритма проведены комплексные экспериментальные исследования, основанные на реальных данных эксплуатации авиационных ГТД. В качестве объекта исследования использовались данные, полученные при эксплуатации турбореактивных двухконтурных двигателей типа CFM56 и ПС-90А, используемых на гражданских самолётах. Экспериментальные данные включали записи следующих параметров работы двигателя:

- параметры вибрации: вибрация роторов низкого (VIB_N1) и высокого давления (VIB_N2);

- термогазодинамические параметры: температура газов за турбиной (EGT), температура воздуха на входе в компрессор высокого давления (T3), давление на выходе из компрессора высокого давления (P3), расход топлива (FF);

- механические параметры: частота вращения ротора низкого давления (N1); частота вращения ротора высокого давления (N2); степень повышения давления в компрессоре (EPR).

Данные зарегистрированы в процессе эксплуатации на различных режимах работы двигателя (взлётный, крейсерский, посадочный) и при различных внешних условиях (температура и давление окружающей среды, высота полёта). Для каждого двигателя были доступны данные за период от 1000 до 3000 ч налёта. Данные были размечены на основе информации о фактически обнаруженных неисправностях в процессе технического обслуживания. Выделено 5 основных классов состояний: 1. Нормальное состояние (класс 0); 2. Начальное развитие дефектов проточной части компрессора (класс 1); 3. Повышенный износ подшипников (класс 2); 4. Нарушение работы системы топливопитания (класс 3); 5. Повреждение лопаток турбины (класс 4).

Общий объём записей обучающей выборки составил 85000, валидационной – 25000, тестовой – 35000. Распределение классов в выборках было несбалансированным, с доминированием класса 0 (нормальное состояние), что отражает реальную картину эксплуатации. Для каждого двигателя первые 60 % записей использовались для обучения, следующие 20 % – для валидации, заключительные 20 % – для тестирования. Такой подход обеспечивает оценку способности алгоритма к прогнозированию неисправностей в будущем на основе исторических данных.

Методика проведения экспериментов. Экспериментальные исследования проводились в пять этапов: предварительная обработка данных; формирование диагностических признаков; обучение нейронной сети; тестирование алгоритма: оценка точности классификации на тестовой выборке; сравнительный анализ: сравнение разработанного алгоритма с традиционными методами диагностики. Для обеспечения объективности и статистической значимости результатов эксперименты проводились с использованием 5-кратной перекрёстной проверки (5-fold cross-validation). Для каждой конфигурации алгоритма эксперименты повторялись 10 раз с различными инициализациями случайных весов нейронной сети, и результаты усреднялись.

Анализ результатов

Результаты классификации. Основные результаты классификации технического состояния ГТД с использованием разработанного алгоритма представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты классификации технического состояния ГТД

Класс	Precision	Recall	F1-score	AUC-ROC
0 (Норма)	0,982	0,993	0,987	0,996
1 (Дефекты компрессора)	0,942	0,917	0,929	0,978
2 (Износ подшипников)	0,956	0,938	0,947	0,984
3 (Система топливопитания)	0,928	0,902	0,915	0,971
4 (Повреждение турбины)	0,967	0,945	0,956	0,988
Среднее	0,955	0,939	0,947	0,983

Результаты показывают высокую эффективность разработанного алгоритма для всех классов технического состояния. Наилучшие показатели достигнуты для класса 0 (нормальное состояние), что объясняется наибольшим количеством обучающих примеров для этого класса.

Несколько меньшая точность для класса 3 (нарушение работы системы топливопитания) может быть связана с большей вариативностью проявлений данного типа неисправностей.

Время обнаружения неисправностей. Одним из ключевых показателей эффективности алгоритма диагностики является время обнаружения неисправностей. Результаты анализа времени обнаружения для различных типов неисправностей представлены в табл. 3.

Таблица 3

Среднее время обнаружения неисправностей (в лётных часах)

Тип неисправности	Традиционный метод	Разработанный алгоритм	Улучшение, %
Дефекты компрессора	127,5	42,3	66,8
Износ подшипников	89,2	23,6	73,5
Нарушение работы системы топливопитания	112,8	38,5	65,9
Повреждение лопаток турбины	76,4	18,9	75,3
Среднее	101,5	30,8	69,7

Налицо существенное сокращение времени обнаружения неисправностей при использовании разработанного алгоритма по сравнению с традиционными методами диагностики. Наибольшее улучшение достигнуто для неисправностей, связанных с повреждением лопаток турбины и износом подшипников.

Сокращение времени обнаружения неисправностей позволяет предотвратить развитие дефектов и минимизировать стоимость ремонта. Кроме того, раннее обнаружение неисправностей повышает эффективность эксплуатации авиационной техники.

Вычислительная эффективность. Для оценки вычислительной эффективности разработанного алгоритма проведены тесты на различных аппаратных платформах. Результаты тестирования представлены в табл. 4.

Таблица 4

Время обработки одного набора параметров (мс)

Аппаратная платформа	C++ реализация	Python реализация
Desktop CPU (Intel Core i7-9700K)	4,2	12,6
Desktop GPU (NVIDIA RTX 2080)	1,8	5,3
Embedded CPU (ARM Cortex-A72)	18,5	42,3
FPGA (Xilinx Zynq UltraScale+)	2,7	N/A

Результаты показывают, что разработанный алгоритм обеспечивает достаточно высокую производительность для работы в режиме реального времени даже на встраиваемых платформах с ограниченными вычислительными ресурсами. Реализация на C++ демонстрирует существенно лучшую производительность по сравнению с Python-реализацией, что делает её предпочтительной для интеграции в бортовые системы диагностики.

Наилучшая производительность достигается при использовании GPU-ускорения, что может быть полезно для наземных систем диагностики, обрабатывающих большие объёмы данных от множества двигателей одновременно.

Анализ чувствительности алгоритма. Для оценки устойчивости алгоритма к шумам и искажениям во входных данных проведён анализ чувствительности. Тестовые данные были

искусственно зашумлены добавлением гауссовского шума различной интенсивности (от 1 % до 10 % от диапазона значений параметров). Результаты показали, что алгоритм сохраняет точность классификации >90 % при уровне шума до 5 %. При увеличении уровня шума до 10 % точность снижается до 85 %, что всё равно превосходит показатели традиционных методов при отсутствии шума.

Также исследовано влияние выпадения показаний отдельных датчиков (имитация отказа). Алгоритм показал устойчивость к потере до 30 % входных параметров при сохранении точности классификации выше 85 %, что обеспечивается избыточностью признаков и взаимной корреляцией параметров работы двигателя.

Сравнение с существующими методами

Для оценки преимуществ разработанного алгоритма проведено сравнение с существующими методами диагностики ГТД, включая традиционные методы (пороговый контроль, трендовый анализ) и современные методы машинного обучения (SVM, Random Forest, Gradient Boosting). Сравнение проводилось по следующим критериям: 1. Общая точность классификации; 2. F1-мера (среднее по всем классам); 3. Время обнаружения неисправностей; 4. Вычислительная эффективность; 5. Интерпретируемость результатов. Результаты сравнения представлены в табл. 5.

Таблица 5

Сравнение различных методов диагностики ГТД

Метод	Точность	F1-мера	Время обнаружения (ч)	Время обработки (мс)	Интерпретируемость
Пороговый контроль	0,783	0,742	101,5	1,2	Высокая
Трендовый анализ	0,825	0,798	84,2	2,8	Высокая
SVM	0,902	0,891	55,7	3,5	Низкая
Random Forest	0,927	0,915	42,3	6,4	Средняя
Gradient Boosting	0,938	0,925	38,9	8,7	Средняя
Разработанный алгоритм	0,955	0,947	30,8	4,2	Средняя

Примечание: Измерения времени обработки проводились на процессоре Intel Core i7-9700K с частотой 3,6 ГГц, 32 ГБ оперативной памяти DDR4-3200 под управлением операционной системы Linux Ubuntu 20.04. Для методов машинного обучения использовалась реализация на языке C++ с оптимизацией компилятора уровня ОЗ.

Результаты показывают, что разработанный алгоритм превосходит все сравниваемые методы по точности классификации и F1-мере, а также обеспечивает наименьшее время обнаружения неисправностей. По вычислительной эффективности алгоритм уступает только пороговому контролю и трендовому анализу, но значительно превосходит их по всем остальным показателям.

Интерпретируемость результатов разработанного алгоритма оценивается как средняя, что является компромиссом между высокой интерпретируемостью традиционных методов и низкой интерпретируемостью некоторых методов машинного обучения (например, SVM).

По предварительным оценкам, внедрение разработанного алгоритма позволяет сократить затраты на техническое обслуживание ГТД на 15–20 % и увеличить средний межремонтный ресурс на 10–15 %. Однако, несмотря на высокую эффективность применения, разработанный алгоритм имеет ряд ограничений: требуется значительный объем обучающих данных с размеченными неисправностями, что может быть затруднительно для новых типов двигателей; алгоритм может быть менее эффективен при одновременном проявлении нескольких типов неисправностей, особенно если их симптомы маскируют друг друга; при существенном изменении

режимов эксплуатации (например, полёты в экстремальных климатических условиях) может потребоваться переобучение модели; вычислительная сложность алгоритма может быть избыточной для простых неисправностей, которые надёжно выявляются традиционными методами.

Заключение

Основные полученные авторами результаты и сделанные выводы заключаются в следующем.

Разработана математическая модель формирования и обработки диагностических признаков, учитывающая взаимное влияние параметров и их временную динамику. Предложен подход к расчёту комплексных признаков, основанный на сочетании временных, частотных и статистических характеристик диагностических параметров.

Разработана оптимизированная архитектура многослойной нейронной сети для задач диагностики ГТД, включающая три скрытых слоя с оптимальным количеством нейронов, функцией активации Leaky ReLU и механизмами регуляризации Dropout и Batch Normalization.

Предложен адаптивный алгоритм обучения нейронной сети, основанный на оптимизаторе Adam с динамическим изменением скорости обучения и механизмом раннего останова. Определены оптимальные значения гиперпараметров модели для задачи диагностики ГТД.

Разработано программное обеспечение для реализации предложенного алгоритма, включающее высокопроизводительную C++ библиотеку для встраивания в системы реального времени и Python-библиотеку для исследований и визуализации результатов.

Проведены экспериментальные исследования эффективности разработанного алгоритма на реальных данных эксплуатации авиационных двигателей типов CFM56 и ПС-90А. Результаты показали высокую точность классификации технического состояния ГТД (95,5 %) и значительное сокращение времени обнаружения неисправностей (на 69,7 %) по сравнению с традиционными методами.

Выполнено сравнение разработанного алгоритма с существующими методами диагностики ГТД, включая традиционные подходы (пороговый контроль, трендовый анализ) и современные методы машинного обучения (SVM, Random Forest, Gradient Boosting), показавшее превосходство предложенного алгоритма по ключевым показателям эффективности.

Внедрение полученных автором результатов в практику авиационной деятельности позволит внести значительный вклад в совершенствование методов технической диагностики авиационных двигателей для повышения эффективности технологических процессов эксплуатации авиационной техники.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников

1. Kulagin V. P. et al. Automated identification of critical malfunctions of aircraft engines based on modified wavelet transform and deep neural network clustering. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 714, no. 1, 012014.
2. Жернаков С. В., Гильманшин А. Т. Применение интеллектуальных алгоритмов на основе нечёткой логики и нейронных сетей для решения задач диагностики отказов авиационного ГТД // *Intelligent Technologies for Information Processing and Management: Сборник трудов конференции*. 10–12 ноября 2014 года. Уфа, 2014. С. 112–115.
3. Машошин О. Ф. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей с использованием информационного потенциала контролируемых параметров: дис. докт. техн. наук. 2005, Москва, МГТУ ГА.

4. Богоявленский А. А. Вопросы обеспечения единства измерений при межведомственных испытаниях спектрометров для трибодиагностики ГТД // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 219. С. 77–84.
5. Zhou H. et al. Long-short term memory and gas path analysis based gas turbine fault diagnosis and prognosis. *Advances in Mechanical Engineering*, 2021, vol. 13, no. 8. <https://doi.org/10.1117/16878140211037767>
6. Zoph B., Le Q. V. Neural architecture search with reinforcement learning *International Conference on Learning Representations*, 2017, 16 p.
7. Машошин О. Ф., Гусейнов Г., Засухин А. С. Методика диагностирования технического состояния ГТД с применением рекуррентных нейронных сетей (RNN) и длительной краткосрочной памяти (LSTM) // Научный вестник МГТУ ГА. 2024. Т. 27. № 6. С. 21–41. <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2024-27-6-21-41>
8. Жернаков С. В. Применение технологии нейронных сетей для диагностики технического состояния авиационных двигателей // Интеллектуальные системы в производстве. 2006. №. 2. С. 70–83.
9. Ясницкий Л. Н., Богданов К. В., Черепанов Ф. М. Технология нейросетевого моделирования и обзор работ Пермской научной школы искусственного интеллекта // Фундаментальные исследования. 2013. № 1-3. С. 736–740.
10. Volponi A. J. Gas turbine engine health management: past, present, and future trends. *Journal of engineering for gas turbines and power*, 2014, vol. 136, no. 5, 051201.
11. He K. et al. Delving deep into rectifiers: Surpassing human-level performance on ImageNet classification. *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 2015, pp. 1026–1034.
12. Fentaye A. D., Zaccaria V., Kyprianidis K. Aircraft engine performance monitoring and diagnostics based on deep convolutional neural networks. *Machines*, 2021, vol. 9, no. 12, 337. <https://doi.org/10.3390/machines9120337>

References

1. Kulagin V. P. et al. Automated identification of critical malfunctions of aircraft engines based on modified wavelet transform and deep neural network clustering. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 714, no. 1, 012014.
2. Zharnakov S. V., Gilmanshin A. T. Application of intelligent algorithms based on fuzzy logic and neural networks for solving gas turbine engine failure diagnostics problems. *Intelligent Technologies for Information Processing and Management*. Proceedings of the 2nd International Conference, November 10–12, 2014. Ufa, pp. 112–115. (In Russ.)
3. Mashoshin O. F. Diagnostics of aircraft gas turbine engines using the informational potential of monitored parameters. Doctoral Dissertation Technical Sciences, 2005, Moscow, MGTU GA. (In Russ.)
4. Bogoyavlensky A. A. The issues of ensuring the uniformity of measurements when conducting the interagency testing spectrometers for tribodiagnostics GTE. *Civil Aviation High Technologies*, 2015, no. 219, pp. 77–84. (In Russ.)
5. Zhou H. et al. Long-short term memory and gas path analysis based gas turbine fault diagnosis and prognosis. *Advances in Mechanical Engineering*, 2021, vol. 13, no. 8, <https://doi.org/10.1117/16878140211037767>
6. Zoph B., Le Q. V. Neural architecture search with reinforcement learning *International Conference on Learning Representations*, 2017, 16 p.
7. Mashoshin O. F., Huseynov H., Zasukhin A. S. Methodology for diagnosing the technical condition of aviation gas turbine engines using recurrent neural networks (RNN) and long short-term memory networks (LSTM). *Civil Aviation High Technologies*, 2024, vol. 27, no. 6, pp. 21–41. (In Russ.) <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2024-27-6-21-41>
8. Zharnakov S. V. Application of neural network technology for diagnostics of aircraft engine technical condition. *Intellekt. Sist. Proizv.*, 2006, no. 2, pp. 70–83. (In Russ.)
9. Yasnitsky L. N., Bogdanov K. V., Cherepanov F. M. The method of neural network modeling and review of perm scientific school of artificial intelligence. *Fundamental Research*, 2013, no. 1-3, pp. 736–740. (In Russ.)

10. Volponi A. J. Gas turbine engine health management: past, present, and future trends. *Journal of engineering for gas turbines and power*, 2014, vol. 136, no. 5, 051201.
11. He K. et al. Delving deep into rectifiers: Surpassing human-level performance on ImageNet classification. *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision*, 2015, pp. 1026–1034.
12. Fentaye A. D., Zaccaria V., Kyprianidis K. Aircraft engine performance monitoring and diagnostics based on deep convolutional neural networks. *Machines*, 2021, vol. 9, no. 12, 337.
<https://doi.org/10.3390/machines9120337>

Информация об авторах

Гусейнов Гусейн, аспирант кафедры двигателей летательных аппаратов, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия, khuseyn.21@gmail.com

Машошин Олег Федорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой двигателей летательных аппаратов, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия, o.mashoshin@mstuca.ru

Authors information

Huseynov Huseyn, Postgraduate at the Department of Aircraft Engines, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia, khuseyn.21@gmail.com

Mashoshin Oleg F., Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Head of the Department Aircraft Engines, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia, o.mashoshin@mstuca.ru

Статья поступила в редакцию 24.03.2025; одобрена после рецензирования 16.06.2025; принята к публикации 23.06.2025.
The article was submitted 24.03.2025; approved after reviewing 16.06.2025; accepted for publication 23.06.2025.

Обзорная статья
УДК 629.735.33.016

РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО УЛУЧШЕНИЮ ОСНОВНЫХ ЛЁТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК САМОЛЁТОВ АН-24 И АН-26

Г. Е. МАСЛЕННИКОВА¹, С. В. ДМИТРИЕВА², Р. Р. ТАЖЕТДИНОВ²

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

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

Аннотация. В статье описаны результаты анализа причин ухудшения характеристик скороподъёмности и уменьшения скоростей крейсерского полёта самолётов Ан-24 и Ан-26 в эксплуатации. На основе полученных результатов разработаны рекомендации по улучшению лётных характеристик. Исследование проводилось на основе массива данных, полученного по результатам облётов самолётов, выполненных по Типовым программам контрольного облёта самолётов Ан-24 и Ан-26, внедрённым директивным письмом ГС ГА МТ РФ от 10.03.2004 №24.9-65ГА. При разработке рекомендаций учитывались как особенности систем регулирования расходов топлива двигателей АИ-24, так и ограничения, накладываемые действующей эксплуатационной документацией на такие параметры, как температура газов и отклонение величины часовых расходов топлива от нормируемых. Рекомендации разрабатываются индивидуально для каждого экземпляра воздушного судна (ВС) на основе материалов контрольного облёта и полученных при этом данных о параметрах работы двигателей и оценок фактических лётных характеристик экземпляра ВС. Документально подтверждённое выполнение разработанных для каждого экземпляра ВС рекомендаций позволило в период с 2007 по 2025 годы существенно улучшить характеристики скороподъёмности и крейсерского полёта самолётов Ан-24 и Ан-26, несмотря на увеличение наработок как планера, так и двигателей.

Ключевые слова: лётно-технические характеристики, скороподъёмность, скорость горизонтального полёта, регулировочные параметры двигателей, автомат дозирования топлива, тяга, мощность двигателя, расход топлива, температура газов, стандартная атмосфера, рекомендации по регулировке расходов топлива, эксплуатация авиационной техники

Для цитирования: Масленникова Г. Е., Дмитриева С. В., Тажетдинов Р. Р. Разработка рекомендаций по улучшению основных лётных характеристик самолётов Ан-24 и Ан-26 // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 50. С. 52–61.

DEVELOPMENT OF RECOMMENDATIONS FOR IMPROVEMENT OF MAIN FLIGHT CHARACTERISTICS OF AN-24 AND AN-26 AIRCRAFT

G. E. MASLENNIKOVA¹, S. V. DMITRIEVA², R. R. TAZHETDINOV²

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

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

Abstract. The article describes the results of a study of the reasons for the deterioration of the characteristics of the climb rate and a decrease in the speeds of cruising flight of the An-24 and An-26 aircraft in operation.

Based on this analysis, recommendations were developed to improve flight performance. The analysis was carried out on the basis of an array of data obtained from the results of aircraft flights carried out according to the Standard programs for control flights of An-24 and An-26 aircraft. When developing recommendations, both peculiarities of fuel flow control systems of AI-24 engines and restrictions imposed by the current operational documentation on such parameters as gas temperature and deviation of the value of hourly fuel flow from the rated ones were taken into account. Recommendations are developed individually for each instance of the aircraft on the basis of the materials of the control flight and the data obtained in this flight on the parameters of the engines and estimates of the actual flight characteristics of the instance. The documented implementation of the recommendations developed for each copy made it possible in the period from 2007 to 2025 to significantly improve the characteristics of the climb and cruising flight of the An-24 and An-26 aircraft, despite the increase in the developments of both the airframe and engines.

Keywords: flight and technical characteristics, lifting rate, horizontal flight speed, engine adjustment parameters, automatic fuel metering machine, thrust, engine power, fuel consumption, gas temperature, standard atmosphere, recommendations for fuel flow adjustment, operation of aviation equipment

For citation: Maslennikova G. E., Dmitrieva S. V., Tazhetdinov R. R. Development of recommendations for improvement of main flight characteristics of An-24 and An-26 aircraft. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2025, no. 50, pp. 52–61. (In Russ.)

Введение

Как известно, все основные лётно-технические характеристики (ЛТХ) вытекают непосредственно из кривых потребных и располагаемых тяг Жуковского (рис. 1, а). В этой наиболее популярной диаграмме курса динамики полёта лобовое сопротивление самолёта представлено как тяга, потребная для горизонтального полёта ($P_{гп}$), а тяга силовой установки на рассматриваемом режиме – как располагаемая (P_p).

Точка пересечения кривых потребной и располагаемой тяг в правой части диаграммы определяет максимальную скорость V_{max} горизонтального полёта; точка, где расстояние между потребной и располагаемой тягой максимально (ΔP_{max}) – скорость режима максимальной скороподъёмности ($V_{нв}$); касательная к кривой потребных тяг из начала координат определяет скорость оптимального режима крейсерского полёта, соответствующую максимальному аэродинамическому качеству (в этой точке расход топлива для полёта на фиксированное расстояние минимален). Все эти характерные скорости соответствуют определённым этапам полёта самолёта.

Диаграмма рис. 1, а хорошо описывает турбореактивные двигатели (ТРД), однако для турбовинтовых двигателей (ТВД) обычно рассматривают кривые потребных и располагаемых мощностей (рис. 1, б), так как в основном тяга винта определяется мощностью на валу двигателя [1].

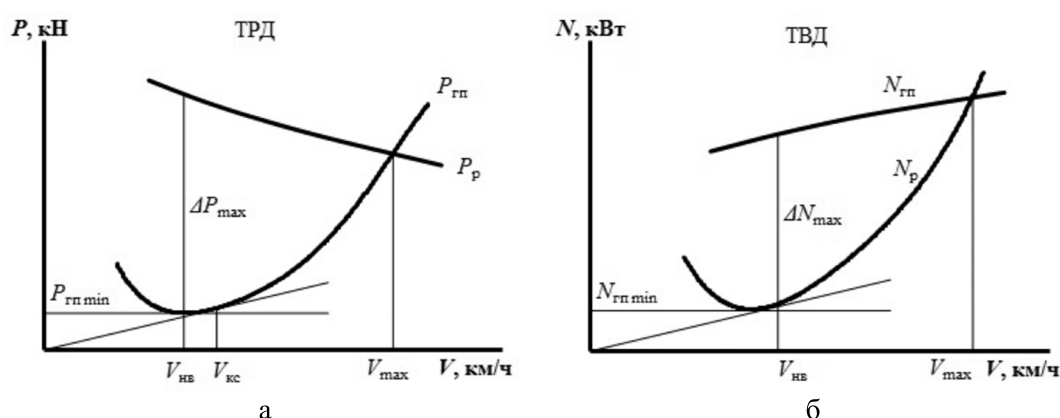


Рис. 1. Кривые потребных и располагаемых тяг (а) и мощностей (б)

В отличие от кривых потребных и располагаемых тяг, кривые потребной ($N_{гп}$) и располагаемой (N_p) мощности пересекаются в правой части диаграммы под острым углом, а точка максимальной скороподъёмности (ΔN_{max}) находится не в точке минимума, а на восходящей ветви кривой потребных мощностей, что делает самолёты, оборудованные ТВД, более чувствительными как к изменению максимальной скорости полёта, так и к изменению скороподъёмности при уменьшении мощности двигателя. Таким образом, ухудшение характеристик самолётов, оборудованных ТВД, в случае падения мощности становится более заметным.

Основные изменения характеристик самолётов Ан-24 и Ан-26

Снижение скоростей крейсерского полёта и ухудшение характеристик скороподъёмности и тяговооружённости на взлёте в начале двухтысячных годов стали основными «болезнями» стареющего парка самолётов Ан-24 [2] (рис. 2).

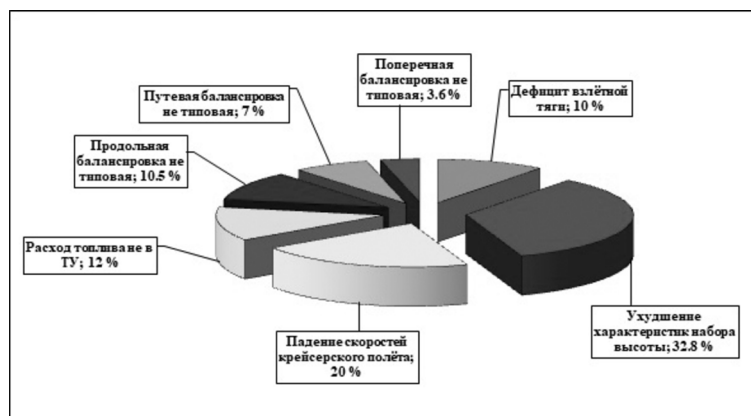


Рис. 2. Структура замечаний при количественной оценке лётных характеристик экземпляров самолётов Ан-24

То, что все три основных недостатка, наиболее часто отмечаемых при сертификации экземпляра самолёта Ан-24, относятся именно к дефициту мощности, а не к изменению лобового сопротивления планера, легко показать как аэродинамическим расчётом (увеличение лобового сопротивления в эксплуатации более чем на 1,5–2,0 % крайне маловероятно даже при установке усиливающих накладок на крыло), так и аналогичной статистикой для самолётов Ан-26 (рис. 3), где соотношение выявляемых дефектов примерно то же, что и на Ан-24, хотя планер Ан-26 не имел на тот момент усиливающих накладок на крыле, а наработки планера Ан-26 [3] в 2–3 раза меньше, чем у Ан-24.

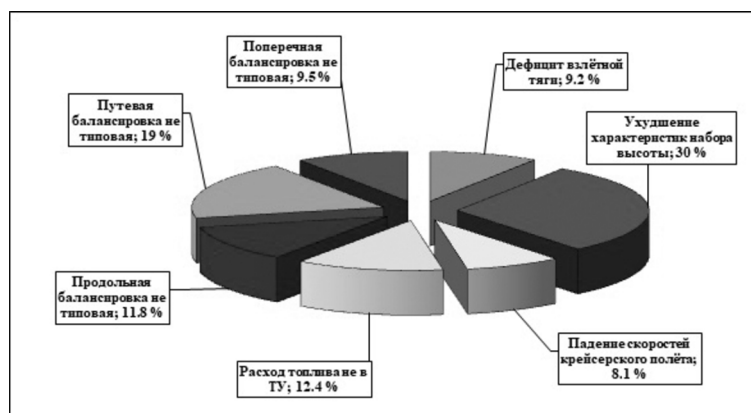


Рис. 3. Структура замечаний при количественной оценке лётных характеристик экземпляров самолётов Ан-26

Всё это говорит о том, что основной причиной выявленных недостатков является именно ухудшение характеристик двигателей АИ-24 [4, 5]. О том, что именно снижение мощности является причиной ухудшения ЛТХ говорит и то, что массивы оценок ускорения самолёта на разбеге, градиентов набора высоты на взлёте с отказом одного двигателя Gr_1 и времени t набора высоты крейсерского полёта $H = 5$ км с двумя работающими двигателями связаны значимыми коэффициентами взаимной корреляции (табл. 1), что возможно только в случае, если причина изменений имеет один источник. В табл. 1 приведены отношения t , скорости $V_{\text{кр}}$ крейсерского полёта ($H = 5$ км) и фактического часового расхода Q топлива ($H = 5$ км) на номинальном режиме работы двигателей к приведённым в РЛЭ значениям.

Таблица 1

Коэффициенты корреляции между показателями оценивания ЛТХ

Показатели ЛТХ, приведённые в РЛЭ	Gr_1	$V_{\text{кр}}/V_{\text{РЛЭ}}$	$Q/Q_{\text{РЛЭ}}$	Ускорение на разбеге
$t/t_{\text{РЛЭ}}$	–0,456	–0,372	–0,275	–0,016
Gr_1	1	0,442	0,352	0,010
$V_{\text{кр}}/V_{\text{РЛЭ}}$		1	0,700	–0,135
$Q/Q_{\text{РЛЭ}}$			1	–0,019

В табл. 1 серым фоном выделены значимые коэффициенты корреляции, которые говорят об однозначной связи регулировки часовых расходов топлива с величиной скорости крейсерского полёта, а также о наличии связи показателей времени набора высоты, градиентов набора и величины крейсерской скорости, что однозначно указывает на роль мощности двигателей в изменении ЛТХ (рис. 2, рис. 3).

Двигатели, установленные на этих двух типах ВС, различаются по модификации (АИ-24 второй серии [4] и АИ-24ВТ [5]), но при этом конструкция систем, регулирующих расход топлива и, соответственно, мощность в обоих двигателях, имеет очень много общего.

Регулирование расходов топлива как способ изменения мощности

Рассмотрим возможности изменения мощности двигателей АИ-24 посредством изменения регулировочных значений различных параметров.

Два винта, условно названных в эксплуатационной документации «85» и «3», регулируют расход топлива в верхней и нижней части дроссельной характеристики в диапазонах изменения расхода топлива от –20 до +30 кг/ч (для АИ-24 2-й серии) и от –20 до +40 кг/ч (для АИ-24ВТ) относительно номинального значения. Винт «85» в значительной степени изменяет мощность повышенных режимов, в основном номинального при значении указателя положения рычага топлива (УПРТ) 65°. Винт «3» – в основном в зоне крейсерских режимов (УПРТ 52°). При этом изменение расхода топлива на номинальном режиме на 10 кг/ч изменяет давление масла в индикаторе крутящего момента, пропорционального мощности, на 2,5–3 кг/см², что в свою очередь может приводить к изменению скороподъёмности на 0,2–0,3 м/с. Ограничением увеличения мощности на повышенных режимах винтом «85», как правило, становится температура газов за турбиной, ограничением увеличения мощности крейсерского режима – повышение тяги малого газа, что затрудняет пилотирование самолёта на посадке.

Изменение тяговых характеристик винтами «85» и «3» – самый популярный способ регулировки мощности, доступный в эксплуатации, который, как правило, даёт положительный эффект в связи с тем, что диапазон допустимых регулировочных значений весьма широк и позволяет увеличивать крейсерские скорости в диапазоне 30–40 км/ч.

Так, на самолёте Ан-24 с условным номером экземпляра 1 при облёте от 18 июня 2024 года крейсерские скорости были ниже заявленных в РЛЭ в среднем на 25 км/ч (табл. 2), а часовые расходы топлива левого двигателя были на нижней границе допустимых значений.

В табл. 2–7 использованы следующие обозначения:

$M_{\text{пол}}$ – полётная масса самолёта, [т];

УПРТ – среднее значение УПРТ для всех двигателей, [градус];

$H_{\text{ист}}$ – истинная высота полёта, [км];

ΔT – среднее отличие фактической температуры наружного воздуха от стандартной атмосферы, [°C];

$V_{\text{приб}}$ – скорость приборная экземпляра ВС, [км/ч];

$V_{\text{ист}}$ – истинная скорость экземпляра ВС, [км/ч];

$V_{\text{ист тип}}$ – типовая истинная скорость в фактических температурных условиях, [км/ч];

ΔV – отличие истинной скорости экземпляра ВС от типовой, [км/ч];

$Q_{\text{норм}}$ – часовой расход топлива по норме расхода двигателей, [кг/ч];

$Q_{\text{топ1}}$ – часовой расход топлива 1-го (левого) двигателя, [кг/ч];

$\Delta Q_{\text{норм1}}$ – отличие часового расхода топлива 1-го двигателя от нормируемого, [кг/ч];

$Q_{\text{топ2}}$ – часовой расход топлива 2-го (правого) двигателя, [кг/ч];

$\Delta Q_{\text{норм2}}$ – отличие часового расхода топлива 2-го двигателя от нормируемого, [кг/ч].

Таблица 2

Характеристики крейсерского полёта для экземпляра 1 до регулировки двигателя

$M_{\text{пол}}$	УПРТ	$H_{\text{ист}}$	ΔT	$V_{\text{приб}}$	$V_{\text{ист}}$	$V_{\text{ист тип}}$	ΔV	$Q_{\text{норм}}$	$Q_{\text{топ1}}$	$\Delta Q_{\text{норм1}}$	$Q_{\text{топ2}}$	$\Delta Q_{\text{норм2}}$
17,9	65	6,230	5	351	471	485	–15	359	357	–2	369	10
17,9	52	6,226	6	327	439	469	–31	346	334	–12	342	–4
17,8	65	5,265	3	375	476	504	–28	402	388	–14	397	–5
17,9	52	5,119	2	365	457	484	–27	390	373	–17	380	–10
Средние значения:				355	461	486	–25	–	–	–	–	–

Для увеличения скоростей крейсерского полёта было рекомендовано выполнить дополнительную регулировку левого двигателя, увеличив расходы топлива винтом «3» на 20–25 кг/ч.

Результаты, полученные в облёте от 2 августа 2024 года после выполненной регулировки, представлены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики крейсерского полёта для экземпляра 1 после рекомендованной регулировки двигателя

$M_{\text{пол}}$	УПРТ	$H_{\text{ист}}$	ΔT	$V_{\text{приб}}$	$V_{\text{ист}}$	$V_{\text{ист тип}}$	ΔV	$Q_{\text{норм}}$	$Q_{\text{топ1}}$	$\Delta Q_{\text{норм1}}$	$Q_{\text{топ2}}$	$\Delta Q_{\text{норм2}}$
20,5	65	6,064	7	358	477	461	16	360	354	–6	365	5
20,4	52	6,151	8	336	451	444	7	349	348	–1	354	5
20,4	65	5,082	5	393	497	482	15	403	403	–0	410	7
20,4	52	5,081	6	365	462	469	–7	391	388	–3	394	3
Средние значения:				363	472	464	8	–	–	–	–	–

Как видно из представленных данных, в результате регулировки расходы обоих двигателей увеличились на 4–14 кг/ч, результатом чего стало увеличение скоростей крейсерского полёта относительно типовых более чем на 30 км/ч.

Ограничение мощности при повышении температуры газов за турбиной

Однако не всегда просто увеличение расхода топлива позволяет получить положительный эффект. Во-первых, увеличение расхода топлива – это всегда увеличение температуры газов, что чревато срабатыванием автоматики ограничения температуры, которая уменьшает расход топлива для уменьшения температуры газов в двигателе. Если в этом случае температура газов реально соответствует предельно допустимой – возможности увеличения мощности путём увеличения расхода исчерпаны. Однако в ряде случаев автоматика срезки топлива отрегулирована таким образом, что слив топлива начинается с запасом 30–40 °С до предельно допустимой температуры. В таких случаях прежде чем увеличивать мощность путём увеличения расхода, необходимо увеличить температуру начала срезки топлива, то есть изменить регулировки системы подачи топлива.

Есть ещё один способ уменьшить температуру газов за турбиной – это промывка газоздушного тракта двигателя. В ряде случаев это помогает уменьшить температуру газов на величину до 20 °С, открывая тем самым дополнительные возможности для увеличения мощности.

Второй опасностью при попытке увеличить мощность двигателя путём увеличения расхода топлива является возможность падения мощности из-за неполного сгорания топлива вследствие неоптимального состава газозвушной смеси в двигателе (избыток топлива при недостатке кислорода).

Примером такого эффекта могут служить материалы облёта самолёта Ан-24 с условным номером экземпляра 2 от 3 сентября 2022 года (табл. 4).

Таблица 4

Характеристики крейсерского полёта для экземпляра 2 до регулировки двигателя

$M_{пол}$	УПРТ	$H_{ист}$	ΔT	$V_{приб}$	$V_{ист}$	$V_{ист\ тип}$	ΔV	$Q_{норм}$	$Q_{топ1}$	$\Delta Q_{норм1}$	$Q_{топ2}$	$\Delta Q_{норм2}$
17,7	65	5,870	–10	349	454	504	–50	399	429	30	411	12
17,7	52	5,870	–10	349	454	475	–21	361	391	30	367	6
17,6	65	4,930	–15	380	471	512	–41	442	467	25	447	5
17,6	52	4,931	–15	377	468	487	–19	398	442	44	395	–3
Средние значения:				364	462	495	–33	–	–	–	–	–

Из данных, представленных в табл. 4, видно, что при значениях часовых расходов топлива левого двигателя, находящихся на границе либо выше границы предельно допустимых значений отклонений (от –20 до +30 кг/ч) от нормируемого, среднее падение скоростей крейсерского полёта составляет 33 км/ч. Для приведения в соответствие с Технологическими указаниями (ТУ) расходов топлива левого двигателя и с целью улучшения характеристик крейсерского полёта было рекомендовано выполнить дополнительную регулировку левого двигателя путем уменьшения часового расхода топлива на 15–20 кг/ч винтом «3».

Результаты, полученные после выполненных работ в облёте от 8 сентября 2022 года, представлены в табл. 5.

Таблица 5

Характеристики крейсерского полёта для экземпляра 2 после рекомендованной регулировки двигателя

$M_{пол}$	УПРТ	$H_{ист}$	ΔT	$V_{приб}$	$V_{ист}$	$V_{ист\ тип}$	ΔV	$Q_{норм}$	$Q_{топ1}$	$\Delta Q_{норм1}$	$Q_{топ2}$	$\Delta Q_{норм2}$
17,9	65	5,926	–8	368	480	501	–20	400	410	10	398	–2
17,9	52	5,930	–7	349	456	472	–16	358	378	20	358	–0
17,8	65	5,028	–11	393	490	511	–21	440	450	10	442	2
17,8	52	4,930	–11	380	471	485	–14	399	426	27	398	–1
Средние значения:				373	474	492	–18	–	–	–	–	–

Из данных, представленных в табл. 5, следует, что путём уменьшения расходов топлива левого двигателя на 10–20 кг/ч удалось добиться увеличения скоростей крейсерского полёта относительно типовых в среднем на 15 км/ч.

Влияние регулировок левого и правого двигателей на изменение характеристик крейсерской скорости

Как видно из табл. 1, увеличение скоростей крейсерского полёта, как правило, связано и с увеличением градиентов набора высоты и с увеличением скороподъёмности в наборе (уменьшению времени набора), таким образом, путём регулировки расходов топлива возможно добиться существенного увеличения всех основных ЛТХ [6]. Также в ходе работ по контролю основных лётных характеристик в эксплуатации был выявлен следующий момент: скорости крейсерского полёта в основном изменяются при изменении мощности левого (первого) двигателя, а для улучшения характеристик набора высоты следует в первую очередь увеличивать мощность правого (второго) двигателя. Это связано с влиянием обдувки крыла на различных углах атаки: набор высоты, как правило, выполняется на больших углах, крейсерский полёт – на меньших. Такое положение подтверждается наличием более значимых коэффициентов корреляции расходов топлива левого двигателя с величиной крейсерской скорости, чем правого, и почти в два раза большими коэффициентами регрессии (табл. 6).

Таблица 6

Коэффициенты корреляции и регрессии для расходов топлива

Тип ВС	Кол-во измерений	Мат. ожидание ΔV	Стандартное отклонение ΔV	Коэффициенты корреляции результатов оценивания ΔV с					Коэффициенты регрессии ΔV	
				ΔT	$M_{\text{пол}}$	$H_{\text{ист}}$	$Q_{\text{топ1}}$	$Q_{\text{топ2}}$	$Q_{\text{топ1}}$	$Q_{\text{топ2}}$
Ан-24	614	–27	19,0	–0,19	–0,14	0,15	0,27	0,22	0,21	0,12
Ан-26	310	+2	15,6	–0,26	0,15	0,16	0,35	0,23	0,24	0,17

Регулировки расходов топлива и изменение настройки температуры начала срезки топлива – процедуры, описанные в регламенте технического обслуживания, и поэтому легко могут быть выполнены в эксплуатации. Однако существует еще одна система, относящаяся к силовой установке и влияющая на изменение мощности двигателей самолётов Ан-24 и Ан-26. Это так называемый автомат дозирования топлива – АДТ. Его назначение – изменять часовой расход топлива по мере изменения плотности воздуха с изменением высоты и температуры, поддерживая оптимальный состав газозоудшной смеси. Регулирование АДТ относится к числу заводских настроек, однако отдельные неисправности системы подачи воздуха в АДТ могут вполне быть устранены в эксплуатации. К этим недостаткам относятся засорение трубопроводов и скопления влаги в магистрали подвода воздуха от приёмника воздушного давления до баростата АДТ, засорение воздушного фильтра АДТ. На возможность таких дефектов в системе указывает величина изменения расхода топлива номинального режима при наборе высоты [7]. При нормально работающей системе АДТ уменьшение часового расхода от высоты 2000 м до 6000 м должно быть около 200 кг/ч. Если изменение расхода с высотой больше, то для отрегулированного на земле двигателя на высоте крейсерского полёта расход топлива (и соответственно мощность) окажется меньше нормируемого. Если расход меньше меняется с высотой, или почти не изменяется – то в систему АДТ не поступает информация об изменении давления и температуры от баростата, и мощность на высоте крейсерского полёта уменьшится из-за неполного сгорания топлива. Выполнение рекомендаций по промывке или замене воздушного фильтра, продувке трубопроводов

и влагоотстойника магистрали подвода воздуха от приёмника воздушного давления до баростата в ряде случаев позволило существенно улучшить лётные характеристики самолётов Ан-24 и Ан-26 именно за счёт улучшения работы баростата.

Заключение

Для количественной оценки эффективности разработанных рекомендаций по регулировке двигателей самолётов Ан-24 авторами статьи были проанализированы результаты оценки ЛТХ до и после выполнения рекомендованных работ 22 экземпляров ВС в период 2020–2025 гг. На основе данных 63 заключений о соответствии основных лётных характеристик типовым и дополнений к ним установлено, что крейсерские скорости после выполнения рекомендаций, данных в заключениях, на номинальном режиме работы двигателей увеличились в среднем на 28 км/ч, а на крейсерском режиме работы двигателей – на 25 км/ч.

Также авторами статьи на основе статистических данных проведена количественная оценка улучшения скоростей крейсерского полёта и времени набора высоты самолётов Ан-24 в течение последних 15 лет (с 2007–2009 гг. по 2022–2025 гг.). Результаты оценки приведены на рис. 4, рис. 5 и в табл. 7.

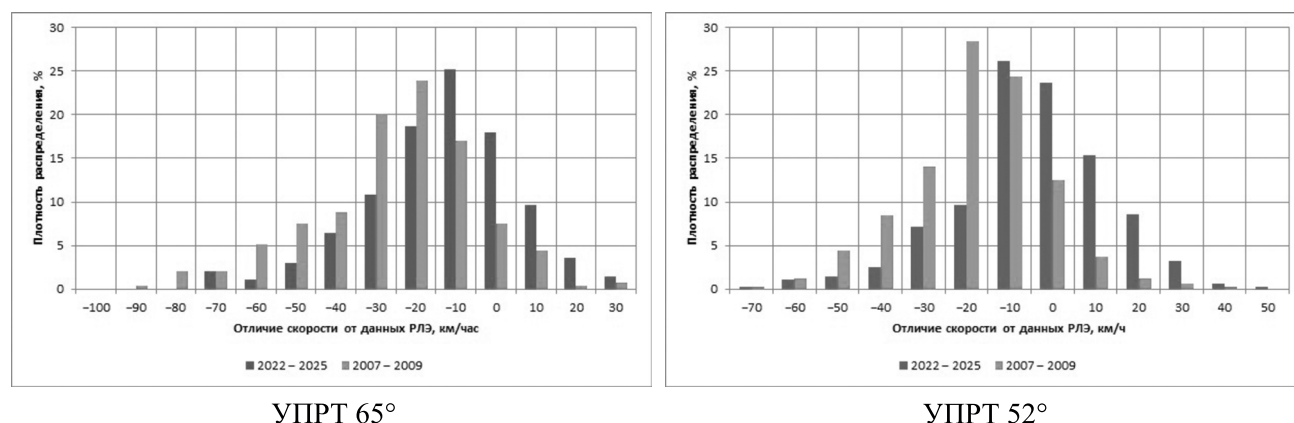


Рис. 4. Изменение распределения оценок скоростей крейсерского полёта самолётов Ан-24РВ на номинальном (УПРТ 65°) и крейсерском (УПРТ 52°) режиме работы двигателей

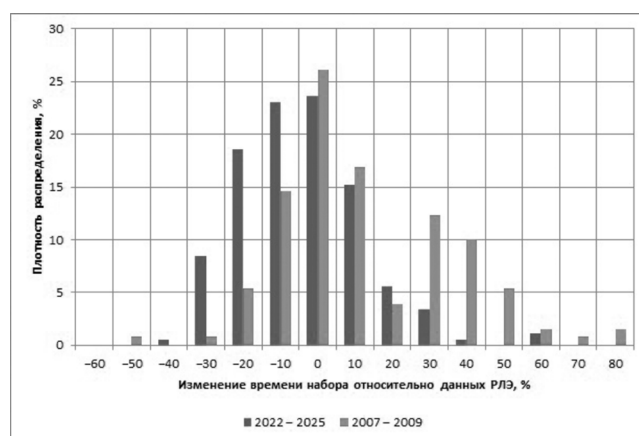


Рис. 5. Изменение распределения оценок времени набора высоты самолётов Ан-24РВ

Из табл. 7 видно, что разработанные в процессе исследования основных лётных характеристик самолётов Ан-24 в эксплуатации рекомендации позволили в течение последних 15 лет

существенно улучшить среднестатистические характеристики парка самолётов, добившись как увеличения скоростей полёта, так и уменьшения времени набора высоты за счёт увеличения скороподъёмности.

Таблица 7

Изменения среднестатистических ЛТХ в период с 2007–2009 гг. по 2022–2025 гг.

Параметр	2007–2009	2022–2025	Изменение
Максимальная скорость на крейсерском режиме работы двигателей (УПРТ = 52°), км/ч	–23,3	–9,7	Увеличилась на 13,6 км/ч
Максимальная скорость на номинальном режиме работы двигателей (УПРТ = 65°), км/ч	–30	–18,6	Увеличилась на 11,4 км/ч
Время набора высоты относительно РЛЭ, %	5,9 %	–9,0 %	Сократилось на 14,9 %

Таким образом, на примере самолёта Ан-24 показано, что, анализируя результаты оценивания характеристик всего парка эксплуатируемых самолётов, можно разрабатывать эффективные рекомендации по поддержанию лётной годности ВС.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников

1. Остославский И. В. Аэродинамика самолёта. Москва: Государственное издательство оборонной промышленности, 1957. 562 с.
2. Руководство по лётной эксплуатации самолёта Ан-24 (Ан-24РВ). Москва: Воздушный транспорт, 1995. 538 с.
3. Руководство по лётной эксплуатации самолёта Ан-26. Москва: Воздушный транспорт, 1992. 506 с.
4. Авиационный турбовинтовой двигатель Аи-24 2-й серии. Инструкция по эксплуатации и техническому обслуживанию. Ростов-на Дону: АНТЦ «Технолог», 2004. 441 с.
5. Авиационный турбовинтовой двигатель Аи-24ВТ. Руководство по эксплуатации и техническому обслуживанию. Ростов-на Дону: АНТЦ «Технолог», 2005. 414 с.
6. Масленникова Г. Е. Контроль основных лётных характеристик в процедуре поддержания лётной годности // Сборник научных трудов ГосНИИ ГА. 2008. № 310. С. 104–109.
7. Масленникова Г. Е., Дмитриева С. В., Тажетдинов Р. Р. Связь изменения скороподъёмности и крейсерской скорости самолётов Ан-24 с работой автомата дозирования топлива // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 44. С. 31–38.

References

1. Ostoslavskiy I. V. *Aerodynamics of the aircraft*. Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo oboronnoy promyshlennosti, 1957, 562 p. (In Russ.)
2. Flight manual for An-24 (An-24RV) aircraft. Moscow, Vozdushnyy transport Publ., 1995, 538 p. (In Russ.)
3. Flight manual for An-26. Moscow, Vozdushnyy transport Publ., 1992, 506 p. (In Russ.)
4. Aviation turboprop engine Ai-24 2 series. Operating and maintenance instructions. Rostov-on-Don, ANTTs "Tekhnolog" Publ., 2004, 441 p. (In Russ.)

5. Aviation turboprop engine Ai-24VT. Operation and maintenance manual. Rostov-on-Don, ANTTs “Tekhnolog” Publ., 2005, 414 p. (In Russ.)
6. Maslennikova G. E. Control of basic flight characteristics in the procedure for maintaining airworthiness. *Collection of scientific works of the State Research Institute of Civil Aviation*, 2008, vol. 310, pp. 104–109. (In Russ.)
7. Maslennikova G. E., Dmitrieva S. V., Tazhetdinov R. R. Connection of change in lift rate and cruise speed of An-24 aircraft with operation of fuel metering machine. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2023, no. 44, pp. 31–38. (In Russ.)

Информация об авторах

Масленникова Галина Евгеньевна, доктор технических наук, профессор кафедры, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия, maslennikova_ge@mail.ru

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

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

Authors information

Maslennikova Galina E., Doctor of Sciences (Engineering), Professor of Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia, maslennikova_ge@mail.ru

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

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

*Статья поступила редакцию 12.05.2025; одобрена после рецензирования 11.06.2025; принята к публикации 20.06.2025.
The article was submitted 12.05.2025; approved after reviewing 11.06.2025; accepted for publication 20.06.2025.*

Научная статья
УДК 656.7.052

ОЦЕНКА РИСКА КАТАСТРОФ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ РОССИЙСКИХ ПРАВИЛ ПРОДОЛЬНОГО ЭШЕЛОНИРОВАНИЯ, ОСНОВАННЫХ НА ВРЕМЕНИ

Е. В. ШУВАЛОВА, С. В. КУЗНЕЦОВ, В. Б. СПРЫСКОВ

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. Применение правил продольного эшелонирования, основанных на времени, объективно порождает риск катастроф эшелонируемых воздушных судов (ВС), так как интервалы между ВС заданы детерминировано, а положения ВС в пространстве в силу навигационного характера движения и других причин случайные. Среди других причин рассмотрены эксплуатационная готовность и непрерывность обеспечения функций систем навигации, связи и организации воздушного движения. В статье показано, как учесть навигационный характер движения ВС и факторы безопасности, связанные с надёжностью систем обеспечения воздушного движения в моделях оценки технического и полного рисков катастроф при применении российских правил процедурного эшелонирования. Исследования, выполненные в статье, в полном объёме показали наличие и смысл навигационного парадокса в воздушной навигации.

Ключевые слова: аэронавигация, воздушное судно, обслуживание воздушного движения, правила эшелонирования, продольное эшелонирование, процедурное эшелонирование, риск катастроф, эксплуатация авиационной техники

Для цитирования: Шувалова Е. В., Кузнецов С. В., Спрысков В. Б. Оценка риска катастроф воздушных судов при применении российских правил продольного эшелонирования, основанных на времени // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 50. С. 62–72.

RISK ASSESSMENT OF AIRCRAFT CATASTROPHES WHEN APPLYING RUSSIAN TIME-BASED LONGITUDINAL SEPARATION RULES

E. V. SHUVALOVA, S. V. KUZNETSOV, V. B. SPRYSKOV

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

Abstract. The application of time-based longitudinal separation rules objectively generates a risk of accidents of separated aircraft (AC), since the intervals between AC are set deterministically, and the positions of AC in space are random due to the navigation nature of the movement and other reasons. Among other reasons, the operational readiness and continuity of the functions of navigation, communication and air traffic management systems are considered. The article shows how to take into account the navigation nature of the AC movement and safety factors associated with the reliability of air traffic support systems in models for assessing the technical and total risks of accidents when applying Russian procedural separation rules. The studies carried out in the article fully demonstrated the presence and meaning of the navigation paradox in air navigation.

Keywords: aeronavigation, aircraft, air traffic service, separation rules, longitudinal separation, procedural separation, collision risk, operation of aircraft

For citation: Shuvalova E. V., Kuznetsov S. V., Spryskov V. B. Risk assessment of aircraft catastrophes when applying Russian time-based longitudinal separation rules. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2025, no. 50, pp. 62–72. (In Russ.)

Введение

Существуют правила горизонтального эшелонирования воздушных судов (ВС) в горизонтальной плоскости, основанные как на обеспечении минимальных линейных горизонтальных интервалов между ВС при использовании информации системы наблюдения, так и на обеспечении минимальных временных продольных интервалов при полётах ВС по правилам полётов по приборам без использования системы наблюдения обслуживания воздушного движения (ОВД)¹. Правило № 77 устанавливает следующие российские минимальные временные продольные интервалы:

«1. Между воздушными судами, следующими в одном эшелоне (высоте) в попутном направлении:

- при районном диспетчерском обслуживании и (или) диспетчерском обслуживании подхода – 10 мин;
- при аэродромном диспетчерском обслуживании при выполнении манёвра захода на посадку – 3 мин;

2. При пересечении попутного эшелона (высоты), занятого другим воздушным судном, – 10 мин. в момент пересечения;

3. При пересечении встречного эшелона (высоты), занятого другим воздушным судном, – 20 мин в момент пересечения;

4. Между воздушными судами, следующими по пересекающимся маршрутам (при углах пересечения от 45° до 135° и от 225° до 315°) на одном эшелоне (высоте), – 15 мин в момент пересечения».

Применение указанного правила (№ 77) на практике объективно порождает риск катастроф ВС, так как интервалы между ВС заданы детерминировано, а положения ВС в пространстве в силу навигационного характера движения и других причин случайные.

Объективные факторы, влияющие на безопасность применения правил продольного процедурного эшелонирования, и их возможные состояния

Правила продольного процедурного эшелонирования осуществляют диспетчеры управления воздушного движения (УВД) в соответствии с установленной технологией работы и экипажи ВС посредством двусторонней авиационной связи «Диспетчер – Экипаж». Поэтому объективные факторы, влияющие на безопасность воздушного движения при процедурном эшелонировании, связаны как с системами навигации (N) и связи (C), так и со службой УВД (АТМ). Состояния систем N, C и АТМ во время выполнения процедуры обеспечения минимального продольного интервала, основанного на времени ($T_{\min}=3; 10; 15$ и 20 минут), могут находиться как в готовом ($A_N, A_C, A_{\text{АТМ}}$) состоянии (без отказа систем N, C и АТМ) [1], так и в состоянии отказа (неработоспособном – $Cont_N, Cont_C, Cont_{\text{АТМ}}$), или в любом промежуточном состоянии. Итак, три системы обеспечения безопасности при процедурном продольном эшелонировании и возможные состояния их работоспособности объективно порождают следующие возможные состояния факторов безопасности.

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

Полностью работоспособное состояние систем (N, C, ATM) при выполнении минимума $T_{\min}$.

Состояние № 1: вероятность такого состояния равна произведению готовностей A_N , A_C , A_{ATM} , то есть практически равна 1 [1]. Риск катастроф при процедурном эшелонировании ВС при таком состоянии систем представляет собой технический риск [2].

Частично работоспособное состояние при отказе одной системы обеспечения процедурного эшелонирования.

Состояние № 2: отказ навигационной системы N. Состояния систем C и ATM – без отказа. Вероятность такого состояния равна $Cont_N A_C A_{ATM}$, то есть практически равна величине эксплуатационной непрерывности $Cont_N$.

Состояние № 3: отказ связи (C) при работоспособном состоянии навигации и УВД (N и ATM). Вероятность такого состояния равна $Cont_C A_N A_{ATM}$, то есть практически равна величине непрерывности связи $Cont_C$.

Состояние № 4: ошибочные действия или бездействие службы УВД при выполнении процедуры продольного эшелонирования без использования информации системы наблюдения ОВД при безотказных состояниях систем N и C. Вероятность такого состояния равна $Cont_{ATM} A_N A_C$, то есть практически равна величине эксплуатационной непрерывности службы УВД $Cont_{ATM}$.

Частично работоспособное состояние при одновременном отказе двух систем и безотказном состоянии какой-либо третьей системы обеспечения продольного эшелонирования.

Состояние № 5: отказ навигации (N) и связи (C). Вероятность такого состояния равна $Cont_N Cont_C A_{ATM}$, то есть имеет порядок 10^{-5} – 10^{-6} .

Состояние № 6: отказ навигации (N) и УВД (ATM). Система связи (C) без отказа. Вероятность такого состояния равна $Cont_N Cont_{ATM} A_N$, то есть имеет порядок 10^{-5} – 10^{-6} .

Состояние № 7: отказ связи (C) и УВД (ATM). Система навигации N без отказа. Вероятность такого состояния равна $Cont_C Cont_{ATM} A_N$, то есть имеет порядок 10^{-5} – 10^{-6} .

Другие сочетания из двух отказавших систем в трёх рассматриваемых системах формально существуют, но по сути совпадают с уже описанными.

Полностью неработоспособное состояние систем обеспечения продольного эшелонирования на основе временных минимальных интервалов.

Состояние № 8: Такое состояние является практически нереализуемым, так как вероятность такого состояния равна $Cont_N Cont_C Cont_{ATM}$ и имеет порядок менее чем 10^{-8} – 10^{-9} .

Формализация вероятности горизонтального перекрытия (НОР) эшелонируемых ВС для установленных состояний систем обеспечения процедурного эшелонирования

Ранее было указано, что объективной причиной возникновения риска катастроф при процедурном эшелонировании является случайная природа положения ВС в пространстве, связанная с навигационными отклонениями ВС от намеченной траектории. Помимо фактора навигации (N) на риск объективно влияют факторы связи (C) и УВД (ATM).

Для формализации вероятностей горизонтального перекрытия ВС при эшелонировании будем следовать следующим допущениям:

а. Полёты ВС при аэродромном диспетчерском обслуживании выполняются с навигационными спецификациями RNP2 и/или RNP1 и/или с более точными спецификациями со скоростью 400 км/час.

б. Полёты ВС при районном диспетчерском обслуживании и диспетчерском обслуживании подхода выполняются с навигационными спецификациями RNP4 и/или RNP1 со скоростью 820 км/час.

с. При работоспособных системах ATM и связи (C) расчёт вероятности горизонтального перекрытия выполняется для ситуации, в которой временной интервал между ВС строго равен минимальному безопасному временному интервалу $T_{\min}$.

d. При отказе навигации дисперсия отклонения ВС относительно плановой траектории увеличивается в 4 раза, а среднеквадратическое отклонение удержания – в 2 раза.

e. Навигационные погрешности удержания ВС являются непрерывными случайными величинами, имеющими либо гауссовскую (G), либо двустороннюю экспоненциальную (DE) плотности вероятности. Связь плотностей G или DE с навигационными спецификациями RNP подробно описана в [1].

f. При неработоспособности состояний УВД (АТМ) или связи (С) фактический временной интервал между ВС на одной высоте (эшелоне) в момент пересечения с равной вероятностью принимает любые значения в диапазоне $[0, T_{\min}]$.

Введённые допущения позволяют формализовать вероятности горизонтального перекрытия ВС $HOP(S_{\min})$ для всех восьми состояний систем N, С, АТМ, обеспечивающих процедурное эшелонирование.

Для работоспособного состояния систем N, С, АТМ вероятность горизонтального эшелонирования [1]

$$HOP(S_{\min}) = 2l_x C(S_{\min}), \quad (1)$$

где l_x – продольный размер эшелонируемых ВС; $S_{\min} = W/T_{\min}$ – минимальный линейный интервал между ВС, соответствующий $T_{\min}$ и скорости W полёта ВС; $C(S_{\min})$ – плотность вероятности перекрытия ВС в горизонтальной плоскости при плановом разделении ВС, равном $S_{\min}$:

$$C(S_{\min}) = \int_{-\infty}^{\infty} f_{RNP}(x) f_{RNP}(x - S_{\min}) dx. \quad (2)$$

Подробные сведения о плотности $C(S_{\min})$ применительно к горизонтальному эшелонированию ВС с использованием информации системы наблюдения ОВД представлены в [3]. Гауссовская плотность вероятности перекрытия ВС равна

$$C_{RNP}^G(S_{\min}) = \frac{1}{\sigma_{PBN_G} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{S_{\min}^2}{2\sigma_{PBN_G}^2}\right), \quad (3)$$

где [4]:

$$\sigma_{PBN_G}^2 = \sigma_{RNP}^2 + \sigma_{RNP}^2; \quad \sigma_{RNP} = \frac{RNPX \cdot 1,852}{1,96}.$$

При описании навигационных погрешностей, имеющих DE плотность, из (2) следует:

$$C_{RNP}^{DE} = \frac{\exp(-|S_{\min}|/\lambda_{RNP_{DE}})}{4\lambda_{RNP_{DE}}} \left(1 + \left(\frac{|S_{\min}|}{\lambda_{RNP_{DE}}}\right)\right), \quad (4)$$

где [5]:

$$\lambda_{RNP_{DE}} = \frac{RNPX \cdot 1,852}{-\ln(0,05)}.$$

Для частично работоспособного состояния:

- при отказе навигации в работоспособных системах АТМ и С вероятность горизонтального перекрытия оценивают по формулам (1)–(4), но с учётом того, что согласно гипотезе b) дисперсия навигационных погрешностей увеличивается в 4 раза по сравнению с работоспособным состоянием навигации;

- при отказе связи (С) и работоспособном состоянии навигации (N) и УВД (АТМ), так же, как и при отказе УВД (АТМ) и работоспособном состоянии навигации (N) и связи (С), невозможно оценить конкретную вероятность $HOP(S_{\min})$, так как при указанных состояниях, согласно гипотезе d), минимальный временной интервал между ВС в момент пересечения может с равной вероятностью принимать значения из интервала $[0, T_{\min}]$. Таким образом, при отказах связи или

УВД следует говорить о средней вероятности горизонтального перекрытия $\overline{HOP}(\widehat{SS})$, где величина $\widehat{SS}$ – максимальная линейная дистанция при неконтролируемом сближении ВС в процессе продольного процедурного эшелонирования. При получении формулы $\overline{HOP}(\widehat{SS})$ для разных типов плотностей вероятности навигационных отклонений (G и DE) необходимо (3) и (4) усреднить на интервале $(0, \widehat{SS})$ по плотности $f(s)=1/\widehat{SS}$, $0 \leq s \leq \widehat{SS}$. Получим:

$$C_{\text{RNP}}^G(\widehat{SS}) = \int_0^{\widehat{SS}} \frac{1}{\widehat{SS}} \frac{1}{\sigma_{\text{PBN}_G} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{s^2}{2\sigma_{\text{PBN}_G}^2}\right) ds; \quad (5)$$

$$C_{\text{RNP}}^{DE}(\widehat{SS}) = \int_0^{\widehat{SS}} \frac{1}{\widehat{SS}} \frac{\exp(-s^2/\lambda_{\text{PBN}_{DE}})}{4\lambda_{\text{PBN}_{DE}}} \left(1 + \frac{s}{\lambda_{\text{PBN}_{DE}}}\right) ds. \quad (6)$$

Средняя вероятность горизонтального перекрытия по аналогии с (1) будет равна:

$$\overline{HOP}_{\text{RNP}}^G(\widehat{SS}) = 2I_x C_{\text{RNP}}^G(\widehat{SS}); \quad (7)$$

$$\overline{HOP}_{\text{RNP}}^{DE}(\widehat{SS}) = 2I_x C_{\text{RNP}}^{DE}(\widehat{SS}). \quad (8)$$

Для условно работоспособного состояния при отказе сразу двух систем и работоспособном состоянии одной из трёх систем обеспечения процедурного эшелонирования используется комбинация уже введённых формул.

При одновременном отказе навигации и связи или навигации и УВД используются формулы (7) и (8), но с удвоенным значением среднеквадратической погрешности. В полном балансе рисков необходимо учитывать как среднюю вероятность горизонтального перекрытия при одновременном отказе навигации и связи, так и среднюю вероятность горизонтального перекрытия при отказе навигации и УВД.

Для полностью неработоспособного состояния при отказе всех систем обеспечения процедурного эшелонирования вероятность горизонтального перекрытия оценивается как средняя, но с дисперсией навигационных погрешностей в 4 раза большей по сравнению с дисперсией навигации без отказа.

Формализация риска катастроф ВС при выполнении процедуры продольного эшелонирования с использованием минимальных безопасных временных интервалов эшелонирования

Столкновение эшелонируемых ВС происходит не в горизонтальной плоскости, а в пространстве. Поэтому вероятность горизонтального перекрытия эшелонируемых ВС необходимо умножить на вероятность вертикального перекрытия P_z . Будем для этой цели использовать подход, изложенный в [1].

Вероятность столкновения ВС оценивается исключительно при выполнении процедуры эшелонирования ВС, когда ВС сблизились на предельно допустимый интервал. Если ВС не сближаются на предельно допустимый интервал, то не используется процедура их эшелонирования. Пусть F [1/лётн. ч] – частота применения процедуры эшелонирования в некоторой зоне ответственности. Например, объём обслуженного воздушного движения в некоторой зоне ответственности системы УВД равен 1000 лётн. ч (1000 ВС в среднем по 1 часу обслуживания). Если процедуру эшелонирования применить 1 раз, то $F=0,001$ 1/лётн. ч.

Если F умножить на $\overline{HOP} P_z$, то получим оценку *риска столкновения* в рассматриваемой зоне ответственности УВД. Для того чтобы получить риск безопасности в принятых в Российской

Федерации единицах безопасности полётов, необходимо риск столкновений умножить на 2 (одно столкновение – две катастрофы). Наконец, для того чтобы оценить полный риск катастроф при выполнении продольного процедурного эшелонирования, необходимо найти сумму рисков всех восьми состояний систем обеспечения эшелонирования с учётом вероятностей пребывания этих систем в указанных состояниях:

$$Risk_{RNP}^{N,C,ATM \in A} \left(\frac{w}{T_{\min}} \right) = 2F_{-T_{\min}} P_{z-T_{\min}} HOP_{RNP} \left(\frac{w}{T_{\min}} \right) A_N A_C A_{ATM}, \quad (9)$$

где $HOP_{RNP}(w/T_{\min})$ оценивают либо с использованием (3), либо с использованием (4);

$$Risk_{RNP}^{N \in Cont; C, ATM \in A} \left(\frac{w}{T_{\min}} \right) = 2F_{-T_{\min}} P_{z-T_{\min}} HOP_{RNP \uparrow 2} \left(\frac{w}{T_{\min}} \right) Cont_N A_C A_{ATM}, \quad (10)$$

где $HOP_{RNP \uparrow 2}(w/T_{\min})$ вычисляют либо с использованием (3), либо с использованием (4), но с увеличением в 2 раза параметром СКО погрешности навигации;

$$Risk_{RNP}^{N \in A, C \text{ or } ATM \in Cont} \left(\frac{w}{T_{\min}} \right) = 2F_{-T_{\min}} P_{z-T_{\min}} \overline{HOP}(\widehat{SS}) A_N A_C Cont_{ATM} + \\ + 2F_{-T_{\min}} P_{z-T_{\min}} \overline{HOP}(\widehat{SS}) A_N Cont_C A_{ATM}, \quad (11)$$

где $\overline{HOP}(\widehat{SS})$ – средняя вероятность горизонтального перекрытия по интервалу $(0, \widehat{SS})$ ($\widehat{SS} = w/T_{\min}$); $HOP(\widehat{SS})$ вычисляют либо с применением (7), либо с использованием (8);

$$Risk_{RNP}^{N, C \in Cont \text{ or } N, ATM \in Cont} \left(\frac{w}{T_{\min}} \right) = 2F_{-T_{\min}} P_{z-T_{\min}} \overline{HOP}_{RNP \uparrow 2}(\widehat{SS}) A_{ATM} Cont_N Cont_C + \\ + 2F_{-T_{\min}} P_{z-T_{\min}} \overline{HOP}_{RNP \uparrow 2}(\widehat{SS}) A_C Cont_N Cont_{ATM}, \quad (12)$$

где $\overline{HOP}_{RNP \uparrow 2}(\widehat{SS})$ оценивают с использованием (7) или (8), но с увеличенным в 2 раза параметром СКО погрешности навигации;

$$Risk_{RNP}^{N \in A, C \text{ or } ATM \in Cont} \left(\frac{w}{T_{\min}} \right) = 2F_{-T_{\min}} P_{z-T_{\min}} \overline{HOP}(\widehat{SS}) A_N Cont_{ATM} Cont_C, \quad (13)$$

где $\overline{HOP}(\widehat{SS})$ совпадает по смыслу с описанием, относящимся к состояниям 3 и 4.

$$Risk_{RNP}^{N, C, ATM \in Cont} \left(\frac{w}{T_{\min}} \right) = 2F_{-T_{\min}} P_{z-T_{\min}} \overline{HOP}_{RNP \uparrow 2}(\widehat{SS}) Cont_N Cont_C Cont_{ATM}, \quad (14)$$

где $\overline{HOP}_{RNP \uparrow 2}(\widehat{SS})$ совпадает по смыслу с описанием, относящимся к состояниям 5 и 6.

Полный риск катастроф ВС при использовании процедуры продольного эшелонирования ВС на основании обеспечения минимальных временных интервалов равен сумме рисков, оценённых по формулам (9)–(14). Технический риск оценивается по формуле (9). По аналогии с [5] будем полагать, что технический риск не должен превосходить величины $TLS_{tech} = 5 \cdot 10^{-10}$ 1/лётн. ч, а полный риск не должен превосходить величины $TLS_{total} = 5 \cdot 10^{-9}$ 1/лётн. ч.

Оценки рисков катастроф при продольном эшелонировании ВС с использованием минимальных временных интервалов

Оценки рисков при аэродромном диспетчерском обслуживании.

В Российской Федерации в этом случае установлен интервал $T_{\min} = 3$ мин. Согласно допущению а) при расчётах риска будем назначать навигационную спецификацию RNP2 и/или RNP1 при путевых скоростях ВС, равных 400 км/ч. Для коэффициентов эксплуатационной

готовности по аналогии с [5] выберем значение $A_N=A_C=A_{ATM}=0,997$ [1/ч] (готовность без резервирования). Для коэффициентов эксплуатационной непрерывности возьмём значение $Cont_N=Cont_C=Cont_{ATM}=3\cdot 10^{-3}$ [1/ч]. Это значение отказа системы без резервирования. При резервировании систем С и/или АТМ значения A и $Cont$ будут соответственно равны:

$$A_C=A_{ATM}=0,999991 \text{ [1/ч];}$$

$$Cont_C=Cont_{ATM}=9\cdot 10^{-6} \text{ [1/ч].}$$

По аналогии с [6] назначим величину $P_{z-3}=0,4$ (оба ВС не меняют высоту полёта). Для частоты применения минимума $T_{min}=3$ мин назначим величину $0,01$ ($F_{z-3}=0,01$ [1/лётн. ч.]), которая меньше аналогичной величины для эшелонирования с применением информации системы наблюдения ОВД, но имеет тот же порядок малости. Средний размер эшелонируемого ВС l_x установим на уровне 50 м ($l_x=0,05$ км). Расчёты рисков, оценённые с использованием моделей (9)–(13), помещены в табл. 1.

Таблица 1

Риски катастроф ВС [1/лётн. ч] при процедурном продольном эшелонировании в зоне аэродрома в зависимости от состояния систем (N, C, АТМ), уровня их резервирования, вероятностного типа погрешностей навигации и уровня спецификации N, при $W=400$ км/ч, $P_{z-3}=0,4$, частоты использования процедуры эшелонирования $F_{z-3}=0,01$ [1/лётн. ч.] и размера ВС $l_x=0,05$ км

Состояние систем N, C, АТМ		Состояние резервирования систем			
		Без резервирования C и АТМ		Двойное резервирование C и АТМ	
Навигационная спецификация	Тип погрешности	RNP1	RNP2	RNP1	RNP2
1. Без отказов N, C, АТМ	DE	$9,5299\cdot 10^{-17}$	$2,5993\cdot 10^{-10}$	$9,5872\cdot 10^{-17}$	$2,6149\cdot 10^{-10}$
	G	$5,3931\cdot 10^{-53}$	$8,1765\cdot 10^{-17}$	$5,4256\cdot 10^{-53}$	$8,2257\cdot 10^{-17}$
2. Отказ N или C; АТМ без отказа	DE	$7,8214\cdot 10^{-13}$	$6,7345\cdot 10^{-10}$	$7,8684\cdot 10^{-13}$	$6,7749\cdot 10^{-10}$
	G	$2,4603\cdot 10^{-19}$	$1,6233\cdot 10^{-10}$	$2,4751\cdot 10^{-19}$	$1,6331\cdot 10^{-10}$
3(4). Отказ C или АТМ; N без отказа (суммарно)	DE	$1,1928\cdot 10^{-7}$	$1,1928\cdot 10^{-7}$	$3,5892\cdot 10^{-10}$	$3,5892\cdot 10^{-10}$
	G	$1,1928\cdot 10^{-7}$	$1,1928\cdot 10^{-7}$	$3,5892\cdot 10^{-10}$	$3,5892\cdot 10^{-10}$
5(6). Отказ N и C или N и АТМ; АТМ или C без отказов (суммарно)	DE	$3,5892\cdot 10^{-10}$	$3,5836\cdot 10^{-10}$	$1,0800\cdot 10^{-12}$	$1,0783\cdot 10^{-12}$
	G	$3,5892\cdot 10^{-10}$	$3,5836\cdot 10^{-10}$	$1,0800\cdot 10^{-12}$	$1,0798\cdot 10^{-12}$
7. Отказ C и АТМ; N без отказа	DE	$1,7946\cdot 10^{-10}$	$1,7946\cdot 10^{-10}$	$1,6151\cdot 10^{-15}$	$1,6151\cdot 10^{-15}$
	G	$1,7946\cdot 10^{-10}$	$1,7946\cdot 10^{-10}$	$1,6151\cdot 10^{-15}$	$1,6151\cdot 10^{-15}$
8. Полный отказ N, C, АТМ	DE	$5,4000\cdot 10^{-13}$	$5,3916\cdot 10^{-13}$	$4,8600\cdot 10^{-18}$	$4,6800\cdot 10^{-18}$
	G	$5,4000\cdot 10^{-13}$	$5,3990\cdot 10^{-13}$	$4,8600\cdot 10^{-18}$	$4,8600\cdot 10^{-18}$
Полный суммарный риск	DE	$1,2036\cdot 10^{-7}$	$1,2075\cdot 10^{-7}$	$3,6000\cdot 10^{-10}$	$1,2990\cdot 10^{-9}$
	G	$1,2036\cdot 10^{-7}$	$1,1998\cdot 10^{-7}$	$3,6000\cdot 10^{-10}$	$5,2331\cdot 10^{-10}$

В третьей и четвёртой колонках показаны оценки рисков без резервирования C и АТМ (одна радиостанция и один диспетчер УВД на канале). Очевидно, что без резервирования связи

и УВД в аэродромной зоне применять эшелонирование с $T_{\min}=3$ мин опасно, так как полный риск существенно больше $TLS_{total}=5 \cdot 10^{-9}$ 1/лётн. ч.

Резервирование связи и УВД позволяет безопасно использовать эшелонирование с $T_{\min}=3$ мин в аэродромной зоне, так как общий риск становится заметно меньше TLS_{total} .

Оценки рисков при процедурном продольном эшелонировании с использованием минимальных интервалов $T_{\min}=10$ мин; 15 мин; 20 мин.

Минимальные временные интервалы 10 мин; 15 мин; 20 мин в Российской Федерации установлены для районного диспетчерского обслуживания и диспетчерского обслуживания подхода.

Таблица 2

Риски катастроф ВС [1/лётн. ч] при процедурном продольном эшелонировании на маршруте и подходе для $T_{\min}=10$ мин, 15 мин, 20 мин в зависимости от состояния систем (N, C, ATM) для RNP4, P_z и частот использования процедуры горизонтального эшелонирования F [1/лётн. ч], при $W=820$ км/ч и $l_x=0,05$ км

Состояние систем N, C, ATM		Системы N, C, ATM – без резерва			
		Навигационная спецификация: RNP4			
Минимумы эшелонирования, вероятности P_z и частота F	Тип погрешности	$T_{\min}=10$ мин, $P_{z_{10}}=0,4$, $F_{10,0,4}=0,0008$	$T_{\min}=10$ мин, $P_{z_{10}}=0,11$, $F_{10,0,11}=0,0006$	$T_{\min}=15$ мин, $P_{z_{15}}=0,4$, $F_{15}=0,001$	$T_{\min}=20$ мин, $P_{z_{20}}=0,11$, $F_{20}=0,0001$
1. Без отказов N, C, ATM	DE	$3,5907 \cdot 10^{-28}$	$7,4058 \cdot 10^{-29}$	$6,6766 \cdot 10^{-40}$	$2,4349 \cdot 10^{-53}$
	G	$5,2151 \cdot 10^{-148}$	$1,0756 \cdot 10^{-148}$	$1,3129 \cdot 10^{-217}$	$6,8713 \cdot 10^{-230}$
2. Отказ N; C и ATM без отказов	DE	$2,7557 \cdot 10^{-19}$	$5,68371 \cdot 10^{-20}$	$5,1007 \cdot 10^{-25}$	$1,8570 \cdot 10^{-32}$
	G	$2,3074 \cdot 10^{-44}$	$4,7590 \cdot 10^{-45}$	$1,2536 \cdot 10^{-88}$	$2,6971 \cdot 10^{-152}$
3(4). Отказ C или ATM; N без отказа (суммарно)	DE	$1,3965 \cdot 10^{-9}$	$2,8802 \cdot 10^{-10}$	$1,1637 \cdot 10^{-9}$	$2,4002 \cdot 10^{-11}$
	G	$1,3965 \cdot 10^{-9}$	$2,8802 \cdot 10^{-10}$	$1,1637 \cdot 10^{-9}$	$2,4001 \cdot 10^{-11}$
5(6). Отказ N и C или N и ATM; ATM или C без отказов (суммарно)	DE	$4,2020 \cdot 10^{-12}$	$8,6666 \cdot 10^{-13}$	$3,5017 \cdot 10^{-12}$	$7,2222 \cdot 10^{-14}$
	G	$4,2020 \cdot 10^{-12}$	$8,6666 \cdot 10^{-13}$	$3,5017 \cdot 10^{-12}$	$7,2222 \cdot 10^{-14}$
7.Отказ C и ATM; N без отказа	DE	$2,1010 \cdot 10^{-12}$	$4,3333 \cdot 10^{-13}$	$1,7508 \cdot 10^{-12}$	$3,6111 \cdot 10^{-14}$
	G	$2,1010 \cdot 10^{-12}$	$4,3333 \cdot 10^{-13}$	$1,7508 \cdot 10^{-12}$	$3,6111 \cdot 10^{-14}$
8. Полный отказ N, C, ATM	DE	$6,3220 \cdot 10^{-15}$	$1,3039 \cdot 10^{-15}$	$5,2683 \cdot 10^{-15}$	$1,0866 \cdot 10^{-14}$
	G	$6,3220 \cdot 10^{-15}$	$1,3039 \cdot 10^{-15}$	$5,2683 \cdot 10^{-15}$	$1,0866 \cdot 10^{-14}$
Суммарный риск для типа навигационной погрешности	DE	$1,4007 \cdot 10^{-9}$	$2,8932 \cdot 10^{-10}$	$1,1690 \cdot 10^{-9}$	$2,4110 \cdot 10^{-11}$
	G	$1,4007 \cdot 10^{-9}$	$2,8932 \cdot 10^{-10}$	$1,1690 \cdot 10^{-9}$	$2,4110 \cdot 10^{-11}$
Полный суммарный риск				При DE	$2,8831 \cdot 10^{-9}$
				При G	$2,8831 \cdot 10^{-9}$

Выберем в соответствии с допущением а) в качестве навигационных характеристик полёта спецификации RNP4 и RNP10, а в качестве путевой скорости – 820 км/час.

Минимальный временной интервал $T_{\min}=10$ мин установлен как для ВС, движущихся в попутном направлении на одной высоте (при этом $P_{z_{10}}=0,4$), так и для пересечения эшелона полёта другого ВС в попутном направлении для момента пересечения (при этом $P_{z_{10}}=0,11$).

Минимальный временной интервал $T_{\min}=15$ мин установлен для пересекающихся маршрутов при движении ВС на одной высоте, $P_{z-15}=0,4$, а минимальный временной интервал $T_{\min}=20$ мин установлен для пересечения встречного эшелона в момент пересечения, $P_{z-20}=0,11$.

Суммарную частоту применения процедурного эшелонирования возьмём в 4 раза меньше частоты в зоне аэродрома: $F_{\Sigma}=0,01/4=0,0025$ [1/лётн. ч].

В отношении к четырём типам относительного движения эшелонируемых ВС суммарную частоту разделим как:

$$F_{10_0,4}=0,0008 \text{ [1/лётн. ч]}; F_{10_0,11}=0,0006 \text{ [1/лётн. ч]}; \\ F_{15_0,4}=0,001 \text{ [1/лётн. ч]}; F_{20_0,11}=0,0001 \text{ [1/лётн. ч]}.$$

Выберем в качестве среднего размера эшелонируемых ВС величину $l_x=0,05$ км. Расчёты рисков без резервирования систем связи и УВД представлены в табл. 2 (для спецификации RNP4) и табл. 3 (для спецификации RNP10). Использовались выведенные в рамках настоящих исследований модели (9)–(13).

Таблица 3

Риски катастроф ВС [1/лётн. ч] при $T_{\min}=10$ мин, 15 мин, 20 мин в зависимости от состояния (N, C, ATM), для RNP10, для разных P_z и частот использования процедуры горизонтального эшелонирования F [1/лётн. ч], при $W=820$ км/ч и $l_x=0,05$ км

Состояние систем N, C, ATM		Системы N, C, ATM – без резерва			
		Навигационная спецификация: RNP10			
Минимумы эшелонирования, вероятности P_z и частота F	Тип погрешности	$T_{\min}=10$ мин, $P_{z_10}=0,4$, $F_{10_0,4}=0,0008$	$T_{\min}=10$ мин, $P_{z_10}=0,11$, $F_{10_0,11}=0,0006$	$T_{\min}=15$ мин, $P_{z_15}=0,4$, $F_{15}=0,001$	$T_{\min}=20$ мин, $P_{z_20}=0,11$, $F_{20}=0,0001$
1. Без отказов N, C, ATM	DE	$1,4858 \cdot 10^{-14}$	$3,0646 \cdot 10^{-15}$	$4,3476 \cdot 10^{-19}$	$2,5056 \cdot 10^{-25}$
	G	$3,6644 \cdot 10^{-29}$	$7,5578 \cdot 10^{-30}$	$1,8592 \cdot 10^{-57}$	$9,1291 \cdot 10^{-99}$
2. Отказ N; C и ATM без отказов	DE	$7,3647 \cdot 10^{-13}$	$1,5190 \cdot 10^{-13}$	$5,3428 \cdot 10^{-15}$	$7,6844 \cdot 10^{-19}$
	G	$5,9752 \cdot 10^{-15}$	$1,2324 \cdot 10^{-15}$	$5,9616 \cdot 10^{-22}$	$1,8951 \cdot 10^{-33}$
3(4). Отказ N и C или N и ATM; N без отказов	DE	$1,3965 \cdot 10^{-9}$	$2,8802 \cdot 10^{-10}$	$1,1637 \cdot 10^{-9}$	$2,4002 \cdot 10^{-11}$
	G	$1,3965 \cdot 10^{-9}$	$2,8802 \cdot 10^{-10}$	$1,1637 \cdot 10^{-9}$	$2,4002 \cdot 10^{-11}$
5(6). Отказ N и C или N и ATM; ATM или C без отказов (суммарно)	DE	$4,2016 \cdot 10^{-12}$	$8,6657 \cdot 10^{-13}$	$3,5017 \cdot 10^{-12}$	$7,2222 \cdot 10^{-14}$
	G	$4,2016 \cdot 10^{-12}$	$8,6666 \cdot 10^{-13}$	$3,5017 \cdot 10^{-12}$	$7,2222 \cdot 10^{-14}$
7. Отказ C и ATM; N без отказа	DE	$2,1010 \cdot 10^{-12}$	$4,3333 \cdot 10^{-13}$	$1,7508 \cdot 10^{-12}$	$3,6111 \cdot 10^{-14}$
	G	$2,1010 \cdot 10^{-12}$	$4,3333 \cdot 10^{-13}$	$1,7508 \cdot 10^{-12}$	$3,6111 \cdot 10^{-14}$
8. Полный отказ N, C, ATM	DE	$6,3213 \cdot 10^{-15}$	$1,3038 \cdot 10^{-15}$	$5,2683 \cdot 10^{-15}$	$1,0866 \cdot 10^{-16}$
	G	$6,3219 \cdot 10^{-15}$	$1,3039 \cdot 10^{-15}$	$5,2683 \cdot 10^{-15}$	$1,0866 \cdot 10^{-16}$
Суммарный риск	DE	$1,4028 \cdot 10^{-9}$	$2,8947 \cdot 10^{-10}$	$1,1690 \cdot 10^{-9}$	$2,6110 \cdot 10^{-11}$
	G	$1,4007 \cdot 10^{-9}$	$2,8932 \cdot 10^{-10}$	$1,1690 \cdot 10^{-9}$	$2,6110 \cdot 10^{-11}$
Полный суммарный риск				При DE	$2,8826 \cdot 10^{-9}$
				При G	$2,8811 \cdot 10^{-9}$

Заключение

В Российской Федерации установлены безопасные минимальные интервалы по времени, используемые для продольного процедурного эшелонирования.

В аэродромной зоне для обеспечения безопасности процедурного эшелонирования необходимо и достаточно иметь две радиостанции и не менее двух диспетчеров УВД на канале управления.

Точность навигационной спецификации RNP влияет только на технический риск. Утвержденные в Российской Федерации спецификации RNP для маршрута, подхода и маневрирования в аэродромной зоне с большим запасом обеспечивают безопасный технический риск.

Аналитическая форма записи навигационных погрешностей спецификаций RNP практически не влияет на риски при отказах систем (АТМ, С и/или N).

Этот результат является следствием действия навигационного парадокса, выявленного в рамках настоящих исследований: средняя вероятность горизонтального перекрытия эшелонируемых ВС с минимальными интервалами от 0 до $S_{\min}$ не зависит от аналитической записи плотности вероятности навигационной ошибки, от значения спецификации PBN и от величины $T_{\min}$.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников

1. Разработка методики оценки безопасности полётов на основе расчёта риска катастроф при внедрении маршрутов ОВД для типов навигационных спецификаций RNAV1 и RNAV5 навигации, основанной на характеристиках (PBN), с использованием информации системы наблюдения ОВД. Отчёт о НИР по ГК № 7770/16-030-0000-ГК-168-14 от 25.07.2016. Москва: ГосНИИ ГА, 2016. 221 с.
2. Спрысков В. Б., Шувалова Е. В., Кузнецов С. В. Модель оценки технического риска катастроф при эшелонировании воздушных судов в горизонтальной плоскости на основе информации системы наблюдения обслуживания воздушного движения // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 40. С. 111–123.
3. Ефанов Д. Е., Спрысков В. Б., Шапкин В. С., Далецкий С. В. Подход к выбору аналитического выражения плотности вероятности линейных ошибок измерения координат ВС посредством радиолокатора при оценивании безопасности полётов в системе маршрутов зональной навигации со спецификациями RNAV 1, RNAV 2 и/или RNAV 5 // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2017. № 17. С. 41–55.
4. ИКАО Doc 9613. Руководство по навигации, основанной на характеристиках (PBN). Изд. пятое. ИКАО, 2013. 468 с.
5. ИКАО Doc 9689-AN/953. Руководство по методике планирования воздушного пространства для определения минимумов эшелонирования. Изд. 1, поправка № 1, 30/8/02. ИКАО, 2002. 195 с.
6. Шувалова Е. В., Спрысков В. Б., Кузнецов С. В. Формула полного риска катастроф при эшелонировании воздушных судов в горизонтальной плоскости на основе информации системы наблюдения обслуживания воздушного движения // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023 № 44. С. 120–127.
7. EUROCONTROL Specification for ATM Surveillance System Performance (vol. 1, vol. 2). Brussels, Edition 1.1, 2015.

References

1. Development of a methodology for assessing flight safety based on the calculation of the risk of a catastrophe when introducing ATS routes for types of navigation specifications RNAV1 and RNAV5 navigation based on characteristics, using information from the ATS surveillance system. Research report for GK no. 7770/16-030-0000-GK-168-14 dated 25.07.2016. Moscow, GosNII GA Publ., 2016, 221 p. (In Russ.)

2. Spryskov V. B., Shuvalova E. V., Kuznecov S. V. Model for estimating technical risk of accident when separation aircraft in the horizontal plane based on air traffic service surveillance system. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 40, pp. 111–123. (In Russ.)
3. Efanov D. E., Spryskov V. B., Shapkin V. S., Daleckiy S. V. Approach to the selection of analytic expressions of probability density for linear errors in measuring aircraft coordinates using radar when evaluating flight safety in the area navigation route system with RNAV 1, RNAV 2 and/or RNAV 5 specifications. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2017, no. 17, pp. 41–55. (In Russ.)
4. ICAO Doc 9613. Performance-based Navigation (PBN) Manual. Fifth Ed. ICAO, 2023, 398 p.
5. ICAO Doc 9689-AN/953. Manual on airspace planning methodology for the determination of separation minima. First Ed. Amendment no.1, 30/8/02. 2002, 195 p.
6. Shuvalova E. V., Spryskov V. B., Kuznecov S. V. Formula of total risk of accidents when separation aircraft in the horizontal plane based on air traffic service surveillance system. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2023, no. 44, pp. 120–127. (In Russ.)
7. EUROCONTROL Specification for ATM Surveillance System Performance (vol. 1, vol. 2). Brussels, Edition 1.1, 2015.

Информация об авторах

Шувалова Екатерина Викторовна, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, 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

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

Authors information

Shuvalova Ekaterina V., The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, 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

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

Статья поступила в редакцию 18.04.2025; одобрена после рецензирования 17.06.2025; принята к публикации 26.06.2025.

The article was submitted 18.04.2025; approved after reviewing 17.06.2025; accepted for publication 26.06.2025.

Научная статья
УДК 351.814.2:656.7.052

БЕЗОПАСНОСТЬ ПОЛЁТОВ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ С ИЗВЕСТНЫМИ НАВИГАЦИОННЫМИ СПЕЦИФИКАЦИЯМИ БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ НАБЛЮДЕНИЯ

Е. В. ШУВАЛОВА, С. В. КУЗНЕЦОВ, Д. К. КОЗЛОВ, А. С. КАЛИНЦЕВ, В. Б. СПРЫСКОВ

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. Движение воздушных судов (ВС) от точки А к точке В объективно связано с отклонениями фактических положений от плановых. При полётах в океаническом, удалённом воздушном пространстве, по маршрутам и в районе аэродрома в ИКАО обобщены параметры отклонений ВС от заданных траекторий в виде навигационных спецификаций RNP_x либо RNAV_x. В этих спецификациях «х» указывает на среднеквадратическое боковое отклонение от линии заданного пути в морских милях (м.м.), которая должна выдерживаться не менее 95 % полётного времени всеми ВС в пределах рассматриваемого воздушного пространства. Минтранс России также предложил перечень спецификаций PBN при полётах ВС в Российской Федерации. Если в рассматриваемом воздушном пространстве одновременно совершают полёты 2 или более ВС, то из-за наличия отклонений от планов они могут столкнуться, даже если по авиационной связи экипаж согласовал с диспетчером обслуживания воздушного движения (ОВД) времена пролётов всех своих точек маршрутов и строго выполняет предписания безопасного полёта. В настоящей статье представлена модель оценки безопасности полётов ВС с известными навигационными спецификациями без использования информации наблюдения для разделения ВС.

Ключевые слова: аэронавигация, воздушное судно, обслуживание воздушного движения, горизонтальное эшелонирование, безопасность воздушного движения, организация воздушного движения, система наблюдения обслуживания воздушного движения, точность определения координат, фактор риска, эксплуатация авиационной техники

Для цитирования: Шувалова Е. В., Кузнецов С. В., Козлов Д. К., Калинин А. С., Спрысков В. Б. Безопасность полётов воздушных судов с известными навигационными спецификациями без использования информации наблюдения // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 50. С. 73–81.

AIRCRAFT FLIGHT SAFETY WITH KNOWN NAVIGATION SPECIFICATIONS WITHOUT USING SURVEILLANCE DATA

E. V. SHUVALOVA, S. V. KUZNETSOV, D. K. KOZLOV, A. S. KALINTSEV, V. B. SPRYSKOV

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

Abstract. The movement of aircraft from point A to point B is inherently associated with deviations of actual positions from planned ones. For flights in oceanic, remote airspace, en-route and in the aerodrome area, ICAO has generalized the parameters of aircraft deviations from specified trajectories in the form of RNP_x or RNAV_x navigation specifications. In these specifications, “x” denotes the root-mean-square lateral deviation from the specified path in nautical miles (n.m.), which must be maintained for at least 95 % of the flight time by all aircraft within the airspace in question. Ministry of Transport of the Russian Federation

has also proposed a list of PBN specifications for aircraft flights in the Russian Federation. If two or more aircraft are flying simultaneously in the airspace under consideration, they may collide due to deviations from plans, even if the crew has coordinated the times of all their waypoints with the air traffic service controller via aviation communications and strictly follows the safe flight instructions. This article presents a model for assessing the safety of aircraft flights with known navigation specifications without using surveillance information to separate the aircraft.

Keywords: aeronavigation, aircraft, air traffic service, horizontal separation, air traffic safety, air traffic management, air traffic service surveillance system, position accuracy, risk factor, operation of aircraft

For citation: Shuvalova E. V., Kuznetsov S. V., Kozlov D. K., Kalintsev A. S., Spryskov V. B. Aircraft flight safety with known navigation specifications without using surveillance data. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2025, no. 50, pp. 73–81. (In Russ.)

Введение

В настоящей статье представлена модель оценки безопасности полётов ВС с известными навигационными спецификациями без использования информации наблюдения для разделения ВС.

Пусть пара ВС выполняет полёты с известными навигационными спецификациями (RNPх или RNAVх)¹ [1] при соблюдении ими установленных правил полёта, например, это могут быть полёты по пересекающимся в горизонтальной плоскости маршрутам, или полёты пары ВС при вылете одного из них и уходе второго на второй круг. Теоретически из-за навигационных ошибок выдерживания плана полёта рассматриваемые ВС могут столкнуться. Для оценки вероятности столкновения ВС в мировой аэронавигации, начиная с публикации работы [2], применяется следующий подход.

Требуется оценить вероятность столкновения пары ВС за время (t_0, t_1) совместного горизонтального полёта. Время $(t_1 - t_0)$ можно разделить на конечное число непересекающихся интервалов Δt . Физически интервал Δt представляет собой отрезок времени, требуемый паре ВС для совершения столкновения от момента касания ВС до полного «прохождения» одного конфликтующего ВС через другое. Очевидно, величина отрезка Δt зависит от размеров ВС и от их относительной скорости. При типовых размерах современных ВС в несколько десятков метров и скоростей в несколько сот км/ч Δt будет иметь величину порядка десятых секунды, например, при дистанции «прохождения» ВС друг через друга в 70 м и относительной скорости «прохождения» 700 км/час величина $\Delta t = 0,36$ сек. Могут быть другие дистанции «прохождения» и другие скорости, но порядок Δt будет соответствовать десятым долям секунды. Общий интервал (t_0, t_1) разделим на непересекающиеся сегменты длиной Δt .

Вероятность того, что не произойдёт столкновения за время (t_0, t_1) , оценим как

$$\begin{aligned} P\{\text{no collision in } (t_0, t_1)\} &= P\{\text{no collision in } (t_0, t_1) / \text{no collision in } (t < t_0)\} \times \\ &\times P\{\text{no collision in } (t_0 + \Delta t, t_0 + 2\Delta t) / \text{no collision in } (t_0 < t_0 + \Delta t)\} \times \\ &\times P\{\text{no collision in } (t_0 + 2\Delta t, t_0 + 3\Delta t) / \text{no collision in } (t_0 < t_0 + 2\Delta t)\} \times \dots \\ &\dots \times P\{\text{no collision in } (t_1 - \Delta t, t_1) / \text{no collision in } (t_0 < t_1 - \Delta t)\}. \end{aligned} \quad (1)$$

¹ Об утверждении Федеральных авиационных правил «Требования к юридическим лицам, индивидуальным предпринимателям, осуществляющим коммерческие воздушные перевозки. Форма и порядок выдачи документа, подтверждающего соответствие юридического лица, индивидуального предпринимателя требованиям федеральных авиационных правил. Порядок приостановления действия, введения ограничений в действие и аннулирования документа, подтверждающего соответствие юридического лица, индивидуального предпринимателя требованиям федеральных авиационных правил». Приказ Минтранса России от 12.01.2022 № 10 (ред. от 04.03.2025).

Основываясь на предположении, что для каждого сегмента времени Δt навигационные ошибки пары ВС являются постоянными и не зависят от времени полёта и плановых положений ВС в течение общего полётного времени $(t_1 - t_0)$, условные вероятности столкновений выражения (1) подчиняются правилу независимых биномиальных случайных переменных. Если вероятность того, что за интервал Δt вероятность столкновения крайне малая величина (в [2] упоминается порядок 10^{-6}), независимые биномиальные переменные обычно аппроксимируются независимыми пуассоновскими переменными. С учётом этого перепишем (1) в форму (здесь и далее индекс *col* указывает на столкновение, *no_col* – на его отсутствие):

$$P_{no_col}(t_0, t_1) = \exp(-\lambda(t_0)\Delta t) \exp(-\lambda(t_0 + \Delta t)\Delta t) \exp(-\lambda(t_0 + 2\Delta t)\Delta t) \times \dots \\ \dots \times \exp(-\lambda(t_1 - \Delta t)\Delta t) = \exp\left(-\int_{t_0}^{t_1} \lambda(t) dt\right), \quad (2)$$

где $\lambda(t)$ – интенсивность столкновения рассматриваемых ВС в момент времени $t \in (t_0, t_1)$;

$$\lambda(t) = \frac{P_{col}(t, t + \Delta t)}{\Delta t}.$$

Вероятность противоположного события в течение (t_0, t_1) , а именно, столкновения в течение (t_0, t_1) будет равно:

$$P_{col}(t, t + \Delta t) = 1 - \exp\left(-\int_{t_0}^{t_1} \lambda(t) dt\right). \quad (3)$$

Выражение (3) является самым общим выражением для вероятности столкновения пары ВС при совместном горизонтальном полёте в воздушном пространстве с известными навигационными спецификациями за время $(t_1 - t_0)$. Очевидно, сама математическая модель вероятности столкновения (3), предпосылки и обоснования для вывода формулы (3) совпадают с основной формулой теории надёжности невосстанавливаемых систем [3–5].

Если в (3) выражение $\exp\left(-\int_{t_0}^{t_1} \lambda(t) dt\right)$ разложить в ряд Макларена, получим:

$$1 - \exp(-u) = 1 - \left(1 - u + \frac{u^2}{2!} - \frac{u^3}{3!} + \frac{u^4}{4!} - \dots\right) = u + \frac{u^2}{2!} - \frac{u^3}{3!} + \frac{u^4}{4!} - \dots, \quad (4)$$

где $u = \int_{t_0}^{t_1} \lambda(t) dt$.

Ограничим выражение (4) только линейной частью. Тогда (3) можно записать в виде

$$P_{col}^{xy}(t_0, t_1) = \int_{t_0}^{t_1} \lambda(t) dt. \quad (5)$$

Расчёты вероятности столкновения по формулам (5) и (3) дают одинаковый результат, поэтому дальнейшие рассуждения будем проводить с использованием (5).

Пусть каждое из пары ВС (А и В) аппроксимировано правильным круговым цилиндром высотой h и радиусом основания r , где h соответствует вертикальному габариту ВС в горизонтальной плоскости. Тогда критическим объёмом столкновения пары ВС [6] будет также правильный круговой цилиндр с высотой $H_z = h_a + h_b$ и радиусом основания $R = r_a + r_b$. Не меняя общности рассуждений (а лишь для упрощения изложения) будем полагать, что относительная скорость $V_{отн}$ пары ВС при столкновении за время (t_0, t_1) постоянна. Этих предположений достаточно, чтобы

записать формулу вероятности столкновения при совместном горизонтальном полёте ВС с известными навигационными спецификациями за время $(t_1 - t_0)$:

$$\begin{aligned}
 P_{col}^{xy}(t_0, t_1) &= \int_{t_0}^{t_1} \lambda(t) dt = \\
 &= \int_{t_0}^{t_1} (\text{плотность столкновения в момент } t) \times (\text{площадь столкновения}) dt = \\
 &= \frac{\left(\frac{\text{длина траектории столкновения}}{\text{относительная скорость при столкновении}} \right)}{\pi R/2} = \\
 &= \frac{\pi R^2}{\pi R/2} V_{отн} \int_{t_0}^{t_1} C_\gamma(S_x(t), S_y(t)) dt = 2RV_{отн} \int_{t_0}^{t_1} C_\gamma(S_x(t), S_y(t)) dt,
 \end{aligned} \tag{6}$$

где γ – угол между направлениями движения ВС в момент столкновения; $S_x(t)$, $S_y(t)$ – плановые навигационные расстояния между ВС в момент столкновения; $C_\gamma(S_x(t), S_y(t))$ – плотность вероятности горизонтального перекрытия ВС, определяемая навигационными отклонениями ВС рассматриваемой пары от их плановых положений [7]; $\pi R/2$ – длина пути проникновения ВС при столкновении [6].

Результат, вычисляемый по формуле (6), не имеет размерности. Действительно, величина $2RV_{отн}$ имеет размерность км²/ч, а интеграл $\int_{t_0}^{t_1} C_\gamma(S_x(t), S_y(t)) dt$ – ч/км².

В случае, если по условиям совместного полёта пары ВС в интервале (t_0, t_1) относительная скорость непостоянна, необходимо либо учитывать среднее значение относительной скорости, либо параметр $V_{отн}(t)$ вносить под знак интеграла по времени.

Формула (6) даёт точную оценку вероятности столкновения пары ВС при совместном горизонтальном полёте, если выполняется главное условие адекватности формулы теории надёжности невосстанавливаемых систем: для любого момента времени из интервала (t_0, t_1) $\Delta\lambda(t) = 2RV_{отн}^{xy}(t)C_\gamma(S_x(t), S_y(t))$ представляет собой крайне малую величину, не превосходящую значения 10^{-5} – 10^{-6} .

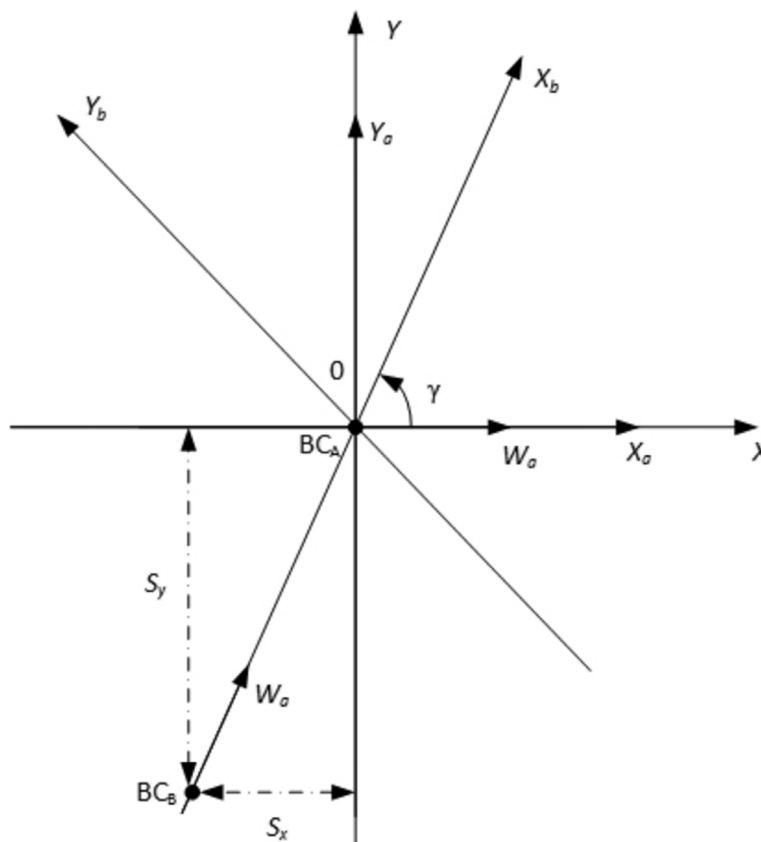
Вычисление вероятности столкновения пары ВС при совместном горизонтальном полёте в интервале времени (t_0, t_1) при известных навигационных спецификациях. Проверка адекватности применения формулы надёжности невосстанавливаемых систем для оценки вероятности столкновения ВС

При вычислениях вероятности столкновения пары ВС с использованием формулы (6) наибольшие трудности возникают с формализацией плотности вероятности перекрытия ВС в горизонтальной плоскости $C_\gamma(S_x, S_y)$. В мировой аэронавигации такую плотность обозначают как pdf cover. Физически pdf cover представляет собой плотность разности случайных величин. При оценивании вероятности столкновения пары ВС в горизонтальной плоскости навигационные фактические отклонения ВС от планового положения имеют размерность 2: вдоль (x) и поперёк (y) планового движения ВС. Параметры точности выдерживания планового положения определяются спецификацией PBN: RNPx или RNAVx.

В соответствии с ИКАО Doc 9613 AN/937 [1] требования к точности спецификаций RNAVx и RNPx определены для бокового и продольного (вдоль линии пути) измерений. По отношению к продольной точности в [1] подчёркивается, что воздушное судно должно быть в пределах $\pm x$ м.м. от точки пути «А», когда выставляется очередность данной точки пути для 95 % всех траекторий полётов в рассматриваемом воздушном пространстве. Точно так же определена

точность навигации в боковом направлении. Однако этого недостаточно для формализации плотности pdf cover. Требуется задание аналитического вида плотности вероятности навигационных погрешностей вдоль и поперёк планового маршрута полёта. В документе ИКАО [1, том II, часть А, пункты 2.2.1 и 2.2.2] указано, что навигационные погрешности (ошибки) при полёте вдоль линии заданного пути со спецификациями RNP_x или RNAV_x являются гауссовскими (нормальными) с нулевыми математическими ожиданиями. В последнее время, начиная с публикации работы [8] (1979), при расчётах безопасности полётов из-за навигационных ошибок в ИКАО используют двустороннее экспоненциальное (DE) распределение навигационных ошибок, представляющее собой бесконечную смесь гауссовских ошибок с разными дисперсиями, подчинёнными одностороннему экспоненциальному закону. Выбор типа плотности вероятности навигационных ошибок зависит от смысла задачи определения вероятности столкновения ВС при совместном полёте с навигационными спецификациями. Но в общем случае требуется формализовать pdf cover как для Гауссовских, так и для DE плотностей навигационных ошибок отдельных ВС рассматриваемой пары.

Пусть $f_{ab}^{NAV}(x_{ab}, y_{ab})$ – двумерная плотность вероятности навигационных ошибок ВС рассматриваемой пары ВС. Для того, чтобы записать pdf разности навигационных ошибок ВС_A и ВС_B, следует ввести общую для двух ВС систему координат OXY , относительно которой совершает совместный горизонтальный полёт рассматриваемая пара, например, как на рисунке.



Система координат OXY , в которой совершает совместный горизонтальный полёт пара ВС (А и В) с известными навигационными спецификациями и положения BC_A и BC_B в момент времени $t \in (t_0, t_1)$

Система OX_aY_a , в которой определены навигационные ошибки BC_A , совпадает с системой OXY .

Система OX_bY_b , в которой определены навигационные ошибки BC_B , повернута на угол γ против часовой стрелки по отношению к системе OX_aY_a .

Положение ВС_В в горизонтальной плоскости и его навигационные ошибки в системе координат 0XY описывается стандартными процедурами параллельного переноса и поворота осей. Тогда плотность разности фактических положений (pdf cover) следует записать как [9]:

$$C_{\gamma}(S_x, S_y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_a^{\text{NAV}}(x, y) f_b^{\text{NAV}}((x - S_x) \cos \gamma + (y - S_y) \sin \gamma - (x - S_x) \sin \gamma + (y - S_y) \cos \gamma) dx dy, \quad (7)$$

где $f_a^{\text{NAV}}(x, y)$, $f_b^{\text{NAV}}(x, y; S_x, S_y, \gamma)$ – двумерные плотности вероятностей навигационных ошибок на горизонтальной плоскости 0XY ВС_А и ВС_В.

В зависимости от постановки задачи плотности f_a^{NAV} и f_b^{NAV} будут либо двумерными гауссовскими, либо двумерными ДЕ плотностями. Соответственно будут разные аналитические формы плотности горизонтального перекрытия $C_{\gamma}(S_x, S_y)$.

Для углов поворота осей 0X_В и 0Y_В на острый и тупой угол γ ($0^\circ < \gamma < 90^\circ$ и $90^\circ < \gamma < 180^\circ$) получение аналитической формы записи плотности cover является отдельной задачей. Для обеспечения доверия к результатам её решения, в частности, и для проверки адекватности применения модели (5) к оценке вероятности столкновения за интервал времени (t_0, t_1) в обязательном порядке выполняют процедуру сравнения вероятностей столкновения ВС при полёте с известными навигационными спецификациями, полученных методом Монте-Карло и с применением (5). Оценки вероятностей должны совпадать.

При этом надо помнить, что подход на основе теории надёжности применительно к расчёту вероятности столкновения пары ВС предполагает крайне низкую мгновенную интенсивность столкновений для любого момента времени t в интервале времени совместного полёта (t_0, t_1). Поэтому истинное максимальное значение вероятности столкновения должно быть в диапазоне 10^{-5} – 10^{-6} на лётный час, что накладывает ограничения на процедуру симуляционной оценки вероятности. Применение метода Монте-Карло для оценивания вероятности столкновения ВС за интервал времени (t_0, t_1) поддержано ИКАО и впервые описано в документе [6].

Вычисление вероятности столкновения пары ВС при совместном полёте в заданном воздушном пространстве с известными навигационными спецификациями и изменением плановой высоты полёта у одного или обоих ВС

Подход на основе теории надёжности невосстанавливаемых систем можно применить для полётов ВС с плановым изменением высоты полёта, если выполняются условия крайне малой величины мгновенной интенсивности отказов (столкновений) для любого момента времени t в течение интервала совместного полёта пары ВС. В отличие от ранее описанного подхода к оценке вероятности столкновения в горизонтальной плоскости, интенсивность столкновений при полётах в трёхмерном пространстве будет зависеть как от горизонтальных навигационных ошибок, так и от планового вертикального рассредоточения ВС и ошибок выдерживания плановой высоты полётов.

На основании принятого как допустимое предположения ИКАО о независимости горизонтальных навигационных ошибок и ошибок выдерживания планового профиля полёта [10], полная мгновенная вероятность столкновений при изменении высоты полёта будет равна перемножению мгновенной горизонтальной и мгновенной вертикальной вероятностей столкновений. Этот факт порождает два процесса интенсивностей столкновений, приводящих к полному перекрытию ВС за интервал совместного полёта (t_0, t_1):

$$\lambda_{xy}(t) = HOP(S_x(t), S_y(t)) P_z(S_z(t)) \frac{2V_{\text{отн}}^{xy}}{\pi R}, \quad (8)$$

$$\lambda_{xy}(t) = HOP(S_x(t), S_y(t)) P_z(S_z(t)) \frac{|\dot{z}|}{H_z}, \quad (9)$$

где $H_z = h_a + h_b$ – вертикальный габарит критического объёма столкновения; $HOP((S_x(t), S_y(t))$ – вероятность столкновения пары ВС с известными навигационными спецификациями

и плановыми относительными расстояниями в горизонтальной плоскости в момент времени $t \in (t_0, t_1)$:

$$HOP(S_x(t), S_y(t)) = \pi R^2 C_\gamma(S_x(t), S_y(t)); \quad (10)$$

$P_z(S_z(t))$ – вероятность столкновения пары ВС в вертикальной плоскости при совместном полёте в воздушном пространстве относительно плановых вертикальных профилей в момент времени $t \in (t_0, t_1)$:

$$P_z(S_z(t)) = H_z C_z(S_z(t)); \quad (11)$$

$$C_z(S_z(t)) = \int_{-\infty}^{\infty} f_z(z) f_z(z - S_z) dz;$$

$S_z(t)$ – расстояние между плановыми профилями полёта в интервале (t_0, t_1) ; $f_z(z)$ – плотность вероятности отклонений ВС от планового профиля полёта [10]; $|\dot{z}|$ – относительная средняя абсолютная скорость ВС рассматриваемой пары в момент столкновения [6, 7].

Тогда по аналогии с выводом (5) вероятность столкновения пары ВС при полёте с изменением профиля и заданными навигационными спецификациями в течение интервала времени (t_0, t_1) будет равна:

$$P_{col}^{xyz}(t_0, t_1) = \int_{t_0}^{t_1} (\lambda_{xy}(t) + \lambda_z(t)) dt = \int_{t_0}^{t_1} HOP(S_x(t), S_y(t)) P_z(S_z(t)) \left(\frac{2V_{отн}^{xy}}{\pi R} + \frac{|\dot{z}|}{H_z} \right) dt, \quad (12)$$

Модель (12) вероятности полного перекрытия ВС при полёте в трёхмерном пространстве в течение интервала времени (t_0, t_1) записана в предположении отсутствия изменений плановых горизонтальных и вертикальных скоростей. В случае необходимости учёта влияния скоростей ВС необходимо вносить плотности вероятностей изменения скоростей ВС в интеграл по времени и интегрирования по скоростям [11].

Модель (12) является расчётной формулой вычисления полной вероятности столкновения ВС при полётах в трёхмерном пространстве и применяется в аэронавигации в отличие от модели (6), которая применяется в классической навигации (речной и морской).

Заключение

Предоставлен вывод формул расчёта вероятности столкновения пары ВС с известными навигационными спецификациями в горизонтальной плоскости и в трёхмерном пространстве в течение времени совместного полёта пары ВС (t_0, t_1) .

Для практического применения расчётных формул $P_{col}^{xy}(t_0, t_1)$, $P_{col}^{xyz}(t_0, t_1)$ и при описании навигационных отклонений ВС от плановых положений в горизонтальной плоскости двумерными ДЕ плотностями навигационных ошибок существенные трудности связаны с получением аналитического выражения для pdf cover $C_\gamma(S_x, S_y)$ (7) для углов $0^\circ < \gamma < 90^\circ$ и $90^\circ < \gamma < 180^\circ$, так как переменные интегрирования для этих углов не разделяются.

В авиации применяется только формула $P_{col}^{xyz}(t_0, t_1)$ (12). Формулы $P_{col}^{xy}(t_0, t_1)$ (5), (6) применяются для 2D навигации для морского/речного транспорта.

Оценивать безопасность полётов в условиях 3D навигации необходимо в аэродромной зоне при внедрении новых элементов маневрирования ВС или для обоснования минимальных требований к навигационным спецификациям полётов ВС на элементах воздушного пространства в районе аэродрома.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest

Список источников

1. ИКАО Doc 9613. Руководство по навигации, основанной на характеристиках (PBN). Изд. 5. ИКАО, 2023. 468 с.
2. Hsu D. A. The evaluation of aircraft collision probabilities at intersection air routes. *The Journal of Navigation*, 1981, vol. 34, no. 1, pp. 78–102.
3. Капур К., Ламберсон Л. Надёжность и проектирование систем. Москва: Мир, 1980. 604 с.
4. Дружинин Г. В. Надёжность автоматизированных систем. Изд. 3-е, перераб. и доп. Москва: Энергия, 1977. 536 с.
5. Базовский И. Надёжность. Теория и практика. Москва: Мир, 1965. 373 с.
6. ИКАО Doc 9689-AN/953. Руководство по методике планирования воздушного пространства для определения минимумов эшелонирования. Поправка № 1, 30/8/02. ИКАО, 2002. 195 с.
7. ИКАО Cir 319 AN/181. Единые принципы моделирования риска столкновений в обоснование Руководства по методике планирования воздушного пространства для определения минимумов эшелонирования (Doc 9689). ИКАО, 2009. 74 с.
8. Hsu D. A. Long-tailed distribution for position errors in navigation. *The Journal of the Royal Statistical Society Series C (Applied Statistics)*, 1979, vol. 28, no. 1, pp. 62–72.
9. Пугачев В. С. Теория вероятностей и математическая статистика. Москва: Наука, 1979. 496 с.
10. ИКАО Cir 324 FN/189. Основные принципы бокового эшелонирования воздушных ВС при вылете и прибытии по опубликованным смежным схемам полётов по приборам. ИКАО, 2010. 40 с.
11. Разработка методики оценки безопасности полётов на основе расчёта риска катастроф при внедрении маршрутов ОВД для типов навигационных спецификаций RNAV1 и RNAV5 навигации, основанной на характеристиках (PBN), с использованием информации системы наблюдения ОВД: Отчёт о НИР по ГК № 7770/16-030-0000-ГК-168-14 от 25.07.2016. Москва: ГосНИИ ГА, 2016. 221 с.

References

1. ICAO Doc 9613. Performance-based Navigation (PBN) Manual. Fifth Ed. ICAO, 2023, 398 p.
2. Hsu D. A. The evaluation of aircraft collision probabilities at intersection air routes. *The Journal of Navigation*, 1981, vol.34, no. 1, pp. 78–102.
3. Kapur K., Lamberson L. *Reliability and system design*. Moscow, Mir Publ., 1980, 604 p. (In Russ.)
4. Druzhinin G. V. *Reliability of automated systems*. Ed. 3, revis. and suppl. Moscow, Ehnergiya Publ., 1977, 536 p. (In Russ.)
5. Bazovskiy I. *Reliability. Theory and practice*. Moscow, Mir Publ., 1965, 373 p. (In Russ.)
6. ICAO Doc 9689-AN/953. Manual on airspace planning methodology for the determination of separation minima. First Ed. Amendment no.1, 30/8/02. ICAO, 2002, 195 p.
7. ICAO Cir 319 AN/181A. 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.
8. Hsu D. A. Long-tailed Distribution for Position Errors in Navigation. *The Journal of the Royal Statistical Society Series C (Applied Statistics)*, 1979, vol. 28, no. 1, pp. 62–72.
9. Pugachev V. S. *Probability theory and mathematical statistics*. Moscow, Nauka Publ., 1979, 496 p. (In Russ.)
10. ICAO Cir 324 FN/189. Guidelines for lateral separation of arriving and departing aircraft on published adjacent instrument flight procedures. ICAO, 2011, 38 p.
11. Development of a methodology for assessing flight safety based on the calculation of the risk of a catastrophe when introducing ATS routes for types of navigation specifications RNAV1 and RNAV5 navigation based on characteristics, using information from the ATS surveillance system. Research report for GK no. 7770/16-030-0000-GK-168-14 dated 25.07.2016. Moscow, GosNII GA Publ., 2016, 221 p. (In Russ.)

Информация об авторах

Шувалова Екатерина Викторовна, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, 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

Козлов Денис Константинович, начальник отдела, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, Kozlov_DK@gosniiga.ru

Калинцев Андрей Сергеевич, заместитель начальника отдела – начальник сектора, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, Kalincev_AS@gosniiga.ru

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

Authors information

Shuvalova Ekaterina V., The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, 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

Kozlov Denis K., Head of Department, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, Kozlov_DK@gosniiga.ru

Kalintsev Andrey S., Deputy Head of Department – Sector Head, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, Kalincev_AS@gosniiga.ru

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

Статья поступила в редакцию 18.04.2025; одобрена после рецензирования 23.06.2025; принята к публикации 01.07.2025.

The article was submitted 18.04.2025; approved after reviewing 23.06.2025; accepted for publication 01.07.2025.

Научная статья
УДК 629.735.33

О ВЫБОРЕ СХЕМЫ РЕГИОНАЛЬНОГО САМОЛЁТА С УЧЁТОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ НА ГРУНТОВЫХ АЭРОДРОМАХ

М. С. ГРОМОВ, Ю. И. ЕВДОКИМОВ, О. Е. ДРОЗДОВА, А. Н. АРЕПЬЕВ

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. В статье представлен анализ выбора базовой схемы регионального самолёта с турбовинтовыми двигателями с точки зрения эффективности эксплуатации на грунтовых взлётно-посадочных полосах. Рассмотрены базовые схемы конструкции воздушных судов (ВС), называемые высокоплан и низкоплан, а также их свойства и особенности эксплуатации. Отмечена высокая вероятность повреждения лопастей воздушного винта и нижней части фюзеляжа самолётов посторонними предметами при эксплуатации на грунтовых аэродромах. Приведены данные о повреждениях самолётов посторонними предметами при их взлётах и посадках на грунтовых взлётно-посадочных полосах аэродромов различных межрегиональных территориальных управлений Российской Федерации. Выполнена расчётная сравнительная оценка вероятности повреждения воздушных винтов самолётов со схемами высокоплана и низкоплана. Сделан вывод о предпочтении схемы высокоплана регионального самолёта с турбовинтовыми двигателями для эксплуатации на грунтовых аэродромах.

Ключевые слова: региональный самолёт, низкоплан, высокоплан, авиационный двигатель, посторонние предметы, грунтовая взлётно-посадочная полоса, транспортные системы страны

Для цитирования: Громов М. С., Евдокимов Ю. И., Дроздова О. Е., Арепьев А. Н. О выборе схемы регионального самолёта с учётом эксплуатации на грунтовых аэродромах // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 50. С. 82–88.

ON THE CHOICE OF A REGIONAL AIRCRAFT LAYOUT, TAKING INTO ACCOUNT OPERATION AT UNPAVED AIRFIELDS

M. S. GROMOV, YU. I. EVDOKIMOV, O. E. DROZDOVA, A. N. AREPYEV

Abstract. The article presents an analysis of the choice of the basic scheme of a regional aircraft with turboprop engines in terms of operational efficiency on unpaved runways. The basic aircraft design schemes, called high- and low-wing aircraft, as well as their properties and operational features, are considered. There is a high probability of damage to the propeller blades and the lower fuselage of aircraft by foreign objects during operation at unpaved airfields. Data on damage to aircraft by foreign objects during their takeoffs and landings on unpaved runways of airfields of various interregional territorial administrations of the Russian Federation are presented. A calculated comparative assessment of the probability of damage to the propellers of aircraft with high- and low-wing airframes has been performed, and a conclusion has been drawn about the preference of the high-wing layout for the operation of regional aircraft with turboprop engines at unpaved airfields.

Keywords: regional aircraft, low-wing, high-wing, aircraft engine, foreign objects, unpaved runways, transport systems of the country

For citation: Gromov M. S., Evdokimov Yu. I., Drozdova O. E., [Arepyev A. N.] On the choice of a regional aircraft layout, taking into account operation at unpaved airfields. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2025, no. 50, pp. 82–88. (In Russ.)

Введение

Несмотря на значительные успехи систем автоматизированного проектирования, выбор схемы самолёта не имеет твердых и установленных правил – это сложная творческая задача.

Тем не менее, выбор конкурентоспособного варианта схемы самолёта должен быть доказательным, то есть основанным как на результатах анализа вариантов схем, так и на обязательном учёте степени важности проявления их достоинств и недостатков в условиях конкретного технического задания (ТЗ).

В условиях заданного ТЗ и при обязательном выполнении требований соответствующих Норм лётной годности самолётов (НЛГС) перечень показателей технической эффективности может следовать из интегрального показателя технической эффективности пассажирского самолёта как транспортного средства и включает:

- весовую эффективность;
- аэродинамическую эффективность;
- эксплуатационную эффективность, измеряемую в данном случае технически возможным среднегодовым налётом часов;
- комфортабельность самолёта.

Перечисленные показатели сложным образом влияют на экономичность самолёта в целом как за счёт снижения величины эксплуатационных расходов и капитальных вложений (прежде всего стоимости самолёта), так и за счёт увеличения объёма работ за период эксплуатации самолёта.

Степень важности каждого частного критерия, то есть его ранг, определяется по степени влияния на повышение экономической эффективности самолёта.

В данной работе применим наиболее простой приём получения вариантов схемы – использование схем уже существующих самолётов либо непосредственно, либо после некоторых изменений, которые представлены на рис. 1 [1].

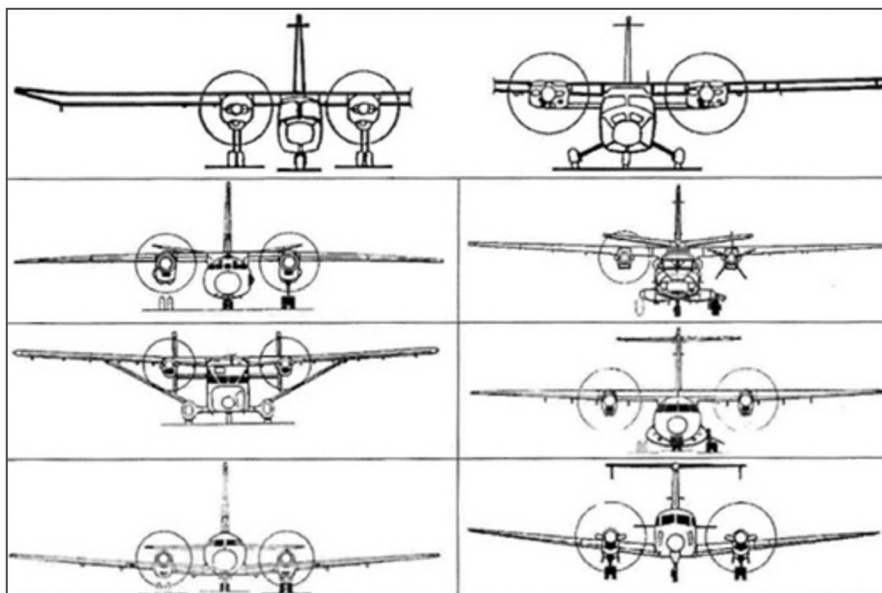


Рис. 1. Примеры «типовых» базовых схем региональных самолётов с ТВД

В настоящее время среди самолётов региональных воздушных линий с турбовинтовым двигателем (ТВД) применяются: пассажирские суда типа Ан-24РВ, грузопассажирские Ан-26-100 (по сути – это модификация Ан-24), грузовые, включая ВС, оборудованные под поисково-спасательные работы и самолёты-лаборатории по облёту радиомаячных средств.

Характерным для парка указанных самолётов является то, что около 50 % взлётов-посадок осуществляется ими на грунтовые взлётно-посадочные полосы (ВПП). Следствием этого являются повреждения лопастей воздушного винта (ВВ) АВ-72 и нижней части фюзеляжа самолёта. В табл. 1 представлено количество повреждений самолётов при их эксплуатации на грунтовых ВПП для различных межрегиональных территориальных управлений (МТУ) воздушного транспорта Росавиации.

Таблица 1

Количество повреждений самолётов при эксплуатации на грунтовых ВПП

Межрегиональные территориальные управления (МТУ) и местоположение аэропортов	Количество повреждений		Доля грунтовых ВПП на территории МТУ
	Ан-24	Ан-26	
Восточно-Сибирское МТУ (Бурятия, Забайкальский край, Иркутская обл.)	16	9	25 %
Дальневосточное МТУ (Амурская обл., Приморский край, Хабаровский край)	4	4	18 %
Камчатское МТУ (кроме Петропавловска-Камчатского)		5	92 %
Красноярское МТУ (Алтай, Красноярский край, Хакасия, Тыва)	3	3	0
Северо-восточное МТУ (Магаданская обл., Чукотский АО)	1	3	71 %
Приволжское МТУ (Башкортостан, Кировская, Нижегородская, Оренбургская, Пензенская, Самарская области, Пермский край, Мордовия, Татарстан, Удмуртия)	3	0	0
Тюменское МТУ (Тюменская обл., Ханты-Мансийский АО – Югра, Ямало-Ненецкий АО)	16	2	22 %
МТУ Центральных районов (Курская и Тамбовская области)	0	7	0 %
Южное МТУ (Волгоградская обл., Дагестан, Кабардино-Балкария, Краснодарский край, Ростовская обл., Крым, Ставропольский край)	0	4	0 %
Саха (Якутское) МТУ	15	3	71 %

Для оценки влияния базовой схемы регионального пассажирского самолёта с ТВД на повреждаемость его посторонними предметами на ВПП сопоставим повреждаемость высокоплана (в качестве которого рассмотрим реальную повреждаемость самолёта Ан-24) и расчётную базовую схему для низкоплана с учётом его проектирования с использованием современных материалов, оборудования, силовой установки с перспективными двигателем и композитным ВВ.

В [2, 3] достаточно подробно рассмотрены достоинства и недостатки схем самолётов типа Ан-24 (схема высокоплана) и самолётов, имеющих схему низкоплана, с позиции современной весовой и аэродинамической эффективности. Однако с точки зрения эксплуатационной эффективности самолётов анализ выглядит весьма скромным, особенно это касается силовой установки и, в первую очередь, ВВ.

Для ВВ на первый план выходит проблема повреждения лопастей посторонними предметами (ПП), находящимися на поверхности аэродрома. Перечень повреждений лопастей ВВ части парка самолётов Ан-24 и Ан-26 за 5 лет эксплуатации представлен в табл. 2. Основной причиной значительного увеличения повреждений является активная эксплуатация ВС на грунтовых аэродромах.

Таблица 2

Повреждение лопастей ВВ части парка самолётов типа Ан-24 и Ан-26

Предприятие-владелец	Дата отказа	Бортовой номер ВС	Тип ВС	Описание отказа
Томск-Авиа (Томское ГАП)	31.03.2014	46679	Ан-24РВ	Забоина недопустимого в эксплуатации размера глубиной около 8 мм на передней кромке лопасти 4-го правого ВВ АВ-72 серии 02А
Хабаровские Авиалинии (Николаевск-на-Амуре)	22.06.2016	47321	Ан-24	Забоины на лопастях № 1 и № 2 воздушного винта правой силовой установки
Якутия (АК, Якутск), быв. НАК Саха Авиа	23.04.2016	46479	Ан-24	Забоина на крае комля лопасти № 3: 35 мм – 8 мм
Якутия (АК, Якутск), быв. НАК Саха Авиа	24.04.2018	46665	Ан-24	Забоина воздушного винта СУ-1 лопасти № 2 на законцовке, ширина 20 мм глубина 11 мм
Полярные авиалинии (ГУП АК, Якутск)	20.06.2018	46646	Ан-24	На послеполетном ТО обнаружена забоина лопасти № 4 ВВ СУ-2
Якутия (АК, Якутск), быв. НАК Саха Авиа	03.09.2018	46510	Ан-24	Множественные забоины лопастей № 1, 2, 4 на ВВ № 164ЛЗ
Ангара (АК) бывш. Байкал-Аэрогрупп (АТБ Иркутск)	15.07.2019	46697	Ан-24	Забоина на передней кромке лопасти № 2 ВВ СУ2
Якутия (АК, Якутск), быв. НАК Саха Авиа	22.04.2014	46510	Ан-24	Повреждение лопасти № 4 правого ВВ на расстоянии 100 мм по передней кромке от конца лопасти выше допуска
Якутия (АК, Якутск), быв. НАК Саха Авиа	08.06.2017	46665	Ан-24	При ТО обнаружено повреждение лопастей ВВ Су1. Повреждение обогреваемого элемента в двух местах лопасти № 2
Ангара (АК) бывш. Байкал-Аэрогрупп (АТБ Иркутск)	13.12.2019	46697	Ан-24	При послеполётном осмотре обнаружено повреждение лопастей ВВ СУ1 и вмятины на обшивке фюзеляжа в зоне его вращения
Полярные авиалинии (ГУП АК, Якутск)	08.10.2015	47260	Ан-24	Пробоины обогреваемой части лопасти № 2
КрасАвиа (АО, г. Красноярск, аэропорт Черемшанка)	21.08.2016	26118	Ан-26	При выполнении послеполётного обслуживания на лопастях № 1 и 2 правого ВВ обнаружены забоины, не соответствующие ТУ
Чукотавиа (Угольные Копи, Чукотский АО)	14.08.2016	26128	Ан-26	Забоина 1,5 мм в концевой части лопасти № 1 ВВ левого двигателя

Как показали предварительные исследования, основной проблемой самолёта со схемой низкоплана будет являться повреждение ВВ при взлёте и посадке на грунтовых аэродромах.

Специалистами ВУНЦ ВВС «ВВА» (г. Воронеж) и ФГУП ГосНИИ ГА совместно выполнена расчётная сравнительная оценка вероятности повреждения ВВ ВС типа Ан-24 и самолёта, имеющего схему низкоплана. При расчётах определения кинематических параметров соударения ПП с лопастью ВВ использовалась номограмма относительной плотности распределения $N(\alpha, \beta)$ осевого α и бокового β углов вылета ПП из-под колёс носовой стойки шасси, полученная Нескоромным Е. В. [4, 5].

Произведены расчёты, позволившие определить предполагаемые наиболее вероятные траектории попадания ПП в ВВ при движении самолётов по ВПП на этапе взлёта или посадки в виде плотности распределения траекторий. Результаты расчётов для самолётов типа Ан-24 и самолёта, имеющего схему низкоплана, в диапазоне скоростей 100–200 км/ч представлены на рис. 2 и рис. 3, соответственно. Здесь схематично показаны зоны возможных попаданий ПП в ВВ исследуемых схем самолётов в виде плотностей распределения углов вылета ПП.

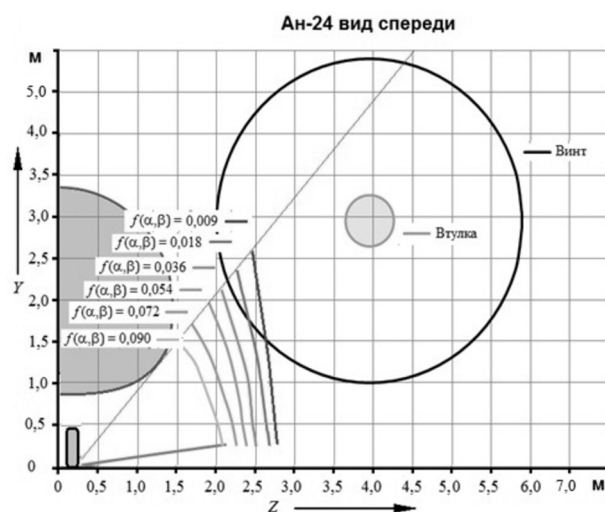


Рис. 2. Зоны возможных попаданий ПП в ВВ самолёта типа Ан-24, $f(\alpha, \beta)$ – плотность распределения углов вылета ПП из-под колёс носовой стойки шасси

Рисунки наглядно показывают, что площадь попадания ПП на низкоплан значительно больше, чем на Ан-24 (высокоплан) и захватывает не только винт, но и входное устройство Так, вероятность повреждения лопасти ВВ самолёта-низкоплана вылетевшим из-под колеса шасси передней стойки ПП составляет до 30 %, а для ВС типа Ан-24 (схема высокоплан) при тех же условиях – не более 6 %.

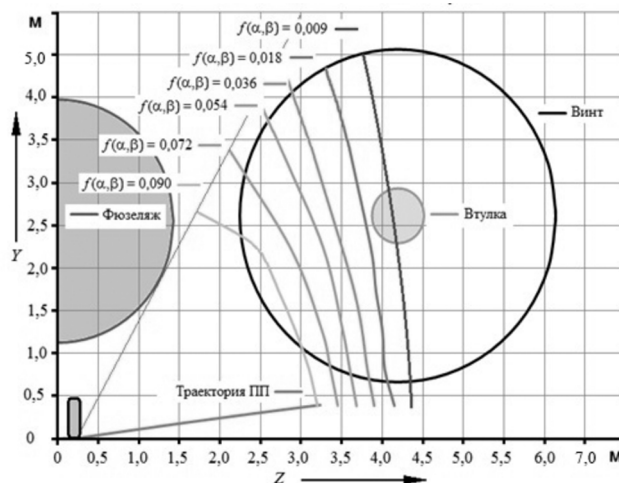


Рис. 3. Зоны возможных попаданий ПП в ВВ самолёта, имеющего схему низкоплана

Большая предрасположенность ВВ к повреждению ПП ВС низкоплана связана с тремя основными факторами [6]:

- более низкое расположение ВВ относительно поверхности аэродрома;
- удалённость передней стойки шасси от плоскости вращения ВВ;
- низкая эффективность защитного устройства, особенно от бокового вылета ПП.

Как видно из приведённых данных рис. 2 и рис. 3, площадь попадания ПП на низкоплан значительно больше, чем на Ан-24, и захватывает не только винт, но и входное устройство двигателя.

Таким образом, при выборе схемы регионального самолёта с учётом эксплуатации на грунтовых аэродромах следует отдавать предпочтение использованию схемы высокоплана.

Заключение

Задача выбора базовой схемы регионального самолёта с ТВД с точки зрения эффективности его эксплуатации на грунтовых ВПП является важной ввиду необходимости обеспечения связанности с удалёнными труднодоступными районами, оборудованными грунтовыми ВПП.

Решена задача определения преимуществ использования таких схем компоновки как высокоплан и низкоплан. Сделан вывод о том, что в условиях регулярной эксплуатации самолётов на грунтовых ВПП применение самолёта, имеющего схему компоновки высокоплан, эффективнее чем использование самолёта, имеющего схему низкоплан.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников

1. Арепьев А. Н. Концептуальные основы синтеза и анализа проекта винтовых самолётов. Москва: ИД Академии Жуковского, 2023. 622 с.
2. Катырев И. Я., Неймарк М. С., Шейнин В. М. и др. Проектирование гражданских самолётов: Теория и методы / Под ред. Г. В. Новожилова. Москва: Машиностроение, 1991. 666 с.
3. Воскобойников М. С., Лагосюк Г. С., Миленский Ю. Д. и др. Конструкция и прочность самолётов и вертолётов: Учебник для вузов гражданской авиации / Под ред. Миртова К. Д. и Черненко Ж. С. Москва: Транспорт, 1972. 440 с.
4. Евдокимов А. И., Мухамедьяров Р. Р., Нескормный Е. В. Численное моделирование нестационарного процесса вихреобразования воздушным винтом лёгкого летательного аппарата // Насосы. Турбины. Системы. 2016. № 4(21). С. 45–52.
5. Нескормный Е. В., Марков Д. С. Методика определения живучести и стойкости воздушных винтов летательных аппаратов к ударному воздействию посторонних предметов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2019. № 10(715). С. 93–102.
6. Громов М. С. Актуальные проблемы поддержания лётной годности отечественных ВС по условиям прочности // Сборник статей научно-технической конференции «Прочность конструкций летательных аппаратов». Вып. 2764. Москва: ЦАГИ, 2017. С. 6–11.

References

1. Arepyev A. N. *Conceptual foundations of synthesis and analysis of the propeller aircraft project*. Moscow, Zhukovsky Academy Publ., 2023, 622 p. (In Russ.)
2. Katyrev I. Ya., Neymark M. S., Sheinin V. M. et al. *Civil aircraft design: Theory and methods*. Ed. G. V. Novozhilov. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1991, 666 p. (In Russ.)

3. Voskoboinikov M. S., Lagosyuk G. S., Milenky Yu. D. et al. *The design and strength of airplanes and helicopters: A textbook for universities of civil aviation*. Ed. K. D. Mirtov and J. S. Chernenko. Moscow, Transport Publ., 1972, 440 p. (In Russ.)
4. Evdokimov A. I., Mukhamedyarov R. R., Neskromny E. V. Numerical modeling of the unsteady vortex formation process by an air propeller of a light aircraft. *Pumps. Turbines. Systems*, 2016, no. 4(21), pp. 45–52. (In Russ.)
5. Neskromny E. V., Markov D. S. Methodology for determining the survivability and resistance of aircraft propellers to the impact of foreign objects. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2019, no. 10(715), pp. 93–102. (In Russ.)
6. Gromov M. S. Actual problems of maintaining the airworthiness of domestic aircraft under strength conditions. *Collection of articles of the scientific and technical conference "Structural strength of aircraft"*, Issue 2764. Moscow, TSAGI Publ., 2017, pp. 6–11. (In Russ.)

Информация об авторах

Громов Михаил Степанович, кандидат технических наук, главный конструктор, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, gromov@gosniiga.ru

Евдокимов Юрий Иванович, заместитель генерального директора по поддержанию лётной годности воздушных судов, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, evdokimov_yui@gosniiga.ru

Дроздова Ольга Евгеньевна, кандидат технических наук, начальник отдела, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, drozdova_oe@gosniiga.ru

Арепьев Анатолий Николаевич, кандидат технических наук, Москва, Россия, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации до декабря 2023 года.

Authors information

Gromov Mihail S., Candidate of Sciences (Engineering), Chief Designer, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, gromov@gosniiga.ru

Evdokimov Yuri I., Deputy General Director for Aircraft Airworthiness Maintenance, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, evdokimov_yui@gosniiga.ru

Drozdova Olga E., Candidate of Sciences (Engineering), Head of Department, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, drozdova_oe@gosniiga.ru

Arepyev Anatoliy N., Candidate of Sciences (Engineering), Moscow, Russia, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation until December 2023.

Статья поступила в редакцию 24.02.2025; одобрена после рецензирования 11.06.2025; принята к публикации 19.06.2025.

The article was submitted 24.02.2025; approved after reviewing 11.06.2025; accepted for publication 19.06.2025.

Научная статья
УДК 656.7.072(1-194.6)

ПРОБЛЕМЫ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ИНФРАСТРУКТУРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВИАПЕРЕВОЗОК НАСЕЛЕНИЯ В ОТДАЛЁННЫХ И ТРУДНОДОСТУПНЫХ РАЙОНАХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ К 2030 ГОДУ

А. А. ФРИДЛЯНД, В. А. МЕЛАНИН, В. П. ГОРБУНОВ

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. Исследованы особенности деятельности гражданской авиации (ГА) в отдалённых и труднодоступных районах Российской Федерации в отношении обеспечения авиационных перевозок на региональных и местных воздушных линиях. В 1990-е годы произошло значительное сокращение количества аэропортов и маршрутной сети региональных и местных воздушных перевозок, что оказало существенное отрицательное влияние на состав и функционирование авиационной инфраструктуры и транспортную подвижность населения на авиамаршрутах в труднодоступных регионах. Рассмотрены системные риски региональных и местных авиаперевозок. Сформулированы и аргументированы основные выводы о системных проблемах развития региональной и местной авиации северных и дальневосточных регионов, которые необходимо учитывать при стратегическом планировании авиационной отрасли России.

Ключевые слова: воздушный транспорт, гражданская авиация, пассажирские авиаперевозки, инфраструктура, парк воздушных судов, аэропорт, транспортные системы страны

Для цитирования: Фридлянд А. А., Меланин В. А., Горбунов В. П. Проблемы и направления развития инфраструктурного обеспечения авиаперевозок населения в отдалённых и труднодоступных районах Российской Федерации к 2030 году // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 50. С. 89–97

PROBLEMS AND DIRECTIONS OF DEVELOPMENT OF INFRASTRUCTURAL SUPPORT FOR AIR TRANSPORTATION OF THE POPULATION IN REMOTE AND HARD-TO-REACH AREAS OF THE RUSSIAN FEDERATION BY 2030

A. A. FRIDLYAND, V. A. MELANIN, V. P. GORBUNOV

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

Abstract. The peculiarities of civil aviation activities in remote and hard-to-reach regions of the Russian Federation in relation to the provision of air transportation on regional and local air lines are investigated. In the 1990s, there was a significant reduction in the number of airports and the route network of regional and local air transportation, which had a significant negative impact on the structure and functioning of aviation infrastructure and the transport mobility of the population on air routes to hard-to-reach regions. The systemic risks of regional and local air transportation are being considered. The main conclusions about the systemic problems of the development of regional and local aviation in the northern and Far Eastern regions, which must be taken into account in the strategic planning of the Russian aviation industry, are formulated and argued.

Keywords: air transport, civil aviation, passenger air transportation, infrastructure, aircraft fleet, airport, transport systems of the country

For citation: Fridlyand A. A., Melanin V. A., Gorbunov V. P. Problems and directions of development of infrastructural support for air transportation of the population in remote and hard-to-reach areas of the Russian Federation by 2030. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2025, no. 50, pp. 89–97. (In Russ.)

Введение

В условиях пространственно-географической специфики Российской Федерации воздушный транспорт выполняет ключевую социально-экономическую функцию, гарантируя критически необходимую транспортную доступность и связность регионов страны. Более 60 % площади государства относится к регионам Крайнего Севера и приравненным территориям. В ряде регионов Крайнего Севера и Дальнего Востока авиация остаётся единственным круглогодичным магистральным видом транспорта, связывающим указанные территории с остальной страной.

Транспортная доступность региона обеспечивает инвестиционную активность, диверсификацию экономики и демографическое развитие субъектов РФ. Указом Президента Российской Федерации от 7 мая 2024 г. № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» предписано обеспечить к 2030 году рост авиационной мобильности населения не менее чем на 50 % по отношению к уровню 2023 года.

В начале 2000-х годов внутренние региональные воздушные перевозки по маршрутам, минуя Москву, занимали около 40 % всех перевозок по внутренним воздушным линиям Российской Федерации, чему способствовала структура авиапарка с высоким удельным весом региональных самолетов Як-40, Ан-24/26, Л-410, Ан-28. К 2022 году в связи с изменением структуры обслуживаемой ими маршрутной сети удельный вес указанных перевозок сократился до 25–26 %, что вносит дисбаланс в развитие секторов российской ГА. В 2022–2024 гг. наблюдается изменение структуры обслуживаемой российским авиапарком маршрутной сети: нарастает тенденция роста прямых авиаперевозок между региональными центрами и российскими курортными городами, минуя Москву. Аналогичные процессы наблюдаются и в отношении ближневосточных и иных азиатских курортов.

Механизмы и проблемы функционирования ГА в отдалённых и труднодоступных районах Российской Федерации

Важной предпосылкой успешного освоения арктических и дальневосточных регионов выступает наращивание межрегионального и местного авиасообщения. Магистральные автодороги и железнодорожные линии здесь практически отсутствуют, а водный транспорт является сезонным. Поэтому воздушный транспорт здесь критически важен для обеспечения жизнедеятельности населения. При этом по данным социологических опросов около 40 % жителей рассматриваемых регионов недовольны состоянием авиационной доступности.

Для решения указанной проблемы осуществляются Федеральные программы субсидирования воздушных перевозок.

Основные нормативно-правовые документы, регулирующие применение федеральных программ по субсидированию воздушных перевозок в России:

- Постановление Правительства Российской Федерации от 25 декабря 2013 года № 1242 «О предоставлении субсидий из федерального бюджета организациям воздушного транспорта на осуществление региональных воздушных перевозок пассажиров на территории Российской Федерации и формирование региональной маршрутной сети» (далее – Постановление № 1242);

- Постановление Правительства Российской Федерации от 2 марта 2018 года № 215 «Об утверждении Правил предоставления субсидий из федерального бюджета организациям воздушного транспорта в целях обеспечения доступности воздушных перевозок населению и о признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации» (далее – Постановление № 215);

- Постановление Правительства РФ от 14 октября 2023 г. № 1698 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации», в соответствии с которым были внесены изменения в Постановление № 1242 и Постановление № 215;

- Постановление Правительства РФ от 9 февраля 2018 г. № 135 (ред. от 26.05.2021) «Об утверждении Правил предоставления субсидий из федерального бюджета аэропортам, расположенным в районах Крайнего Севера и приравненных к ним местностях, и о признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации»;

- Постановление Правительства Российской Федерации от 22.02.2021 № 245 «Об утверждении Правил предоставления субсидий из федерального бюджета авиакомпаниям на компенсацию части затрат, связанных с обслуживанием воздушных судов» с учётом Постановления Правительства РФ от 6 декабря 2022 г. № 2234 «О внесении изменений в Постановление Правительства Российской Федерации от 22 февраля 2021 г. № 245»;

- Постановление Правительства РФ от 19.03.2018 № 301 (ред. от 19.08.2023 № 1360) «Об утверждении Правил предоставления субсидий из федерального бюджета российским компаниям на финансовое обеспечение затрат, связанных с созданием системы послепродажного обслуживания воздушных судов и подготовкой авиационного персонала для воздушных судов».

За период после 1991 года существенно деградировала российская аэродромная инфраструктура: число сертифицированных аэродромов сократилось более чем в 6 раз. Многие региональные и местные аэродромы характеризуются критическим износом несущих покрытий взлётно-посадочных полос (ВПП), рулёжных дорожек (РД) и светосигнального авиационного оборудования, испытывают острый дефицит инженерно-технических специалистов и инвестиционных средств для эксплуатационного содержания и реконструкции инфраструктуры.

Важными механизмами повышения транспортной доступности арктических территорий служат внедряемые авиаперевозчиками «Аэрофлот» и «Россия» программы «плоских тарифов», обеспечивающие круглогодичную авиадоступность регионов без сезонных ценовых скачков, и программы комплексного обновления аэродромной инфраструктуры и взлётно-посадочных полос и площадок арктических регионов.

Во исполнение поручений Правительства Российской Федерации Министерством транспорта Российской Федерации разработаны предложения по структуре, показателям, общественно значимым результатам и финансированию нового нацпроекта «Развитие транспортной инфраструктуры». Важной составной частью данного нацпроекта будет Федеральный проект «Развитие инфраструктуры опорной сети аэропортов», предусматривающий комплексную реконструкцию 51 аэродромного комплекса Дальневосточного федерального округа, включая ВПП, терминалы, системы энергоснабжения и навигационное оборудование, что составляет 42 % совокупного объёма мероприятий по реконструкции и модернизации аэропортов..

В декабре 2024 года Президент РФ Владимир Путин заявил, что в России до 2030 года будет реконструировано и модернизировано не менее 75 аэропортов. На реализацию программы Президентом РФ дано поручение Правительству РФ о выделении из федерального бюджета не менее 250 млрд руб. Модернизация аэропортов включает строительство новых терминалов, а также расширение площади существующих. Комплекс мероприятий по модернизации аэропортовой инфраструктуры направлен на повышение уровня безопасности авиaperевозок и оптимизацию качества предоставляемых услуг. Эти стратегические инициативы реализуются с целью обеспечения соответствия современным международным стандартам и требованиям, а также для минимизации потенциальных рисков, связанных с эксплуатацией воздушных судов (ВС).

В 2019–2024 годах создание, развитие и модернизация аэропортового комплекса с использованием средств федерального бюджета поддерживалось через Федеральный проект «Развитие региональных аэропортов». В соответствии с паспортом проекта за шесть лет планировалось ввести в эксплуатацию 32 реконструированных либо новых ВПП и 20 обслуживающих объектов – современные перроны, РД, топливозаправочные комплексы, аэронавигационные системы.

По данным Минфина России об исполнении расходов федерального бюджета на реализацию национальных проектов совокупный объём бюджетных ассигнований, перечисленных в 2019–2024 годах по этому федеральному проекту, достиг 196,8 млрд руб. Первоначально, согласно утверждённому в 2018 году плановому графику финансирования проекта, на тот же период планировались федеральные бюджетные поступления в объёме 234 млрд руб., а с учётом внебюджетного софинансирования – 267,5 млрд руб. Таким образом, для реализации проекта поступило лишь 84 % от изначально утверждённого лимита финансирования. Финансирование было ниже планового уровня в 2019–2021 и 2024 годах, что связано с инвестиционной паузой в начале пандемии, меньшим количеством проведённых мероприятий, а также с затягиванием сроков в ряде проектов.

Помимо необходимости комплексной реконструкции ряда аэродромных узлов, функционирующих в отдалённых и труднодоступных регионах России, существенная доля северных и восточных аэродромов остро нуждается в капитальном ремонте ВПП, РД перронов, дренажных систем. Своевременная модернизация аэропортовой инфраструктуры Крайнего Севера предполагает разработку и утверждение целевой программы мероприятий с уточнением источников финансирования в рамках федеральных целевых программ.

В аэропортах, дислоцированных в арктических регионах, из-за высоких эксплуатационных затрат на содержание аэродромной инфраструктуры действующие ставки аэропортовых сборов и тарифов существенно превышают показатели, установленные в аэропортах европейской части России, что снижает транспортную привлекательность Севера для авиаперевозчиков и тормозит экономическое развитие регионов.

Актуальной остаётся задача модернизации авиапарка ВС, обеспечивающих пассажирские и грузовые авиаперевозки в труднодоступных регионах Крайнего Севера. Большинство эксплуатируемых там самолётов и вертолётов исчерпывают лётный ресурс и в ближайшие годы вынужденно будут выведены из эксплуатации.

Сменяющие их отечественные ВС нуждаются в более современном техобслуживании, высокотехнологичной инфраструктуре, включая искусственные ВПП и современное радиотехническое оборудование.

В соответствии с Распоряжением Правительства РФ от 25.06.2022 № 1693-р «Об утверждении комплексной программы развития авиационной отрасли Российской Федерации до 2030 года», в условиях динамично развивающейся авиационной индустрии возникает настоятельная потребность в разработке и внедрении новых ВС, которые бы соответствовали современным требованиям эргономики, авиабезопасности и сертификации, пригодных к эксплуатации в экстремальных метеоусловиях Крайнего Севера и Арктики. Приоритетами являются проектирование и серийное производство отечественных региональных самолётов малой вместимости, адаптированных к холодному климату и ограниченной аэродромной инфраструктуре Севера, а также надёжных бортовых систем энергоснабжения.

Конъюнктура рынка воздушных перевозок и основные проблемы регионального и местного авиасообщения

Российские авиакомпании в 2024 году перевезли 111,7 млн пассажиров (105,4 млн пассажиров в 2023 году, темп роста 5,9 %) и около 489,4 тыс. тонн грузов и почты (467,4 тыс. тонн в 2023 году).

Государственное субсидирование воздушного транспорта, в том числе региональных перевозок, до 2013 года фактически отсутствовало, что с учётом макроэкономической нестабильности

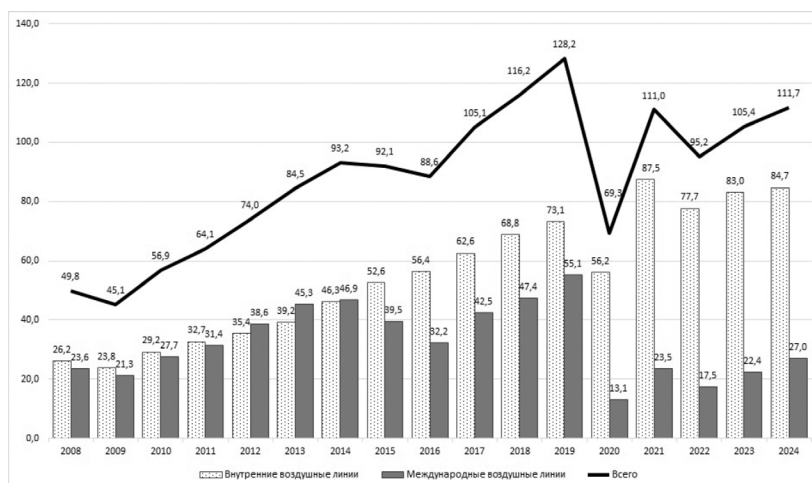


Рис. 1. Количество перевезённых пассажиров за 2008–2024 гг., млн чел.

в этот период [1] негативно проявлялось в колебаниях доли пассажиропотока на внутрироссийских маршрутах (рис. 1).

На фоне почти двукратного за последние 10 лет роста пассажирооборота на внутренних воздушных линиях на местные авиаперевозки приходится лишь 3,2 % национального рынка (2,7 млн пассажиров в 2024 году). Сегмент местных авиаперевозок демонстрирует стагнацию, ключевыми факторами которой являются ограниченная платёжеспособность населения, дефицит многих региональных бюджетов, отсутствие стабильных механизмов федерального субсидирования для перевозчиков, осуществляющих перевозки на местных воздушных линиях, высокая удельная себестоимость рейсов, превышающая среднедушевые доходы пассажиров [2] (рис. 2). Такая себестоимость обусловлена комплексом факторов, включающих в себя высокие затраты на эксплуатацию авиационного парка и обеспечение безопасности полётов, а также инфраструктурные расходы. В условиях ограниченного пассажиропотока на местных маршрутах данные издержки распределяются на небольшое количество рейсов, что приводит к существенному увеличению себестоимости каждого полёта.

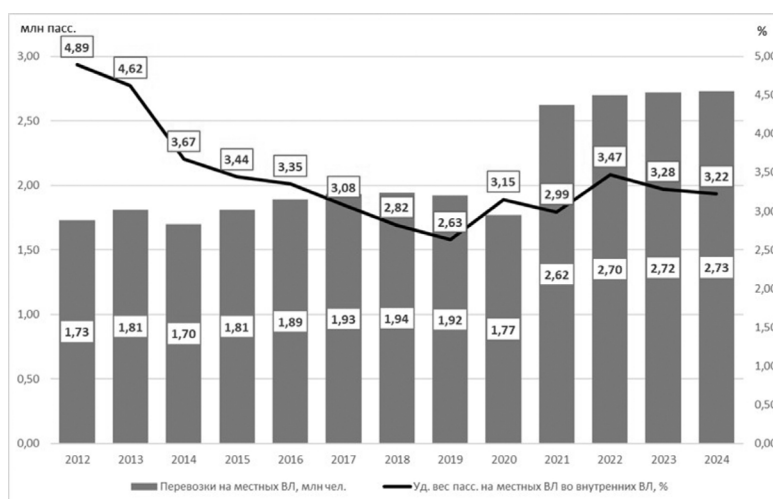


Рис. 2. Динамика авиаперевозок на местных воздушных линиях (ВЛ) за 2012–2024 гг.

Многие населённые пункты в труднодоступных регионах были основаны в советское время в целях обслуживания крупных градообразующих предприятий (как правило, промышленных), и с закрытием или ухудшением финансового состояния этих предприятий в 1990-е годы из них начался отток населения.

В качестве примера можно рассмотреть численность населения Чукотского автономного округа, сократившуюся более чем в 3 раза с 1991 до 2024 г. (со 160 до 48 тыс. человек), изменилась также структура расселения населения по территории. Как объективное следствие, произошло резкое сокращение количества регулярных авиамаршрутов (с 73 до 22), выполняемых преимущественно из Анадыря. Количество пассажиров, перевозимых на местных авиалиниях, сократилось в итоге более чем в 37 раз (с 529 до 14,1 тыс. пасс. в год).

Большая доля местных и региональных авиаперевозок в Дальневосточном, Сибирском и Северо-Западном федеральных округах обеспечивается через 73 аэродрома и 15 вертодромов местных воздушных линий, входящих в систему семи федеральных казённых предприятий. Эти предприятия получают субсидии из федерального бюджета для компенсации дефицита финансовых средств, связанного с операционными затратами на осуществление социально значимых маршрутов.

За прошедшее десятилетие совокупный авиапарк ВС российских эксплуатантов увеличился на 330 бортов, с 2014 ВС в 2015 году до 2344 в 2024 году. При этом наблюдается острый дефицит отечественных самолётов, критически необходимых для местных и региональных авиалиний. Параллельно с увеличением пассажиропотока усиливается дефицит лётных кадров, обусловленный хроническим недофинансированием профильных авиационных учебных центров.

Несмотря на интенсивное развитие международных и внутренних авиаперевозок Российской Федерации, сложившаяся к настоящему времени ситуация в системе региональных и местных авиаперевозок сопряжена с целым рядом системных рисков и вызовов, в первую очередь в отношении находящихся в стагнации местных авиаперевозок:

- стабильно высокий спрос со стороны населения, отдалённых и труднодоступных регионов;
- практическое отсутствие роста местного авиасообщения в большинстве субъектов Российской Федерации. Уровень местных авиаперевозок остаётся очень низким – 3,2 % от количества пассажиров на внутрироссийских авиалиниях, действуют они преимущественно в труднодоступных зонах с экстремальными климатическими факторами и слаборазвитой автомобильной инфраструктурой, охватывающих 13 субъектов РФ, расположенных в арктических и дальневосточных регионах. Население большей части территории страны лишено возможности оперативного доступа к магистральным аэропортовым хабам;
- сокращение сети внутрирегиональных аэродромов и посадочных площадок, их недостаточная оснащённость современной инфраструктурой, в том числе навигационным, светосигнальным и другим специальным оборудованием;
- не завершена модернизация парка ВС во всех сегментах групп ВС, применяемых в региональных и местных авиаперевозках;
- недостаточная инвестиционная привлекательность региональных и местных перевозок, в особенности в регионах Севера и Дальнего Востока, где транспортная доступность регионов критически зависит от воздушного сообщения;
- усиливается дефицит квалифицированных профессиональных кадров, в особенности в сегменте региональной и местной авиации.

Ключевые драйверы и препятствия расширения региональных авиаперевозок отдалённых районов Крайнего Севера, Арктики, Дальнего Востока

Одной из ключевых проблем, сдерживающих поступательное развитие арктических регионов, является недостаточная развитость аэродромной инфраструктуры. Данная проблема проявляется в диспропорции между количеством аэропортов и аэродромов и общей площадью территории.

Анализ ситуации в заполярных районах Республики Саха (Якутия) и Чукотского автономного округа демонстрирует эту проблему наиболее ярко. На 1000 квадратных километров в этих регионах приходится лишь 0,01 аэропорта.

Воздушные перевозки внутри арктической зоны преимущественно осуществляются из небольших поселений Якутии в районные центры с дальнейшей пересадкой в опорных региональных аэропортах, таких как Якутск, Магадан, Анадырь, а также в крупных авиаузлах (Хабаровск, Владивосток, Иркутск, Красноярск, Новосибирск), из которых магистральные эксплуатанты выполняют рейсы в Москву, Санкт-Петербург, мегаполисы Центрального и Южного федеральных округов. Устойчивость развития региональной авиации критически связана с организационно-географическими факторами и стоимостью авиаперевозки в отдалённых арктических аэропортах, куда топливо доставляется по сложным транспортным цепочкам («северный завоз») в экстремальных метеоусловиях. Негативный аспект формируется низкой топливной эффективностью изношенного парка ВС и отсутствием поставок новейших отечественных ВС для ближнемагистральных, региональных и местных ВЛ. Растущие расходы на поддержание лётной годности ВС и покупку запчастей, растянутая из-за санкций логистика, дефицит лётно-технического персонала вследствие оттока населения с Крайнего Севера усиливают роль экономических факторов. Ситуацию обостряют деградирование аэродромной инфраструктуры, устаревшие средства радиотехнического, светосигнального и метеообеспечения полётов, изношенные топливозаправочные комплексы [3, 4]. Нерешённая задача круглосуточной эксплуатации сети аэродромов снижает КПД арктической авиатранспортной системы. Сокращённое время функционирования ВПП снижает месячный налёт ВС, сужая возможности местных перевозчиков обеспечивать транспортную связность обширного арктического макрорегиона.

Факторы, ограничивающие эксплуатацию аэропортовой инфраструктуры Дальневосточного федерального округа

В основе модернизации авиатранспортного комплекса труднодоступных регионов Крайнего Севера, Сибири и Арктики ключевое значение имеет развитие аэропортов. Именно они определяют масштаб и географию преобразований в этой сфере [5].

В постсоветский период произошло значительное сокращение аэропортовой инфраструктуры: с почти 1450 до 225 аэропортов. Это негативным образом сказалось на транспортной связности и существенно замедлило эволюцию региональной авиатранспортной системы [6].

Данное сокращение инфраструктуры привело к снижению пропускной способности авиационных узлов, что ограничивает возможности для эффективного перемещения пассажиров и грузов и создаёт серьёзные препятствия для развития экономических связей между регионами и странами.

Кроме того, уменьшение количества аэропортов снижает конкуренцию на рынке авиаперевозок, что может привести к увеличению тарифов и снижению качества обслуживания. Это негативно скажется на доступности авиаперевозок для населения и бизнеса, особенно в отдалённых и периферийных регионах.

Условия эксплуатации авиационного транспорта и структура маршрутной сети в Дальневосточном федеральном округе характеризуются своей специфичностью. Эта специфика обусловлена географической разобщённостью населённых пунктов, низкой плотностью населения региона, соответствующими климатическими и экономическими факторами [7]. В большинстве случаев функционирование аэродромной инфраструктуры осуществляется в ограниченном временном режиме, что, в совокупности с дефицитом или устареванием радиотехнических систем посадки и навигации, существенно затрудняет формирование маршрутной сети, способной обеспечить экономически эффективное использование авиапарка местных авиакомпаний в круглосуточном режиме [8]. Это, в свою очередь, негативно сказывается на экономической целесообразности авиаперевозок, а также на конкурентоспособности местных авиаперевозчиков на рынке транспортных услуг. В результате наблюдается снижение пассажиропотоков между населёнными пунктами по сравнению с советским периодом. В те годы авиаперевозчик располагал обширным парком региональных ВС различных типов, что позволяло полностью удовлетворять значительно

более высокий спрос на авиаперевозки и способствовало повышению уровня транспортной доступности и авиационной мобильности населения и экономики региона.

Следует отметить, что в советский период был реализован комплексный подход к развитию региональной авиации, включающий не только модернизацию авиапарка, но и создание эффективной системы управления воздушными перевозками. Это обеспечивало высокую степень интеграции транспортной инфраструктуры Дальнего Востока в общенациональную транспортную сеть.

В современных условиях, при изменившейся демографической и экономической ситуации, необходимо переосмыслить подходы к организации авиаперевозок в регионе. Важно учитывать не только текущие потребности населения, но и перспективы развития региона, включая возможное увеличение численности населения и рост экономической активности. Это потребует разработки и внедрения новых стратегий и моделей управления воздушными перевозками, а также модернизации авиапарка с учётом современных требований к безопасности, эффективности и экологичности.

Заключение

Итоги проведённого анализа свидетельствуют, что текущая конфигурация регионального воздушного транспорта и аэродромно-транспортной сети Крайнего Севера и Дальнего Востока сформировалась ещё в 1990-е годы. С тех пор значительно деградировала аэродромная инфраструктура – в плохом состоянии ВПП, устарело основное радионавигационное и светосигнальное оборудование, изношено оборудование топливозаправочных комплексов. Действующие санитарно-технические регламенты и ограничения работы аэродромных комплексов критически снижают транспортную связность и экономическую эффективность авиатранспортной системы арктического макрорегиона России.

Полученные научно-практические результаты и выводы исследования могут быть использованы специалистами авиопредприятий, аэропортов и органов государственного регулирования при формировании долгосрочных прогнозов и стратегических планов развития воздушного транспорта России.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников

1. Матюха С. В. Формирование организационно-экономического механизма развития региональной авиации в России. Дис. докт. эконом. наук. ГУУ, Москва, 2023.
2. Пенкина В. А. Механизмы государственной поддержки обеспечения комплексного развития авиатранспортной системы и региональных маршрутных сетей страны // Научный вестник МГТУ ГА. 2024. Т. 27. № 6. С. 56–71.
3. Горбунов В. П., Самойленко В. М., Кузнецов С. В., Стручкова А. М. Метод корреляционно-регрессионного анализа оценки факторов поставки авиатоплива в труднодоступные арктические районы Севера // Научный вестник МГТУ ГА. 2022. Т. 25. № 6. С. 23–39.
4. Горбунов В. П., Стручкова А. М. Метод решения проблемы транспортировки авиатоплива в труднодоступные аэродромы Арктических районов Якутии и Крайнего Севера // Арктика: экология и экономика. 2023. Т. 13. № 2. С. 271–279.
5. Полешкина И. О. Методика оценки транспортной доступности населённых пунктов Арктической Зоны России // Железнодорожный транспорт. 2022. № 5. С. 32–37.
6. Егорова Т. П., Делахова А. М., Сукнёва С. А. и др. Пространственная дифференциация развития северного региона: социальное измерение; под общ. ред. С. А. Сукнёвой. Якутск: Издательский дом СВФУ, 2020. 203 с.

7. Немудрый К. В. Аэродромы и аэропорты как элемент системы региональной авиации России // Труды МАИ. 2014. № 75. 9 с. [Электронный ресурс]. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=49715>
8. Железная И. П. К вопросу о развитии региональной авиации в Российской Федерации // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 205. С. 137–140.

References

1. Matyukha S. V. Formation of an organizational and economic mechanism for the development of regional aviation in Russia. Doctoral dissertation Economics, SUM, Moscow,. 2023.
2. Penkina V. A. Mechanisms of state support for the integrated development of the country's air transport system and regional route networks. *Civil Aviation High Technologies*, 2024, vol. 27, no. 6, pp. 56–71. (In Russ.)
3. Gorbunov V. P., Samoylenko V. M., Kuznetsov S. V., Struchkova A. M. Analysis of the applicability of correlation and regression models to assess the factors of aviation fuel supply to the remote arctic regions of the Far North. *Civil Aviation High Technologies*, 2022, vol. 25, no. 6, pp. 23–39. (In Russ.)
4. Gorbunov V. P., Struchkova A. M. Problem-solving technique for transporting aviation fuel to remote airfields in the arctic regions of Yakutia and Far North. *Arctic: Ecology and Economy*, 2023, vol. 13, no. 2, pp. 271–279. (In Russ.)
5. Poleshkina I. O. Methodology for assessing the transport accessibility of settlements in the Arctic Zone of Russia. *Railway transport*, 2022, no. 5, pp. 32–37. (In Russ.)
6. Egorova T. P., Delakhova A. M., Sukneva S. A. et al. *Spatial differentiation of the development of the northern region: a social dimension*. Ed. S. A. Sukneva. Yakutsk, SVFU Publ., 2020, 203 p. (In Russ.)
7. Nemudry K. V. Airfields and airports as an element of the regional aviation system of Russia. *Proceedings of MAI*, 2014, no. 75, 9 p. (In Russ.) [Electronic resource], available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=49715>
8. Zheleznaja I. P. The development of regional aviation in the Russian Federation. *Civil Aviation High Technologies*, 2014, no. 205, pp. 137–140. (In Russ.)

Информация об авторах

Фридлянд Александр Абрамович, доктор экономических наук, кандидат технических наук, профессор, директор Научного центра, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, info@aeroprogress.ru

Меланин Владимир Александрович, кандидат экономических наук, доцент, заместитель директора Научного центра, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, v.melanin@yandex.ru

Горбунов Владимир Павлович, кандидат технических наук, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, vlad.gorbunov@bk.ru

Authors information

Fridlyand Aleksandr A., Doctor of Sciences (Economics,) Candidate of Sciences (Engineering), Professor, Director of the Scientific Center, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, info@aeroprogress.ru

Melanin Vladimir A., Candidate of Sciences (Economics), Associate Professor, Deputy Director of the Scientific Center, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, v.melanin@yandex.ru

Gorbunov Vladimir P., Candidate of Sciences (Engineering), The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, vlad.gorbunov@bk.ru

Статья поступила в редакцию 16.04.2025; одобрена после рецензирования 30.06.2025; принята к публикации 08.07.2025.
The article was submitted 16.04.2025; approved after reviewing 30.06.2025; accepted for publication 08.07.2025.

Научная статья
УДК 656.7.078.072

МОНИТОРИНГ РЕЗУЛЬТАТОВ ДОСТИЖЕНИЯ СТРАТЕГИЧЕСКИХ ЦЕЛЕЙ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО РЫНКА АВИАПЕРЕВОЗОК И ПАРКА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

И. В. ЛЕСНИЧИЙ, И. А. САМОЙЛОВ, В. И. САМОЙЛОВ, О. Ю. СТРАДОМСКИЙ

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. Представлены результаты мониторинга тенденций развития авиаперевозок и изменения состава парка самолётов отечественных авиакомпаний в период после начала пандемии и введения санкций в отношении России. Проведён анализ перспектив развития существующих тенденций и выполнена оценка их соответствия условиям достижения стратегических целей повышения авиационной подвижности (авиаподвижности) населения страны и обновления парка самолётов. Рассмотрены условия достижения к 2030 году целевого увеличения перевозок в зависимости от состояния выполнения Комплексной программы развития авиационной отрасли Российской Федерации до 2030 года и поддержания лётной годности (ПЛГ) эксплуатируемого в России парка импортных самолётов. Предложен подход к оценке рисков программы обновления парка самолётов.

Ключевые слова: воздушный транспорт, транспортные системы страны, пассажирские перевозки, действующий парк, потребный парк, авиаподвижность населения, поддержание лётной годности

Для цитирования: Лесничий И. В., Самойлов И. А., Самойлов В. И., Страдомский О. Ю. Мониторинг результатов достижения стратегических целей развития отечественного рынка авиаперевозок и парка воздушных судов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 50. С. 98–107.

MONITORING OF THE ACHIEVEMENT RESULTS OF STRATEGIC GOALS FOR THE DEVELOPMENT OF THE RUSSIAN AIR TRANSPORTATION MARKET AND AIRCRAFT FLEET

I. V. LESNICHYI, I. A. SAMOYLOV, V. I. SAMOYLOV, O. YU. STRADOMSKIY

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

Abstract. The results of monitoring trends in the development of air transportation and changes in the composition of the fleet of mainline aircraft of domestic airlines in the period after the outbreak of the pandemic and the imposition of sanctions against Russia are presented. The analysis of the prospects for the development of existing trends has been carried out and their compliance with the conditions for achieving the strategic goals of increasing the air mobility of the country's population and updating the fleet of aircraft based on domestic aircraft technology has been assessed. The conditions for achieving the target increase in traffic by 2030 are considered, depending on the state of implementation of the Comprehensive Program for the Development of the Aviation Industry of the Russian Federation until 2030 and maintaining the airworthiness of the fleet of imported aircraft operated in Russia. A methodological approach to assessing the risks of the aircraft fleet renewal program is proposed.

Keywords: air transport, transport systems of the country, passenger transportation, operating fleet, required fleet, air mobility of the population, maintenance of airworthiness

For citation: Lesnichiyy I. V., Samoylov I. A., Samoylov V. I., Stradomskiy O. Yu. Monitoring of the achievement results of strategic goals for the development of the russian air transportation market and aircraft fleet. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2025, no. 50, pp. 98–107. (In Russ.)

Введение

Стратегическим приоритетом для отечественной гражданской авиации в соответствии с Транспортной стратегией Российской Федерации¹ является обеспечение транспортной связности страны, что в современных условиях требует развития воздушного сообщения, в первую очередь на внутренних линиях, на основе преобладающего использования отечественной авиатехники. Инструментом реализации Транспортной стратегии стала Комплексная программа развития авиационной отрасли Российской Федерации до 2030 года (далее – Комплексная Программа)². Она описывает комплекс задач для воздушного транспорта и авиапромышленности по скоординированному развитию рынка авиаперевозок, созданию и производству нового типоразмерного ряда воздушных судов (ВС). Решение этих задач должно в том числе обеспечить повышение авиационной подвижности (авиаподвижности) населения на основе достижения технологического суверенитета авиаотрасли.

Однако существенная неопределённость внутренних и внешних условий определяет наличие технических, технологических, ресурсных рисков, способных негативно повлиять на планируемое обновление парка ВС и развитие авиаперевозок. Для оценки и демпфирования рисков Комплексной Программы необходимо проводить мониторинг факторов возникновения и индикаторов риска.

Уровень концентрации рисков характеризуют результаты оценки соответствия тенденций развития авиаперевозок и парка ВС условиям достижения целевых показателей повышения авиаподвижности населения и технического перевооружения парка ВС, которые определены в Указе Президента Российской Федерации от 07.05.2024 № 309³ и должны быть обеспечены в ходе реализации Комплексной Программы.

Тенденции и целевые показатели развития авиаперевозок

Рынок пассажирских авиаперевозок близок к завершению периода турбулентности, вызванного несколькими волнами внеэкономических ограничений в начале текущего десятилетия. Пандемия и санкции привели к сокращению перевозок вдвое в 2020 г. [1]. Но, несмотря на существующие ограничения по использованию импортных самолётов и зарубежного воздушного пространства, отечественные авиакомпании в основном обеспечивают удовлетворение спроса во внутреннем сообщении и на значительной части международных направлений перевозок.

Сохранился потенциал для возвращения к прерванной в 2020 году многолетней тенденции роста перевозок благодаря беспрецедентному усилению мер государственной поддержки [2]. Так, в 2022 г. только антикризисное субсидирование возросших операционных расходов авиакомпаний превысило 120 млрд руб. При этом параллельно в годы кризиса (после 2019 г.) вдвое увеличился объём целевого субсидирования из федерального бюджета доступности внутренних авиаперевозок, оказывались специальные меры поддержки аэропортам, Госкорпорации по ОрВД.

¹ Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года, утверждённая распоряжением Правительства Российской Федерации от 27 ноября 2021 г. № 3363-р.

² Комплексная программа развития авиационной отрасли Российской Федерации до 2030 года, утверждённая распоряжением Правительства Российской Федерации от 25 июня 2022 г. № 1693-р.

³ «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года.» Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2024 № 309.

Кризис начала текущего десятилетия изменил условия и приоритеты развития отечественного воздушного транспорта. На смену длительному периоду роста рынка в условиях преобладания международных перевозок и доминирования импортных самолётов в парке пришла тенденция восстановления сократившихся перевозок в первую очередь за счёт стимулирования внутреннего сообщения и импортозамещения самолётов в парке. Благодаря увеличению спроса на перевозки внутри страны в 2023–2024 гг. на внутренние линии пришлось 64–69 % всего пассажирооборота воздушного транспорта, хотя до 2020 г. их доля в основном составляла <44 %. С тех пор внутренние перевозки трижды обновили исторический максимум и в 2024 г. на 36 % превысили пассажирооборот 2019 г. – наибольший за предшествующие 20 лет устойчивого роста рынка (рис. 1). Субсидирование внутренних авиаперевозок остаётся социальным приоритетом государственной политики, в 2025 году на эти цели из федерального бюджета выделено 24,6 млрд руб.



Рис. 1. Динамика пассажирооборота российских авиакомпаний

Международные перевозки по количеству пассажиров пока всё ещё вдвое меньше докризисных. Однако, несмотря на санкции, в последние годы международный сегмент рынка начал восстанавливаться с двузначными темпами роста, в том числе благодаря государственной поддержке авиакомпаний в вопросе страхового урегулирования претензий зарубежных лизингодателей, ограничивавших возможность применения зарегистрированных в России самолётов для полётов за рубеж. Количество направлений международных перевозок увеличилось на четверть в 2023 г. и превысило четыре десятка. В 2024 г. впервые после начала пандемии прирост числа пассажиров международных рейсов стал больше, чем на внутренних. Сохраняющийся отложенный спрос стимулирует восстановление международных перевозок.

Хотя восстановление сдерживается сложной геополитической обстановкой, в 2024 г. пассажирские авиаперевозки в целом составили 87 % от максимальных показателей докризисного 2019 года. Рынок перевозок вырос на 60 % по сравнению с минимальным уровнем 2020 года (средний рост – 12 % в год) и имеет предпосылки к продолжению тенденции роста спроса. Несмотря на ожидаемое в дальнейшем снижение темпов роста спроса до уровня 5 % в год по мере восстановления рынка, прирост пассажирских перевозок за 2024–2030 гг. может составить >50 % (со 105,4 до 158,0 млн пасс.) в условиях удовлетворения спроса.

Данный прогноз соответствует долговременному тренду роста авиаперевозок и текущему развитию ситуации на рынке [2]. Его реализация обеспечит достижение национальных стратегических целей развития отрасли, которые определены в Указе № 309 и предусматривают

увеличение к 2030 году авиаподвижности населения на ≥ 50 % по сравнению с показателем 2023 года при обеспечении к 2030 году доли самолётов отечественного производства в парке авиаперевозчиков ≥ 50 %. В соответствии с данным указом Правительством был сформирован Единый план по достижению национальных целей развития Российской Федерации на период до 2030 года и на плановый период до 2036 года, в котором (в пункте 3.13) цели гражданской авиации детализированы по годам (таблица).

Статистический индикатор	2021 (факт)	2022 (факт)	2023 (факт)	2024 (оценка)	2025	2026	2027	2028	2029	2030
3.13.а. Авиаподвижность населения, полётов на 1 чел. в год	0,76	0,65	0,72	0,76	0,75	0,77	0,79	0,87	0,97	1,08
3.13.б. Доля самолётов отечественного производства в парке российских авиаперевозчиков, %	—	—	—	19	19	20	25	30	37	50

Исходя из потенциала рынка и состояния авиационной отрасли, существенное ускорение роста авиаподвижности ожидается после 2027 г. По оценкам Минтранса России объём авиаперевозок в 2030 году должен составить ≥ 158 млн пассажиров. Необходимым условием достижения целевого показателя станет обеспечение баланса между темпами роста спроса на перевозки и темпами повышения провозной способности парка ВС в результате замещения импортных самолётов на отечественные.

Решение поставленной в Указе № 309 задачи требует ускорения роста авиаперевозок по сравнению с установкой Комплексной программы на восстановление к 2030 г. докризисного (2019 года) уровня перевозок при их росте на 20 % относительно уровня 2023 г. Планируемое Комплексной программой увеличение перевозок до 126,8 млн пасс. к 2030 г. на 20 % меньше представленной выше оценки ожидаемой величины спроса в 2030 году. Отставание планового роста перевозок от спроса обусловлено тем, что сценарий Комплексной программы допускает возможность снижения перевозок в 2024–2027 гг. ниже уровня 2023 г. в случае вынужденного ускоренного списания части парка импортных самолётов до начала массовых поставок отечественных самолётов. Однако пока фактический рост перевозок к началу 2025 г. опередил плановые показатели Комплексной программы на 12 %, и указанное снижение спроса и перевозок в период до 2027 года представляется маловероятным.

Таким образом, постановка задачи о необходимости удовлетворения ожидаемого роста спроса для реализации целевого повышения авиаподвижности на 50 % определяет необходимость корректировки целевых показателей Комплексной программы.

Тенденции и целевые показатели развития парка самолётов

До начала текущего геополитического кризиса российские авиакомпании не имели существенных ограничений в развитии парка ВС, широко пользуясь предложениями на мировом рынке авиатехники. Благодаря этому воздушный транспорт обеспечивал удовлетворение растущего спроса на авиаперевозки в течение 20 лет. Наиболее активно развивался парк магистральных пассажирских самолётов, количество которых выросло вдвое с 2000 года и превысило 800 ед. в 2021 году [2]. Они выполняют 95 % перевозок пассажиров и составляют ≈ 78 % численности всего коммерческого парка самолётов пассажироместимостью > 19 мест. Более чем три четверти магистрального парка – это импортные самолёты, которые в 2013–2021 гг. обеспечивали 88–90 % перевозок авиапассажиров.

Критическая зависимость отечественного воздушного транспорта от иностранной авиа-техники стала серьёзной проблемой после введения санкционных ограничений на приобретение западных самолётов и комплектующих [2, 3]. Начиная с 2022 года возможности для обновления и ПЛГ парка пассажирских самолётов критически уменьшились, в том числе из-за ограничения выпуска самолётов SSJ-100. Резко снизились поставки в парк пассажирских самолётов всех классов. Так, в 2022 году поступило 26 магистральных самолётов, а в 2024 году – 4 самолёта, из них три – SSJ-100. Ранее в парк поступало до 100 магистральных самолётов в год, в основном импортных.

Как следствие, рост численности магистрального парка прекратился, и за 2022–2024 гг. она сократилась на 114 самолётов (поступило 34 ед., выбыло 148 ед.) или на 14 %. Это обусловлено сокращением численности импортных самолётов на 19 % (на 126 ед.), в том числе широкофюзеляжных на 37 % и узкофюзеляжных на 15 % (на 44 ед. и 82 ед., соответственно). Так, с введением санкций был единовременно потерян доступ примерно к 70 самолётам, находившимся за рубежом. Ещё ≈ 50 самолётов были выведены из состава действующего парка в 2023–2024 гг. в связи с ограничениями на выполнение международных рейсов (что коснулось в первую очередь широкофюзеляжных самолётов), а также в связи с вопросами ПЛГ наиболее современных типов (таких как A320/321neo с двигателями фирмы Pratt&Witney). Темпы сокращения численности импортных самолётов превысили прогнозы Комплексной программы, и в 2024 году их осталось в парке на 10 % меньше, чем планировалось.

Между тем сокращение парка магистральных самолётов произошло в условиях роста перевозок на 17 % в 2023–2024 гг., что стало возможным благодаря использованию имевшихся резервов провозной мощности парка. Так, средний коэффициент загрузки рейсов для магистральных самолётов вплотную приблизился к рекордному уровню 0,9. В то же время средний уровень годового налёта самолётов ещё имеет запас ≈ 15 % относительно показателей докризисного 2019 года. То есть действовавший в 2024 г. состав парка самолётов потенциально ещё имеет резерв провозной способности, достаточный для выполнения объёма перевозок, сопоставимого с максимумом 2019 г., несмотря на сокращение с тех пор численности магистрального парка (на 9 %) и изменение его структуры в сторону узкофюзеляжных самолётов.

В дальнейшем в условиях санкций, препятствующих ПЛГ, продолжится прогрессирующее выбытие из эксплуатации импортных самолётов [2, 4]. По известной оценке авиакомпаний до 2030 г. в эксплуатации могут сохраниться 44–66 % от численности парка импортных самолётов 2022 года при монотонном сокращении численности магистральных отечественных самолётов примерно на 30 %. К минимальному варианту этого прогноза близок сценарий Комплексной программы, который предполагает, что в 2030 г. продолжат эксплуатацию 47 % из числа имевшихся в 2022 году импортных самолётов (а в целом в парке сохранится 52 % из 735 магистральных самолётов).

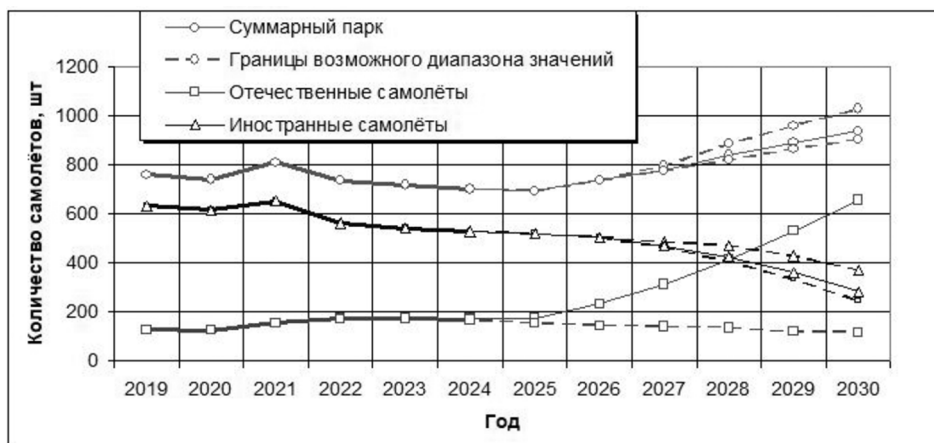


Рис. 2. Влияние поставок отечественных и списания импортных самолётов на целевой прогноз динамики численности магистрального парка

Планируемые согласно действующей редакции Комплексной программы поставки до 2030 г. 541 отечественного магистрального самолёта обеспечат перелом тенденции сокращения магистрального парка и восстановление его численности в 2027–2028 гг. до максимального уровня, достигнутого в 2021 г. (≈ 800 самолётов), а затем – расширение парка до 900–1000 самолётов в зависимости от сохранения в эксплуатации 44 % или 66 % действующего парка импортных самолётов (рис. 2). Соответственно, провозная способность парка в 2030 году оценивается в диапазоне 152–173 млн пасс., исходя из величины удельной провозной мощности парка, достигнутой в докризисном 2019 г. (рис. 3).

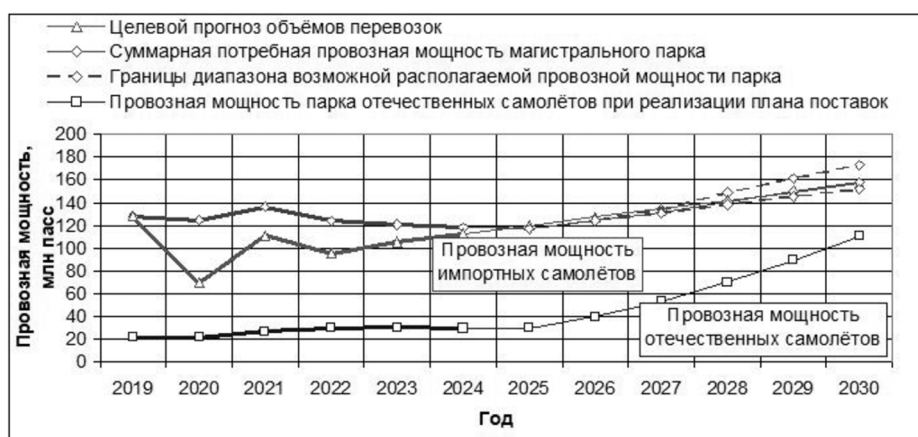


Рис. 3. Структура потребной провозной мощности парка для выполнения целевого объема перевозок

Рассматриваемый диапазон возможностей для обновления магистрального парка включает в себя вариант увеличения к 2030 г. провозной мощности до уровня ожидаемого спроса – 158 млн пасс. (при увеличении численности парка до ≈ 950 ед.). Это возможно в случае полной реализации программы поставок отечественных самолетов (541 ед.) и продолжения эксплуатации 283 импортных самолетов – половины действовавшего в 2023 г. их парка. Такой путь развития способен обеспечить и достижение целевого уровня повышения авиаподвижности – на 50 % к 2030 г.

Необходимое сохранение через 15 лет лётной годности 50 % импортных самолетов, средний возраст которых на конец 2024 г. составлял ≈ 15 лет, представляется вероятным, поскольку это близко к сценарию Комплексной программы и к минимальной оценке авиакомпаний (рис. 4). Менее вероятна реализация максимальной оценки перспектив ПЛГ импортных самолетов (до 66 %), при реализации которой провозная мощность парка позволит обслужить целевые 158 млн пасс. в 2030 г. даже в случае снижения на 15 % программы выпуска отечественных самолетов.

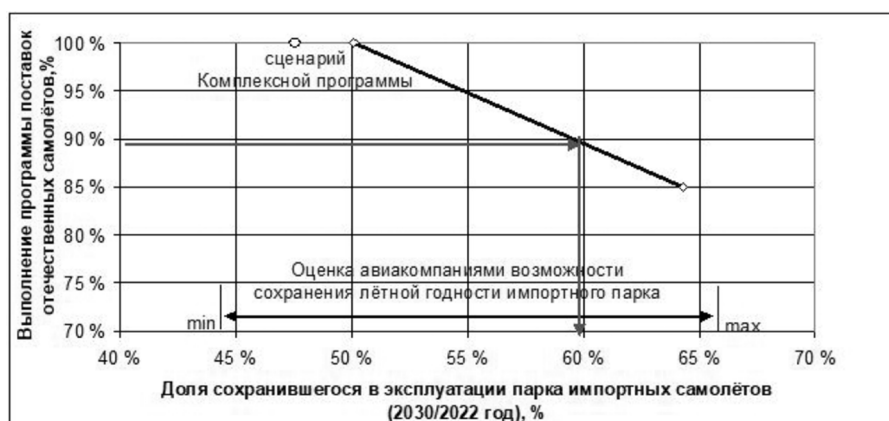


Рис. 4. Потребность в импортных самолётах для выполнения целевого объема перевозок в 2030 году в зависимости от результатов Комплексной программы

Таким образом, текущее состояние магистрального парка не в полной мере соответствует сценарию Комплексной программы вследствие опережающего сокращения численности парка импортных самолётов. Тем не менее программа выпуска новых отечественных самолётов способна обеспечить провозную мощность парка, достаточную для удовлетворения растущего спроса на перевозки и целевого повышения авиаподвижности на 50 % к 2030 г. При реализации планов выпуска на 85–100 % отечественные самолёты в 2030 г. в целом обеспечат 62–70 % целевой провозной мощности парка при условии продолжения эксплуатации 50–65 % от числа эксплуатировавшихся в 2022 г. импортных самолётов. Доля новых отечественных самолётов составит ≥ 50 % в составе магистрального парка.

Риски реализации Комплексной программы

В Комплексной программе перед авиационной отраслью поставлена задача развития рынка авиаперевозок на основе создания нового типоразмерного ряда отечественных ВС. В этом ряду первоочередными являются проекты наиболее значимых по вкладу в перевозки магистральных самолётов: полностью импортозамещённых MC-21-310, SSJ-NEW и модернизированного Ту-214.

Задача импортозамещения широкого перечня комплектующих, в том числе авиадвигателей, потребовала существенного увеличения объёмов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Как следствие, изменённая действующая Комплексная программа предусматривает начало поставок новых самолётов примерно на 1-2 года позже, чем её первая редакция (рис. 5). Однако рассмотрение хода сертификации новых магистральных типов свидетельствует о сохранении рисков задержки сроков их создания. Среди основных факторов риска можно назвать сдвиг сроков создания двигателя ПД-8 для SSJ-NEW и постройки опытных образцов самолёта MC-21-310 с системами отечественного производства, для завершения сертификации которых предстоит выполнить значительный объём наземных и лётных испытаний самолётов.

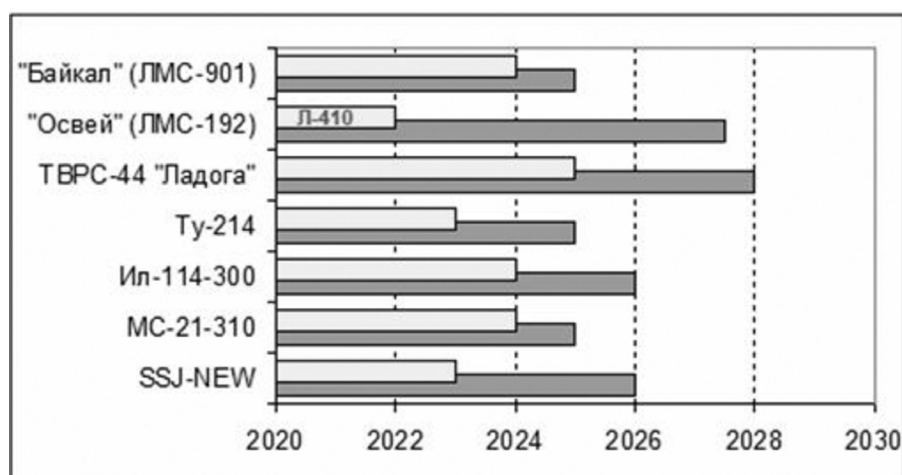


Рис. 5. Смещение плановых сроков завершения создания самолётов

Таким образом, существует вероятность снижения планового объёма поставок магистральных самолётов новых типов в период до 2030 г. из-за сдвига срока начала их массовых поставок. В случае снижения плана поставок самолётов на 10–15 % для удовлетворения спроса и выполнения целевого показателя роста перевозок потребуется увеличить долю импортных самолётов в обеспечении необходимой провозной мощности парка в 2030 г. Для этого необходимо продолжение эксплуатации 60–65 % из числа имевшихся в 2022 г. таких самолётов, что близко к максимальной оценке авиакомпаниями их текущих возможностей по ПЛГ импортных самолётов (рис. 4). Неопределённость условий выполнения этого требования повышает вероятность

недостижения целевого показателя авиаподвижности в случае неполной реализации программы выпуска отечественных самолётов.

При таком варианте развития парка 2025–2027 годы могут стать наиболее напряжёнными для удовлетворения ожидаемого спроса на перевозки в связи с неудовлетворительным балансом поставок и списания самолётов. Потребуется интенсифицировать использование внутренних резервов где это возможно, включая повышение показателей применения, возобновление эксплуатации экземпляров простаивающих самолётов, применение схемы «мокрого» лизинга.

Для оценки рисков удовлетворения спроса на перевозки представляется актуальным постоянный мониторинг факторов рисков образования дефицита провозной мощности парка и анализ возможностей его сокращения. При этом задача оценки рисков реализации целевых показателей развития перевозок и парка ВС преобразуется в задачу оценки рисков^{4, 5, 6, 7, 8, 9} Комплексной программы как совокупности независимых проектов создания, производства и ПЛГ ВС [2]. Это позволяет разделить рассматриваемую задачу на ряд подзадач оценки рисков реализации отдельных проектов Комплексной программы с последующей свёрткой результатов оценки рисков для каждого из независимых проектов.

В целом риск реализации Комплексной программы выражается в возможном невыполнении планируемых целевых показателей развития авиаотрасли, важнейшим из которых является объём авиаперевозок. Соответственно, общий подход к оценке рисков реализации Комплексной программы состоит в том, что для совокупности составляющих её проектов общим показателем риска является величина невыполнения парком целевого объёма авиаперевозок. При этом основными видами рисков являются:

- срыв реализации отдельных наиболее значимых проектов;
- снижение конкурентоспособности проектов.

Номенклатура видов риска реализации конкретных проектов определяется характером вероятных угроз и комплексом технических, технологических и ресурсных факторов риска.

Заключение

Темпы восстановления рынка авиаперевозок опережают плановые показатели Комплексной программы при сохранении тенденции роста спроса в новых условиях. Ожидаемое увеличение перевозок в соответствии с ростом спроса (до 158 млн пасс. в 2030 г.) способно обеспечить целевое повышение авиаподвижности населения в 1,5 раза (2030 г./2023 г.).

Сокращение численности парка ВС идёт активнее, чем ожидалось, вследствие опережающего выбытия импортных самолётов. Тем не менее запланированные в Комплексной программе темпы обновления парка на основе нового поколения отечественных самолётов позволят обеспечить до 2030 г. удовлетворение ожидаемого спроса, и, соответственно, целевое увеличение перевозок и показателя авиаподвижности.

Обязательным условием для необходимого увеличения провозной способности парка является успешная реализация Комплексной программы как в части планируемых поставок новых самолётов, так и в части планируемого сохранения лётной годности половины парка импортных самолётов. При этом к 2030 г. отечественные самолёты обеспечат 70 % провозной способности магистрального парка, в том числе новые – ≥ 50 %.

⁴ ГОСТ Р ИСО 31000-2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство.

⁵ ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010-2011. Менеджмент риска. Методы оценки риска.

⁶ ГОСТ Р 58771-2019. Менеджмент риска. Технологии оценки риска.

⁷ ГОСТ Р ИСО 11231-2024. Менеджмент риска. Метод вероятностной оценки риска на примере космических систем.

⁸ ГОСТ Р 52806-2007. Менеджмент рисков проектов. Общие положения.

⁹ ГОСТ Р 54869-2011. Проектный менеджмент. Требования к управлению проектом.

Текущий ход выполнения Комплексной программы не является достаточным для уверенной её реализации. Так, график сертификации и выпуска новых самолётов в 2022–2024 гг. уже дважды корректировался, и вероятен дальнейший сдвиг сроков сертификации самолётов. Снижение плановых объёмов выпуска самолётов повлечёт за собой увеличение потребности в продолжении эксплуатации самолётов зарубежного производства до 2030 года (до 60–65 % от их парка в 2022 г.) для удовлетворения спроса на перевозки. Это создаст дополнительные риски по обеспечению провозной способности парка, потребной для целевого повышения авиаподвижности.

Авторы полагают, что оценка и управление рисками выполнения планов создания и выпуска самолётов позволят повысить надёжность реализации Комплексной программы. С целью анализа и оценки рисков предлагается рассматривать Комплексную программу как совокупность независимых проектов создания, производства и ПЛГ самолётов. Интегрирующим показателем риска реализации Комплексной программы в целом является величина возможного дефицита провозной способности парка, потребной для обеспечения целевого объёма авиаперевозок.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников

1. Самойлов И. А., Лесничий И. В., Самойлов В. И., Кипчарский Д. А. Анализ общих тенденций и прогноз развития рынка авиаперевозок российских авиакомпаний // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 39. С. 81–89.
2. Анализ хода достижения стратегических целей развития воздушного транспорта России в части рынка авиаперевозок и парка воздушных судов: отчёт о научно-исследовательской работе. Москва: ГосНИИ ГА, 2024. 177 с.
3. Анализ возможных угроз национальной безопасности в условиях растущей доли иностранных воздушных судов в эксплуатации у отечественных авиакомпаний: Отчёт о научно-исследовательской работе, этап 2. Москва: ГосНИИ ГА, 2011. С. 104–125.
4. Фридлянд А. А., Низаметдинов Р. Р., Горбунов В. П. Прогнозы развития структуры и состава самолётного парка и пассажирских перевозок по сети авиалиний отечественной гражданской авиации // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2024. № 48. С. 115–125.

References

1. Samoylov I. A., Lesnichiy I. V., Samoylov V. I., Kipcharskiy D. A. Analysis of general trends and forecast of the development of the air transportation market of Russian airlines. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 39, pp. 81–89. (In Russ.)
2. *Analysis of the progress in achieving the strategic goals of the development of Russian air transport in terms of the air transportation market and aircraft fleet: Research report*. Moscow, GosNII GA Publ., 2024, 177 p. (In Russ.)
3. *Analysis of possible threats to national security in the context of the growing share of foreign aircraft in operation by domestic airlines: Research report, stage 2*. Moscow, GosNII GA Publ., 2011, pp. 104–125. (In Russ.)
4. Fridlyand A. A., Nizametdinov R. R., Gorbunov V. P. Forecasts of the development of the structure and composition of the aircraft fleet and passenger traffic on the domestic civil aviation airline network. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2024, no. 48, pp. 115–125. (In Russ.)

Информация об авторах

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

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

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

Страдомский Олег Юрьевич, кандидат технических наук, директор Авиационного сертификационного центра, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, stradomskiyou@gosniiga.ru

Authors information

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

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

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

Stradomskiy Oleg Yu., Candidate of Sciences (Engineering), Director of the Aviation Certification Center, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, stradomskiyou@gosniiga.ru

Статья поступила в редакцию 17.03.2025; одобрена после рецензирования 22.05.2025; принята к публикации 31.05.2025.

The article was submitted 17.03.2025; approved after reviewing 22.05.2025; accepted for publication 31.05.2025.

Научная статья

УДК 656.71.06:351.814.335.82

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АЭРОПОРТОВ

А. А. ФРИДЛЯНД, А. П. ЧУБУКОВ, В. П. ГОРБУНОВ

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. Для стабильного обеспечения роста пассажирских авиаперевозок в гражданской авиации (ГА) необходимо своевременное развитие провозных мощностей аэропортов. Аэропортовые мощности следует развивать с учётом прогнозной перспективы роста авиаперевозок через аэропорты, формируя при этом опережающие резервные запасы мощностей аэропортовых сооружений относительно действующих пассажиропотоков. В статье исследуются основные показатели аэропортовых предприятий, находящихся в управлении ведущих отечественных аэропортовых холдингов. Рассмотрена их инвестиционная политика при реализации капиталоемких проектов. Определена одна из основных проблем реализации инвестиционных проектов аэропортов в настоящее время – потребность в высоком росте стоимости авиационных тарифов аэропорта, обусловленном критическим увеличением затрат на обслуживание заёмных средств в периоды аномального роста ключевой ставки (КС) в текущем и прогнозном периоде. Предложен подход по реализации инвестиционного проекта в аэропортовой инфраструктуре, демпфирующий указанное влияние в прогнозном периоде. Проанализирована взаимосвязь «пиковой» пропускной способности аэропортов с годовыми объёмами пассажирских авиаперевозок. Построена соответствующая аппроксимирующая зависимость.

Ключевые слова: гражданская авиация, инвестиционная политика, инвестиционный проект, аэропорт, пропускная способность аэропорта, прогнозирование воздушных перевозок, транспортные системы страны

Для цитирования: Фридлянд А. А., Чубуков А. П., Горбунов В. П. Прогнозирование производственных показателей аэропортов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 50. С. 108–119.

FORECASTING OF AIRPORT PRODUCTION INDICATORS

A. A. FRIDLYAND, A. P. CHUBUKOV, V. P. GORBUNOV

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

Abstract. In order to ensure stable growth of passenger air transportation in civil aviation, it is necessary to develop airport transportation capacities in a timely manner. Airport facilities should be developed taking into account the projected growth prospects for air transportation through airports, while forming advanced reserve reserves of airport facilities in comparison with existing passenger traffic. The article examines the main indicators of airport enterprises managed by leading domestic airport holdings. Their investment policy in the implementation of investment projects is considered. One of the main problems of implementing airport investment projects at the present time has been identified – the need for a high increase in the cost of airport air fares due to a critical increase in the cost of servicing borrowed funds during periods of abnormal growth in the key interest rate in the forecast period. An approach to the implementation of an investment project in the

airport infrastructure is proposed, which dampens the specified impact in the forecast period. The relationship between the “peak” capacity of airports in comparison with the annual volume of passenger air traffic is analyzed and an appropriate mathematical model is proposed.

Keywords: civil aviation, investment policy, investment project, airport, airport capacity, forecasting of air traffic, transport systems of the country

For citation: Fridlyand A. A., Chubukov A. P., Gorbunov V. P. Forecasting of airport production indicators. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2025, no. 50, pp. 108–119. (In Russ.)

Введение

Для стабильного функционирования ГА важное значение имеют процессы поддержания наземной инфраструктуры отрасли в соответствии с требованиями безопасности полётов, нормами современной технической и технологической оснащённости и пропускной способности аэропортовых объектов и сооружений. Решение этих задач осуществляется на основе инвестиционной политики, реализуемой аэропортом, и обеспечивает доступность, приемлемое удобство и комфорт для авиакомпаний, пассажиров и грузоперевозчиков.

Для ведения обоснованной инвестиционной политики в транспортных системах страны важное значение имеет экономическая эффективность аэропорта, дающая возможности вести инвестиционные проекты развития инфраструктуры за счёт собственных средств, аккумулируемых от основной деятельности, погашая инвестиционные займы аэропортовыми доходами.

Важным показателем аэропортовой инфраструктуры является её пропускная способность – годовая и в час «пик». Учёт этих показателей при прогнозировании роста пассажирских авиаперевозок позволяет планировать необходимое время для осуществления инвестиционных мероприятий по росту пропускных возможностей инфраструктуры.

Для реализации инвестиционной политики аэропортов важное значение имеют механизмы привлечения и погашения заёмных средств. Особенно актуальны эти механизмы теперь, когда существенно выросла КС Центробанка России. Введение оптимальных механизмов привлечения и погашения заёмных средств позволяет проводить гибкую инвестиционную политику, смягчающую влияние инфляции за счёт распределения финансовой нагрузки между государством и бизнесом.

Экономическая эффективность (рентабельность) аэропортов, находящихся в управлении отечественных аэропортовых холдингов

В России на современном этапе действуют разнообразные аэропортовые структуры:

- государственные, например, ФКП (Федеральное казённое предприятие) «Аэропорты Севера», ФКП «Аэропорты Чукотки» и др., которые эксплуатируют большое количество местных аэропортов на Севере и Северо-Востоке России [1];

- частные (в т. ч. крупные аэропортовые холдинги, осуществляющие управление аэропортами через механизмы владения контрольными пакетами акций – например, ООО «Новопорт» или АО «Аэропорты регионов»);

- частные и государственные аэропортовые компании, которые эксплуатируют один или несколько действующих аэропортов – например, аэропорт Домодедово (до настоящего времени действовал как частная структура, управляющая одним аэропортом) или АО «Комиавиатранс» – на 100 % принадлежит субъекту Российской Федерации Республике Коми (управляет семью аэропортами: международный аэропорт Сыктывкар, аэропорты Воркута, Ухта, Усинск, Печора, Усть-Цильма, Инта).

Общие характеристики ведущих отечественных аэропортовых холдингов:

- АО Управляющая Компания (УК) «Аэропорты регионов» – основана в 2012 году. Сегодня под её управлением находятся 10 магистральных и региональных аэропортов: Екатеринбург, Самары, Нижнего Новгорода, Саратова, Ростова-на-Дону, Нового Уренгоя, Петропавловска-Камчатского, Благовещенска, Оренбурга и Тобольска. В трёх из них – Петропавловск-Камчатском, Благовещенске и Оренбурге – компания реализует проекты комплексной модернизации аэропортовой инфраструктуры. По итогам 2024 года услугами аэропортов под управлением УК «Аэропорты Регионов» воспользовались более 18,5 млн пассажиров. Общий объём частных инвестиций в проекты, которыми оперирует компания, превышает 100 млрд рублей¹;

- ООО «Новаяпорт» – основано в 2007 году. Холдинг управляет контрольными пакетами акций и имуществом 21 магистральных и региональных аэропортов, в числе которых Новосибирск, Минеральные Воды, Калининград, Тюмень, Челябинск, Пермь, Волгоград, Мурманск и другие. В 2019–2024 гг. «Новаяпорт» построил новые терминалы в девяти аэропортах общей стоимостью 53 млрд рублей. В 2025–2030 годах «Новаяпорт» планирует вложить еще 67 млрд рублей в строительство и реконструкцию аэропортов. В 2024 году аэропорты «Новойпорта» совокупно обслужили 36,4 млн пассажиров²;

- ООО «Аэропорты большой страны» (АБС). В 2020 году два больших холдинга «Аэропорты регионов» и «Новаяпорт» создали совместное предприятие (СП), которое получило наименование «Аэропорты большой страны». СП объединило опыт двух крупных аэропортовых холдингов – в строительстве инфраструктуры и в эффективном управлении региональными аэропортами. Основной вид деятельности – консультирование по вопросам коммерческой деятельности и управления. Сейчас в управлении АБС находится восемь проектов. Это аэропорты Элисты, Благовещенска, Курска, Магадана, Ярославля, Тамбова, Пензы, Магнитогорска³.

- ООО «Аэродинамика» – создано 20 января 2021 года (ранее с 2007 года именовалось ООО «Базэл Аэро») – оператор аэропортов Краснодарского края (Краснодар, Сочи, Анапа), а теперь и Владивостока.

Главными факторами выбора аэропортов для проведения дальнейшего анализа их эффективности приняты:

- факт нахождения аэропорта в управлении ведущих отечественных аэропортовых холдингов или в их совместном управлении;

- динамика развития аэропортов и реализации инвестпроектов.

Для рассмотрения и анализа отобраны: Магадан, Благовещенск, Мурманск, Минводы, Улан-Удэ, Тюмень, Толмачёво. Выбранные аэропорты по своим характеристикам разделяются на 2 группы: аэропорты со средней (рис. 1) и высокой (рис. 2) операционной рентабельностью.

Например, аэропорты Магадан, Благовещенск, Мурманск были взяты в управление в 2021 году и уже в 2023 году они выведены управляющими компаниями (холдингами) на уровень рентабельности по EBITDA в среднем $\approx 27\%$, что соответствует среднеотраслевым данным в 2023 году^{4,5}.

При определении возможности выхода аэропорта на значительное улучшение показателей эффективности важным является продолжительность нахождения аэропортов в

¹ Ведущий аэропортовый холдинг Управляющая Компания «Аэропорты регионов» [Электронный ресурс]. URL: www.ar-management.ru/?ysclid=m2lsa56bt1575040393

² Крупнейший аэропортовый холдинг России оценили в 162 млрд. рублей [Электронный ресурс]. URL: www.forbes.ru/milliardery/514610-krupnejsij-aeroportovij-holding-rossii-ocenili-v-162-mlrd-rublej?ysclid=m2lsklsp6287699373

³ «Брендинг АБС – Аэропорты большой страны». [Электронный ресурс]. URL: <https://asgard-design.com/portfolio/abc/?ysclid=m3498v9yen216716267>

⁴ Отчёты о финансовой деятельности авиапредприятий и организаций воздушного транспорта. Статистические данные АО «Транспортная Клиринговая палата» за 2011–2023 гг.

⁵ Сведения о перевозках пассажиров и грузов. Статистические данные АО «Транспортная Клиринговая палата» за 2011–2024 гг.

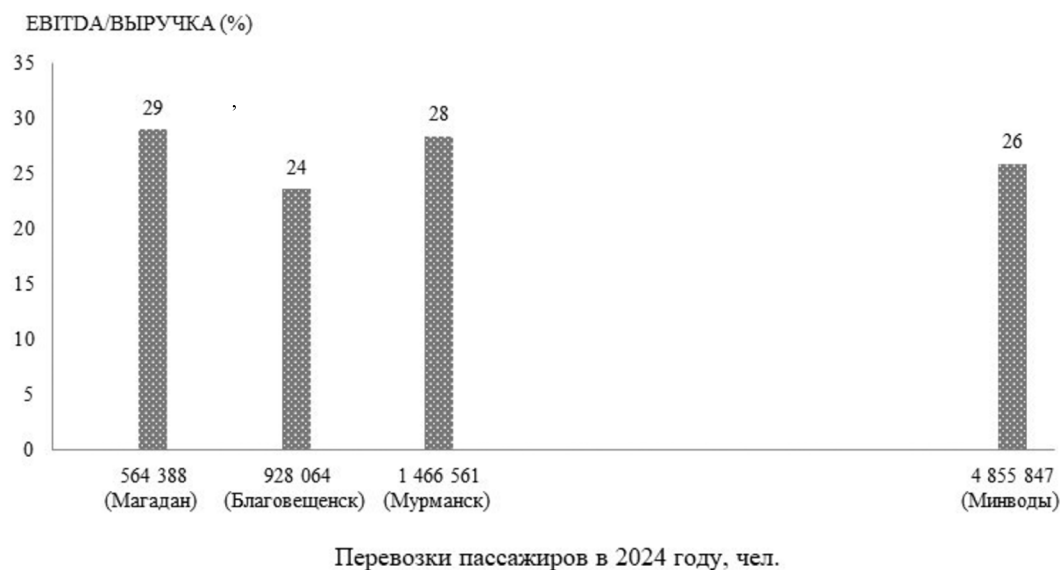


Рис. 1. Аэропорты со средней рентабельностью оборота по ЕВИТДА (%)

управлении со стороны ведущих аэропортовых холдингов. Для обеспечения (настройки) хозяйственного механизма аэропортов на достижение высоких показателей эффективности (рентабельности по ЕВИТДА или чистой прибыли) требуется от двух до трёх лет целенаправленной работы с ними.

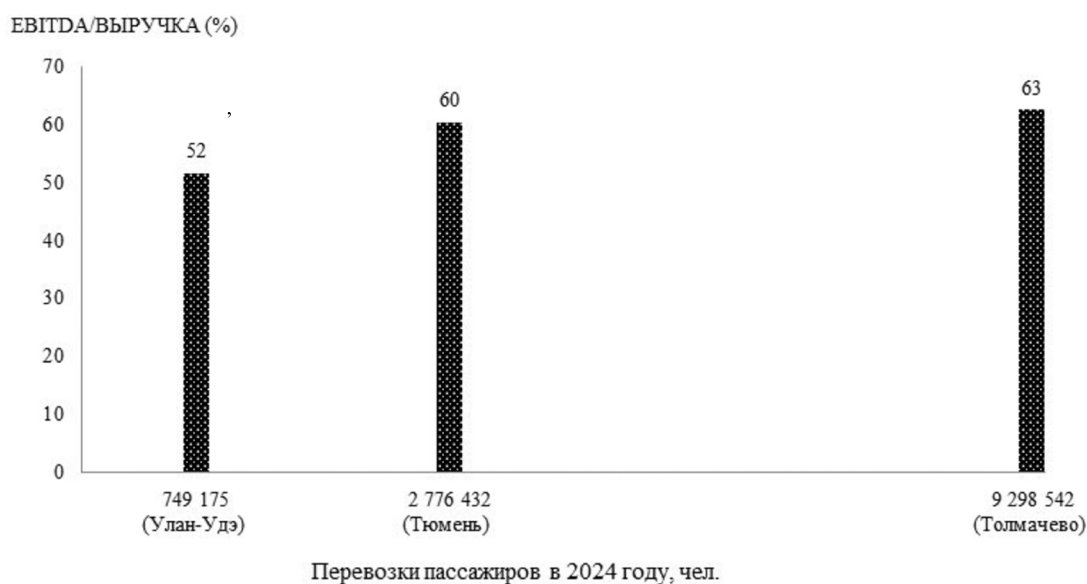


Рис. 2. Аэропорты с высокой рентабельностью оборота по ЕВИТДА (%)

Исключение составляет аэропорт Минеральные воды (Минводы). Аэропорт перешёл под управление холдинга «Новаяпорт» в 2016 году. Находится в южной курортной зоне России, где с началом специальной военной операции были закрыты 11 аэропортов (из них сегодня открылся только аэропорт Элиста). В результате произошло перераспределение пассажиропотоков в другие южноевропейские аэропорты России, к которым относится и аэропорт Минводы. В аэропорту наблюдается интенсивный рост пассажирских авиаперевозок, что потребовало увеличения текущих затрат аэропорта на инфраструктурное обеспечение и, соответственно, снизило его рентабельность по ЕВИТДА до ~26 %.

Аэропорты Улан-Удэ, Тюмень и Толмачёво управляются аэропортовыми холдингами с периода 2014–2017 гг., и, соответственно, выведены на достаточно высокий уровень рентабельности по EBITDA (в среднем она достигла ~60 %). Обеспечение высокой рентабельности аэропортов этой группы связано с необходимостью покрывать из прибыли высокие инвестиционные издержки, обеспечивая тем самым возвратность крупных кредитов. Кредиты взяты под реализуемые инвестиционные проекты, направленные на увеличение пропускной способности рассматриваемых аэропортов.

Инвестиционная политика аэропортов при реализации инфраструктурных проектов

Во всех семи рассматриваемых аэропортах инвестиционные проекты (ИП) направлены на увеличение пассажирской пропускной способности аэровокзальных комплексов (АВК).

Инвестиционные денежные потоки на строительство АВК по исследуемым аэропортам (млн руб.) приведены на рис. 3 и соответствуют реализуемым инвестиционным вложениям.

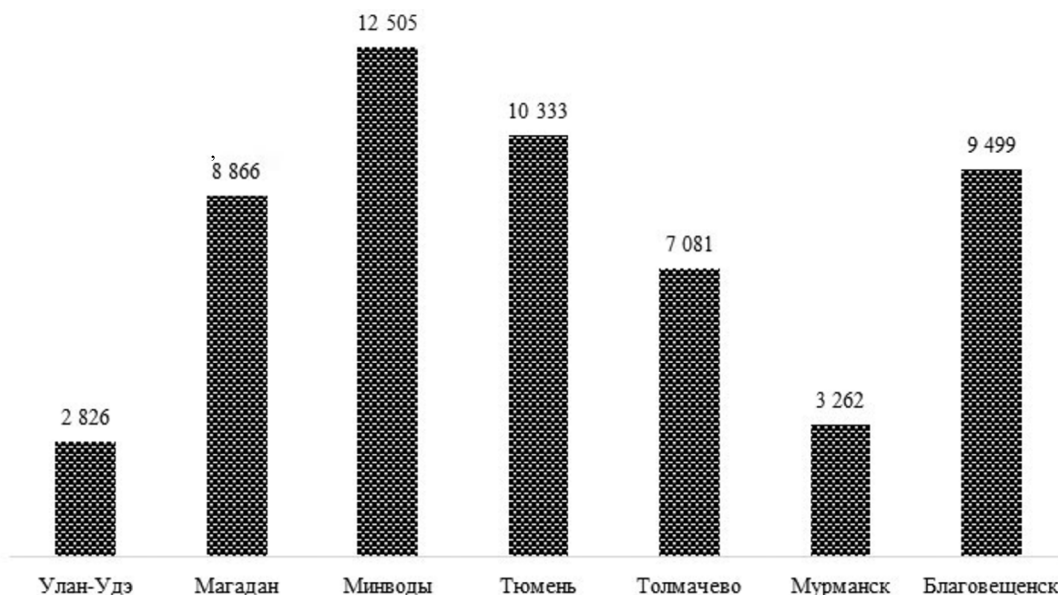


Рис. 3. Инвестиционный денежный поток на строительство АВК по исследуемым аэропортам (млн руб.)

Инвестиционный проект по Улан-Удэ осуществляет ООО «Новпорт» с использованием заёмных средств, капиталовложения в машины и оборудование осуществляются за счёт средств аэропорта.

Финансирование строительства по аэропортам Магадан, Минводы, Тюмень, Толмачёво Мурманск проводится за счёт заёмных средств ООО «Новпорт», как предполагается, в объёме 80 % от общих капитальных вложений, оставшиеся 20 % капитальных вложений – за счёт средств аэропорта.

Для аэропорта Благовещенск финансирование инвестиционной программы предполагается с использованием банковского кредитования (100 %).

Так как ИП реализуются в транспортной инфраструктуре страны и имеют государственное и социальное значение, банки заключали договоры по схеме: «ключевая ставка + (1,5–4,5) %». Когда КС находилась в пределах 6–7 %, это была приемлемая схема. Но к 2025 году ключевая ставка значительно изменилась и выросла до 21 % (рис. 4), что кардинально изменило ситуацию на рынке.

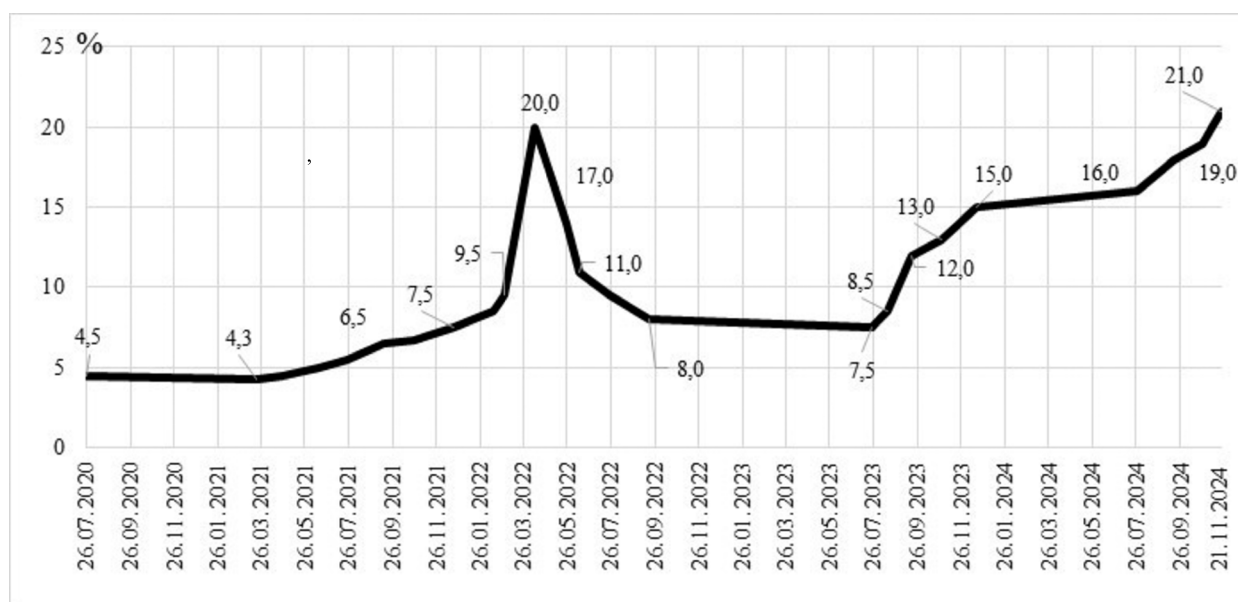


Рис. 4. Динамика КС ЦБ России за период 26.07.2020 – 21.11.2024

В табл. 1 приведены применяемые по исследуемым аэропортам подходы к росту аэропортовых тарифов в целях обеспечения выполнения инвесторами долговых обязательств.

Таблица 1

Рост аэропортовых тарифов для обеспечения возврата инвестиций в исследуемых аэропортах

Аэропорт	Рост аэропортовых тарифов для обеспечения возвратности инвестиций
Улан-Удэ	Скачок (на 20 % в год) тарифов по авиационной деятельности в 2025–2028 гг., далее равномерный рост тарифов – по 6 % в год до 2040 года
Магадан	Скачок (на 10 % в год) тарифов по авиационной деятельности в 2025–2028 гг., далее равномерный рост тарифов – по 6 % в год до 2040 года
Минводы	Скачок (на 30 % в год, кроме взлёт-посадки – на 10 % в год) тарифов по авиационной деятельности в 2025–2028 гг., далее равномерный рост тарифов – по 6 % в год до 2040 года
Тюмень	Скачок (на 25 % в год) тарифов по авиационной деятельности в 2027–2030 гг., далее равномерный рост тарифов – по 6 % в год до 2040 года
Толмачёво	Скачок (в среднем на 24 % в год) тарифов по авиационной деятельности в 2022–2025 гг., далее равномерный рост тарифов – по 6 % в год до 2035 года
Мурманск	Скачок (на 25 % в год) тарифов по авиационной деятельности в 2025–2028 гг., далее равномерный рост тарифов – по 6 % в год до 2040 года
Благовещенск	Ступенчатый рост аэропортовых тарифов: I скачок в 2025 г. (в среднем на 113,8 % в год), в 2026 г. на 26,6 %, в 2027 г. на 6,2 %, в 2028 г. на 5,9 %, в 2029 г. на 5,6 %, в 2030 г. на 2,1 %, в 2031 г. на 3,1 %, в 2032–2035 гг. роста нет. II скачок в 2036 г. (в среднем на 42,6 %), в 2037–2040 гг. роста нет. III скачок – 2041 год, рост на 14,6 %. Далее с 2042 г. равномерный рост тарифов по 2,5 % в год до 2050 года

Начало реализации ИП в рассматриваемых аэропортах приходится на конец 2021 года. Как видно из графика рис. 4, КС находилась в пределах от 6,5 % до 21 %. Скачок КС приходится на период 27.02.2022 (9,5 %) – 13.06.2022 (11 %), максимальное её значение 20 % приходится на период 28.02.2022 – 11.04.2022, далее идёт её постепенное снижение до 8 % (19.09.2022). При реализации ИП прогнозные значения КС, как правило, фиксировались или снижались (в некоторых случаях до 4,25 %), но в некоторые периоды росли (от 7,5 % до 21 % после 26.07.2023).

В реальности, начиная с 26.07.2023 (7,5 %), идёт рост КС и к 28.10.2024 она достигает значения 21 %, на май 2025 г. КС остаётся на этом же уровне.

При взаимодействии участников инвестиционного процесса происходит перераспределение финансовой нагрузки между ними (рис. 5): банком, аэропортом, авиакомпанией, грузопассажирской клиентурой. При высокой КС (например, 20 % и более, как это имело место для участников рынка в мае 2025 г.) подобная схема взаимодействия становится фактически нерабочей из-за высокой стоимости обслуживания долга аэропорта, при которой основной доход от реализации ИП через процентные выплаты достаётся банку.



Рис. 5. Схема финансово-экономического взаимодействия участников экономического процесса при реализации ИП аэропортом

Взаимосвязь пропускной способности аэропортов в час «пик» и годового объёма пассажирских авиаперевозок

Пропускная способность пассажирских терминалов является одним из факторов, влияющих на показатель итоговой пропускной способности аэропорта по пассажиропотоку в целом. Необходимую пропускную способность пассажирского терминала можно определить исходя из прогнозируемого годового пассажиропотока (с учётом коэффициентов суточной (Кс) и часовой (Кч) неравномерности). В соответствии с рекомендациями ГПИиНИИ ГА «Аэропроект» имеет место ориентировочное соответствие пропускной способности аэровокзалов классам аэропортов (табл. 2) [2].

Таблица 2

Рекомендуемая пропускная способность аэровокзалов

Класс аэропорта	Годовой объём перевозок пассажиров, млн чел.	Пропускная способность аэровокзальных комплексов, пасс/ч
I	7,0–10,0	2000, 2500, 3000
II	4,0–7,0	1500, 1800, 2000
III	2,0–4,0	1000, 1200, 1500
IV	0,5–2,0	400, 600, 800, 1000
V	0,1–0,5	100, 200, 400

В работе [3] отмечено, что в практике самое широкое распространение получил параметр, характеризующий поток пассажиров в типовой час «пик». Этот параметр был рекомендован для применения в расчётах Федеральной авиационной администрацией (ФАА) США. Рекомендуемые ФАА соотношения между годовым объёмом пассажирских перевозок и расчётным потоком пассажиров в час «пик» даны в табл. 3.

Таблица 3

Рекомендуемые ФАА США параметры потока пассажиров в час «пик»

Годовой объём пассажирских перевозок, млн чел.	Расчётный поток пассажиров в час «пик», в % от годового объёма перевозок
20 и более	0,030
от 10 до 20	0,035
от 1 до 10	0,040
от 0,5 до 1	0,050
от 0,1 до 0,5	0,065
Менее 0,1	0,120

На основе данных табл. 3 проведена интерполяция и построена модель, аппроксимирующая график функции пиковой пропускной способности аэропорта. Данные расчёта согласно модели приведены в табл. 4, соответствующий график – на рис. 6.

Таблица 4

Опорные точки графика – взаимосвязи пассажирской пропускной способности аэропорта в час «пик» и годового объёма пассажирских перевозок

x	Млн пасс. в год	0,05	0,30	0,75	5,50	15,00
y	Расчётный поток пассажиров в час «пик», в % от годового объёма перевозок	0,120	0,065	0,050	0,040	0,035

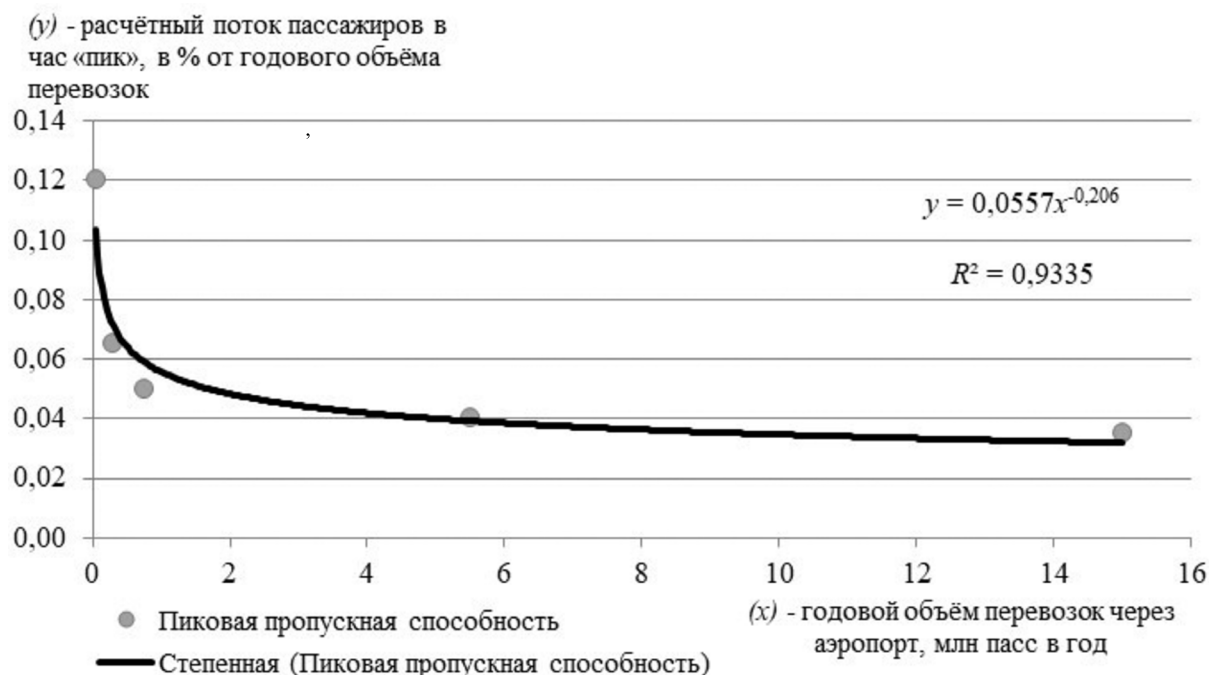


Рис. 6. График взаимосвязи величины типовой пассажирской пропускной способности аэропорта в час «пик» от годового объема пассажирских перевозок

Предложения по формированию инвестиционных проектов аэропортов в сложившейся ситуации в отечественной ГА

При высоком значении КС существующие подходы по финансированию ИП для аэропортовой инфраструктуры отечественной ГА практически, с точки зрения обеспечения эффективности деятельности, неработоспособны^{6, 7}. Можно предложить следующие подходы [4–7]:

- *Крупные, стабильно и эффективно работающие отраслевые инвесторы (например, крупный аэропорт или авиакомпания):* располагают необходимыми возможностями (высокие значения получаемых от деятельности EBITDA) и без привлечения внешних займов или с ограниченным привлечением бюджетных средств либо по концессионному соглашению могут обеспечить реализацию требуемых инфраструктурных ИП. К числу таких предприятий ГА можно отнести структуры, которые сами или через партнеров имеют значительный и высоко-рентабельный бизнес-сегмент в других высокодоходных отраслях.

- *Средние и малые региональные аэропорты:* имеют относительно небольшие доходы по EBITDA, объёмы авиаперевозок через них не позволяют им самостоятельно обеспечить реализацию ИП [8] по восстановлению и капитальному ремонту аэродромов. Для них целесообразно создание целевого инвестиционного фонда.

Президентом России поставлена задача увеличения авиационной подвижности населения $\geq 50\%$ к уровню 2023 года за ближайшие 6 лет, для обеспечения решения которой создаётся специализированный фонд развития инфраструктуры воздушного транспорта. Фонд будет регулярно наполняться за счёт увеличения сборов за аэронавигационное обслуживание отечественных

⁶ А. Львов. Авиакомпании пожаловались в ФАС на рост аэропортовых тарифов. Почему в авиахабах стоимость услуг отличается в разы [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rbc.ru/business/27/02/2024/65dc79809a7947d44b32ba1f?ysclid=m3sl8f1p-wk156553312> (дата обращения: 30.12.2024).

⁷ ФАС предложила изменить порядок тарифов обслуживания аэропортов [Электронный ресурс]. URL: <https://fas.gov.ru/publications/24528?ysclid=m3skqj6l86605759870> (дата обращения: 30.12.2024).

пользователей воздушного пространства. Полученные дополнительные средства пойдут на капитальный ремонт действующих аэродромов: на средства этого фонда планируется проведение капитального ремонта 51 аэродрома отечественной ГА. Отметим, что до настоящего времени источник средств на проведение капитальных ремонтов аэродромов в практике российской ГА сформирован только для относительно малых аэропортов.

Предполагается, что в среднем сбор за аэронавигацию для российских авиакомпаний вырастет примерно на 150 руб. Аэропортовые холдинги обсуждают сценарии инвестиций в поддержание и капремонт принадлежащей государству аэродромной инфраструктуры. Потребность в средствах оценивается примерно в 50 млрд руб. в год. Фонд должен будет выделять располагаемые средства для ИП под фиксированный минимальный (некоммерческий) процент, например 2 %.

Для средних и малых региональных аэропортов целесообразно использование федеральных и/или региональных бюджетных средств для реализации ИП с привлечением, по возможности, средств по договорам концессии в рамках отраслевых инвестиционных программ. Для глобальной реконструкции аэродромной инфраструктуры нашей страны ожидается в ближайшие 6 лет выделение Правительством денежных средств в сумме ≥ 250 млрд рублей. При этом также возможно на нерыночных условиях привлечение внебюджетных источников инвестиций по согласованию с Минфином России, либо в рамках проектов, финансируемых по схеме механизма ГЧП (государственно-частное партнерство).

Возможности бюджетного софинансирования существенно зависят от реализуемого аэропортом пассажиропотока, экономически выгодные схемы финансирования, как правило, реализуются только в тех аэропортах, где пассажиропоток будет стабильно расти до 2030 года. Источники софинансирования в этом случае формируются как из федерального, так и из регионального бюджетов. Например, ФКП «Аэропорты Красноярья» прорабатывают следующую схему работы с аэропортом Воркуты: лимит финансирования – всего 7,7 млрд руб., позиция Минфина России – 2,1 млрд руб. средства субъекта, 5,6 млрд руб. – федеральные средства, которые заложены в бюджет начиная с 2026 года.

В настоящее время по предложению Федеральной антимонопольной службы (ФАС) разработан проект документа, предусматривающий утверждение долгосрочных тарифов при реализации ИП с возможностью исключения из расчёта тарифов результатов превышения согласованных параметров реконструкции аэропорта [4, 5].

Заключение

В статье рассмотрены оценки влияния величины КС ЦБ России на эффективность реализуемых на воздушном транспорте ИП, включая ситуации потери эффективности их реализации.

Изложены подходы к решению задачи реализации инвестиционного проектирования в сложившихся условиях, предусматривающие привлечение для использования в аэропортовой сфере механизмов создания специализированного фонда, бюджетных и собственных средств, механизмов ГЧП.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников

1. Горбунов В. П. и др. Математическая модель работы аэропортов Крайнего Севера, Арктики и Дальнего Востока на основе экономического и топливного критериев в условиях транспортной системы страны // В сборнике: «Проблемы внедрения и применения результатов инновационных исследований и пути их решения: монография. Выпуск 85» / под ред. А. А. Сукиасян. Уфа: Аэтерна, 2024. С. 5–52.

2. Романенко В. А. Расчёт основных параметров пассажирских аэровокзалов: учеб. пособие. Самара: Изд-во СГАУ, 2003. 67 с.
3. Ашфорд Н., Райт П. Х. Проектирование аэропортов / Перевод с англ. А. П. Степушина. Москва: Транспорт, 1988. 327 с.
4. Фридлянд А. А., Чубуков А. П. Развитие пассажирских авиаперевозок и динамика макроэкономических процессов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2019. № 28. С. 93–102.
5. Демин С. С., Фридлянд А. А., Чубуков А. П. Перспективы посткризисного восстановления российского авиатранспортного рынка // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2021. № 34. С. 102–112.
6. Фридлянд А. А., Чубуков А. П. Анализ механизмов долгосрочного прогнозирования воздушных перевозок // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 39. С. 90–100.
7. Горбунов В. П. Определение и анализ релевантных факторов в деятельности аэропортов на основании принципа декомпозиции операционных моделей // Сборник научных статей по материалам международной научно-практической конференции «Воздушный транспорт – основа логистических коммуникаций» (Авиатранс – 2022), МГТУГА, Ростовский филиал, Ростов-на-Дону, 2022. С. 60–68.
8. Фридлянд А. А., Чубуков А. П. Инвестиционные возможности и инвестиционная привлекательность аэропортового бизнеса в РФ. Особенности привлечения финансирования в региональные аэропорты // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2014. № 6. С. 62–67.

References

1. Gorbunov V. P. et al. A mathematical model of the operation of airports in the Far North, the Arctic and the Far East based on economic and fuel criteria in the conditions of the country's transport system. In: *Problems of implementation and application of the results of innovative research and ways to solve them: monograph. Issue 85*, ed. by A. A. Sukiasyan, Ufa, Aeterna Publ, 2024, pp. 5–52. (In Russ.)
2. Romanenko V. A. *Calculation of the main parameters of passenger air terminals*. Training manual. Samara, SGAU Publ., 2003, 67 p. (In Russ.)
3. Ashford N., Wright P. H. *Airport design*. Translated from English by A. P. Stepushin. Moscow, Transport Publ., 1988, 327 p. (In Russ.)
4. Fridlyand A. A., Chubukov A. P. Development of passenger air transportation and dynamics of macroeconomic processes. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2019, no. 28, pp. 93–102. (In Russ.)
5. Demin S. S., Fridlyand A. A., Chubukov A. P. Prospects for post-crisis recovery of the Russian air transport market. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2021, no. 34, pp. 102–112. (In Russ.)
6. Fridlyand A. A., Chubukov A. P. Analysis of the mechanisms of long-term forecasting of air transportation. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 39, pp. 90–100. (In Russ.)
7. Gorbunov V. P. Definition and analysis of relevant factors in airport operations based on the principle of decomposition of operational models. *Collection of scientific articles based on the materials of the international scientific and practical conference "Air transport – the basis of logistics communications" (Aviatrans – 2022)*, MGTUGA, Rostov branch, Rostov-on-Don, 2022, pp. 60–68. (In Russ.)
8. Fridlyand A. A., Chubukov A. P. Investment opportunities and investment attractiveness of airport business in the Russian Federation. The specifics of attracting financing to regional airports. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2014, no. 6, pp. 62–67. (In Russ.)

Информация об авторах

Фридлянд Александр Абрамович, доктор экономических наук, кандидат технических наук, директор Научного центра, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, info@aeroprogress.ru

Чубуков Александр Петрович, кандидат экономических наук, начальник отдела, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, nv-center@mail.ru

Горбунов Владимир Павлович, кандидат технических наук, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, vlad.gorbunov@bk.ru

Authors information

Fridlyand Alexander A., Doctor of Sciences (Economics), Candidate of Sciences (Engineering), Director of The Scientific Center, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, info@aeroprogress.ru

Chubukov Alexander P., Candidate of Sciences (Economics), Head of Department, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, nv-center@mail.ru

Gorbunov Vladimir P., Candidate of Sciences (Engineering), The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, vlad.gorbunov@bk.ru

Статья поступила в редакцию 25.03.2025; одобрена после рецензирования 27.05.2025; принята к публикации 04.06.2025.

The article was submitted 25.03.2025; approved after reviewing 27.05.2025; accepted for publication 04.06.2025.

Научная статья

УДК [656.7.072.51:621.386]:004.032.26

КЛАСТЕРИЗАЦИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ БАГАЖА И РУЧНОЙ КЛАДИ ПАССАЖИРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ОБУЧЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

(публикуется в рамках молодёжной политики Научного вестника ГосНИИ ГА)

Л. В. МИРОНОВА, А. К. ВОЛКОВ

*Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева,
Ульяновск, Россия*

Аннотация. Рассмотрены зарубежные работы, в которых описаны системы распознавания запрещённых предметов и веществ на рентгеновских изображениях. Предлагается дополнить этап распознавания запрещённых предметов и веществ обученной нейронной сетью этапом предварительной кластеризации изображений. Для извлечения признаков изображений используются и сравниваются две нейронные сети с архитектурами CLIP и ResNet50. Для сокращения размерности векторного пространства признаков предлагается использовать алгоритм «Равномерная аппроксимация и проецирование многообразия» (Uniform Manifold Approximation and Projection, UMAP). Для кластеризации изображений используется алгоритм Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (HDBSCAN). Апробация кластеризации проведена авторами на рентгеновских изображениях базы SIXray. Использовался набор из 4123 изображений, содержащих изображения с опасными предметами. Визуализация кластеров изображений осуществлялась с использованием алгоритма t-распределённого стохастического эмбединга соседей (t-distributed Stochastic Neighbor Embedding, t-SNE). По результатам сравнения сделан вывод, что векторы признаков изображений, генерируемые сетью CLIP, лучше подходят для решения задачи кластеризации.

Ключевые слова: предварительно обученная нейронная сеть, запрещённые предметы, запрещённые вещества, рентгеновские изображения, кластеризация, вектор признаков, интеллектуальные транспортные системы

Для цитирования: Миронова Л. В., Волков А. К. Кластеризация рентгеновских изображений багажа и ручной клади пассажиров с применением предварительно обученных нейронных сетей // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 50. С. 120–128.

CLUSTERING OF X-RAY IMAGES OF PASSENGERS' LUGGAGE AND HAND LUGGAGE USING PRE-TRAINED NEURAL NETWORKS

(Published as part of the implementation of the youth policy of the Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation)

L. V. MIRONOVA, A. K. VOLKOV

Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia

Abstract. Foreign studies are presented that describe systems for recognizing prohibited items and substances in X-ray images. It is proposed to augment the recognition stage of prohibited items and substances

in a network trained by a neural network with an additional preliminary image clustering step. Two neural networks with CLIP and ResNet50 architectures are utilized and compared for feature extraction from images. To reduce the dimensionality of the feature vector space, the algorithm “Uniform Manifold Approximation and Projection” (UMAP) is proposed. The algorithm used for image clustering is Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise (HDBSCAN). The clustering was tested on X-ray images from the SIXray database, using a set of 4123 images containing images with hazardous items. Image clusters were visualized using the t-distributed Stochastic Neighbor Embedding (t-SNE) algorithm. Based on the comparison results, it was concluded that the feature vectors of images generated by the CLIP network are better suited for the clustering task.

Keywords: pre-trained neural network, prohibited objects, prohibited substances, X-ray images, clustering, feature vector, intelligent transportation systems

For citation: Mironova L. V., Volkov A. K. Clustering of X-ray images of passengers’ luggage and hand luggage using pre-trained neural networks. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2025, no. 50, pp. 120–128. (In Russ.)

Введение

Применение нейросетевых технологий в интеллектуальных транспортных системах при обеспечении транспортной безопасности, в частности, автоматическое распознавание запрещённых предметов на рентгеновских изображениях багажа и ручной клади пассажиров представляет собой перспективное решение, способное существенно повысить точность, скорость и надёжность процессов досмотра, при этом снижая зависимость от человеческого фактора. В связи с этим в настоящее время наблюдается тенденция активного внедрения интеллектуальных модулей российского производства в технические средства досмотра пассажиров и их багажа. Для обеспечения успешного развития данного направления необходимо наличие релевантных наборов данных для обучения нейросетевых моделей.

Большинство зарубежных исследований в данной области предоставляют научному сообществу базы данных рентгеновских изображений, включающие запрещённые предметы. Эти наборы данных (датасеты) содержат как реальные, так и синтетически сгенерированные изображения, различные классы запрещённых объектов, а также параметры изображений (размерность, качество). Обработка изображений для определения наличия запрещённых предметов в таких наборах выполняется вручную профессиональными специалистами.

Одной из характерных особенностей работы пунктов досмотра является тот факт, что подавляющее большинство рентгеновских снимков багажа и ручной клади не содержат запрещённых предметов или веществ. Более того, в условиях сложности и многозначности изображений человеку затруднительно быстро и правильно распознать и классифицировать объекты на изображении. Для решения данной проблемы отечественные разработчики занимаются созданием собственных баз данных, содержащих необходимые для обучения нейросетей классы объектов. Это позволяет формировать специализированные обучающие модели для различных этапов досмотра. В данной статье для учёта особенностей наличия/отсутствия запрещённых предметов на реальных наборах данных рассмотрено внедрение предварительной кластеризации рентгеновских изображений, дающее возможность автоматизировать процесс выбора изображений, содержащих запрещённые объекты.

Предложенная последовательность обработки рентгеновских изображений включает несколько этапов. На первом этапе рентгеновское изображение, полученное в ходе сканирования, передаётся в модель кластеризации. Затем изображению присваивается кластерная метка. Если изображение относится к кластеру «неопасных» изображений, процесс обработки завершается. В случае, если кластеризация не позволяет присвоить изображению кластерную метку,

оно направляется на следующий этап – распознавание запрещённых предметов и веществ с использованием обученной нейросети.

Обзор существующих научных работ

Рассмотрим методы автоматического распознавания рентгеновских изображений.

В работе [1] представлен высококачественный набор данных OPIXray (Occluded Probable Items X-ray), включающий 8885 рентгеновских снимков чемоданов и сумок, содержащих 5 подвидов ножей. В данной работе на наборе OPIXray также апробирован модуль De-occlusion Attention Module (DOAM), предназначенный для уточнения границ области расположения запрещённых предметов с учётом отображаемого материала и формирования карты распределения внимания. Представлены результаты апробации модуля DOAM в сочетании с методами обнаружения SSD.

Исследование [2] описывает базу данных HiXray (High-quality X-ray), состоящую из рентгеновских снимков, полученных с рентгенотелевизионных интроскопов, установленных в международных аэропортах. Набор HiXray включает 102928 изображений, на которых представлены запрещённые к провозу предметы, относящиеся к 8 различным категориям. Все снимки были предварительно обработаны специалистами для выявления запрещённых предметов. В работе также представлен модуль LIM (Lateral Inhibition Module), подмодули которого фильтруют шум в интерпретируемых изображениях и уточняют информацию о границах областей, содержащих опасные предметы. Оценено применение модуля LIM для распознавания запрещённых предметов на датасетах HiXray и OPIXray [1] с использованием моделей детектирования SSD, FCOS и YOLOv5.

В исследовании [3] описан набор данных SIXray, который включает 1059231 рентгеновский снимок с 8929 запрещёнными предметами, относящимися к 6 категориям. Авторы предлагают метод class-balanced hierarchical refinement (CHR), который подразумевает, что каждое изображение может относиться с определёнными вероятностями к нескольким классам и категориям объектов. Это важно для того, чтобы система могла справляться с дисбалансом количества изображений между классами и эффективно обрабатывать изображения, которые принадлежат к разным категориям. Для достоверного определения содержимого изображения в глубоких нейронных сетях требуется итеративный процесс. Метод CHR направлен на улучшение качества распознавания с учётом сбалансированной по классам функции потерь, применяемой при обучении нейронной сети.

В исследовании [4] представлена система расширенного обучения C-BLX, предназначенная для сегментации запрещённых предметов на рентгеновских изображениях. C-BLX генерирует сегменты областей, потенциально содержащих запрещённые предметы, на основе локальных параметров, характеризующих изменения интенсивности и плотности изображения. Система позволяет прогнозировать категорию как запрещённых объектов, так и безвредных предметов в выделенных сегментах. Для сегментации использовались контуры, соответствующие областям изображений, предсказанным предобученной нейросетью как содержащие запрещённые предметы.

Обзор существующей литературы по автоматическому распознаванию запрещённых предметов в багаже показывает разнообразие подходов к обнаружению таких объектов. В качестве перспективного направления рассматривается применение метода предварительной кластеризации изображений для последующего автоматического распознавания запрещённых предметов на рентгеновских снимках с использованием обученных свёрточных нейронных сетей.

Методы и инструменты, используемые в исследовании

Решение задачи кластеризации рентгеновских изображений включает несколько последовательных этапов, направленных на формирование групп изображений на основе их характеристик.

Последовательность этапов следующая: извлечение признаков изображений с использованием предварительно обученных нейронных сетей; понижение размерности векторов признаков изображений; кластеризация изображений; визуализация полученных кластеров.

Использование предварительно обученных нейронных сетей для извлечения признаков изображений

Метод предполагает использование нейронной сети, которая предварительно была обучена на большом наборе данных, для извлечения соответствующих шаблонов (признаков) изображений. После обучения модели её можно использовать для получения векторов признаков новых изображений, которые не входили в обучающий набор данных.

В данной статье для извлечения признаков используются и сравниваются две нейронные сети с архитектурами CLIP и ResNet50.

Нейросетевая архитектура CLIP (Contrastive Language–Image Pre-Training), является разработкой компании OpenAI [5]. Она представляет собой мультимодальную модель двух различных архитектур (одна из них отвечает за векторное представление изображения, а другая за векторное представление текстового описания), которые связаны между собой латентным векторным пространством с идентичной размерностью за счёт наличия слоёв линейного преобразования для согласования размерностей выходных векторов.

Нейросеть CLIP была обучена на 400 млн связанных пар изображение-текст, взятых из источников свободного доступа. CLIP обучалась ассоциировать визуальные образы с соответствующими текстовыми описаниями на основе контрастного обучения. Главным её отличием и преимуществом по сравнению с традиционными методами детектирования является отсутствие ручной разметки данных в виде конкретных категорий объектов, что принципиально важно в развитии компьютерного зрения в области транспортной безопасности. Вместо этого CLIP обучается предсказывать, какие текстовые описания наиболее подходят для данного изображения из большого набора потенциальных описаний. Это позволяет CLIP выполнять классификацию изображений, которые не были использованы во время её обучения.

Для каждой пары изображение-текст сеть создаёт векторные эмбединги с помощью иллюстративного и текстового энкодеров соответственно [5]. Далее вычисляется косинусное сходство между всеми парами векторных представлений изображений и текста в подмножестве обучающих данных и формируется матрица сходства. Цель состоит в том, чтобы максимизировать функцию потерь – увеличить сходство между векторными представлениями «правильных» пар изображение-текст (диагональные элементы матрицы сходства) и минимизировать сходство между «неправильными» парами (недиагональные элементы матрицы сходства). Благодаря своей архитектуре CLIP обладает рядом преимуществ: за счёт вычисления косинусного сходства между векторными представлениями изображения и текстовым описанием изображение можно отнести к определённому классу; есть возможность классифицировать изображения, на которых нейросеть не обучалась; может масштабироваться к новым задачам и классам, без переобучения сети, устойчива к изменениям в изображениях и их текстовых описаниях [5].

Архитектура свёрточной нейронной сети ResNet50 включает в себя 50 слоёв [6]. Нейронная сеть генерирует 2048-мерное векторное представление изображения. Сеть предварительно обучалась на более чем миллионе изображений из базы данных ImageNet.

Нейросеть ResNet основана на глубоком остаточном фреймворке обучения. Resnet50, несмотря на наличие 50 слоёв, имеет более 23 млн обучаемых параметров, что намного меньше, чем у существующих архитектур. Нейросеть использует остаточное соединение, позволяющее передавать выход предыдущего слоя не только следующему слою, но и обходить его через прямое соединение, складываясь с выходом текущего слоя.

Понижение размерности векторов признаков изображений

В связи с тем, что рассмотренные нейронные сети генерируют большие векторы признаков изображений, в данной работе используется алгоритм UMAP для сокращения размерности векторного пространства. UMAP (Uniform Manifold Approximation and Projection) – это метод обучения многообразиям для уменьшения размерности, который представляет собой практический масштабируемый алгоритм, применимый к данным реального мира. Преимуществом использования UMAP является тот факт, что алгоритм не имеет вычислительных ограничений на размерность исходного пространства признаков, что делает его жизнеспособным в качестве метода уменьшения размерности общего назначения для машинного обучения. Детальное описание работы алгоритма представлено в [7].

Описание алгоритмов кластеризации

Существуют несколько алгоритмов кластеризации данных. Рассмотрим некоторые из них.

Алгоритм кластеризации Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise – DBSCAN [8] основан на принципе вычисления плотности нахождения анализируемых точек в пространстве данных. Он группирует множество близко расположенных друг к другу точек, отсеивая как шумовые помехи точки, которые находятся в областях с низкой плотностью. На результат кластеризации влияют параметры максимально допустимого расстояния между точками и минимального количества точек в окрестности другой точки (для определения её как базовой). При этом точки делятся на 3 класса – базовые, лежащие в области высокой плотности данных; пограничные, лежащие в областях границ кластеров; шумовые, расположенные в области низкой плотности данных и не принадлежащие ни одному из кластеров. На первом этапе алгоритм помечает все точки как шумовые, далее для каждой точки пространства в своём окружении определяет соседние и отбирает базовые точки, после чего модифицированным методом k-ближайших соседей определяются пограничные точки и конечное количество размеченных кластеров. Преимущества DBSCAN состоят в том, что алгоритм обнаруживает кластеры произвольной формы, а также самостоятельно определяет необходимое количество кластеров, что избавляет от необходимости в их подборе. Недостатками DBSCAN являются чрезмерная чувствительность к параметрам максимально допустимого расстояния между точками и минимального количества точек в окрестности другой точки и их ручная настройка.

В алгоритме OPTICS [9], в отличие от DBSCAN, точкам не присваиваются кластеры напрямую, а создаётся график достижимости, определяющий достижимое расстояние для каждой точки, которая в дальнейшем будет относиться к ближайшему кластеру. Такой подход позволяет извлекать данные с переменной плотностью в пределах одного набора данных. При этом точки, расположенные на границах нескольких кластеров, могут считаться смежными, шумовыми, или принадлежащими более крупному обобщённому кластеру в зависимости от задачи исследования.

Алгоритм HDBSCAN [10] рассматривается как расширение алгоритмов DBSCAN и OPTICS. С помощью данного алгоритма решается задача кластеризации при неоднородной плотности точек за счёт исследования всех возможных шкал плотности (автоматической настройки параметров). Как и в OPTICS, при реализации алгоритма используется иерархический подход, позволяющий исследовать кластеры различной плотности и находить подходящее значение максимально допустимого расстояния между точками, что делает модель более устойчивой.

Для кластеризации изображений в настоящем исследовании выбран алгоритм HDBSCAN.

Визуализация кластеров

Визуализация кластеров изображений осуществлялась с использованием алгоритма t-SNE. Алгоритм позволяет уменьшать размерность входных данных до двух пространственных измерений, тем самым позволяя отобразить многомерный вектор признаков на координатной плоскости [11].

Результаты кластеризации

Апробация кластеризации проведена авторами настоящей статьи с использованием рентгеновских изображений упомянутой выше базы SIXray [3], включающей в себя набор данных из 1059231 рентгеновских изображений, которые получены с пунктов досмотра железнодорожных станций КНР. Из общего набора данных 8929 изображений включают в себя запрещённые предметы 6 категорий: огнестрельное оружие, холодное оружие, гаечный ключ, плоскогубцы, ножницы, молоток. Авторами настоящей статьи использовался набор из 4123 изображений с запрещёнными предметами.

Извлечение признаков из изображений и построение модели кластеризации были осуществлены в бесплатной облачной среде Google Colab с использованием аппаратного ускорителя T4 GPU.

Извлечение признаков изображений с применением нейронной сети CLIP заняло 23 мин. В результате данного этапа сгенерировалась матрица размером 512x4123.

Извлечение признаков изображений с применением нейронной сети ResNet50 заняло 31 мин. Размер выходной матрицы после данного этапа составил также 512x4123.

Полученные матрицы подавались на вход алгоритма UMAP, который сокращал исходные векторы признаков до 5-мерных векторов. В качестве параметров данного алгоритма были

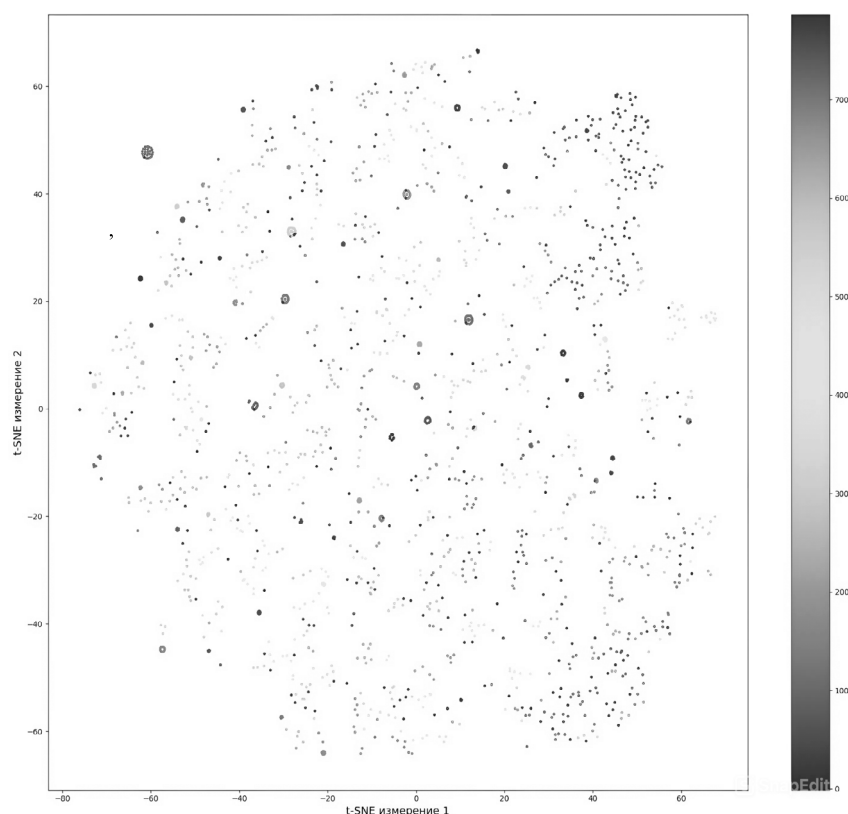


Рис. 1. Визуализация кластеров модели CLIP

выбраны следующие: количество ближайших соседей – 5; минимальное расстояние между точками – 0,03; метрика близости – евклидово расстояние.

Полученные после снижения размерности матрицы размерами 5x4123 подавались на вход алгоритма кластеризации HDBSCAN. Параметры алгоритма: минимальный размер кластера – 3, минимальное количество выборов в окрестности точки, которая будет рассматриваться как основная – 1.

В результате кластеризации векторов признаков изображений, полученных с применением нейронной сети CLIP, было выделено 787 кластеров. Кластеризация оценивалась по таким показателям, как доля событий, не попавших ни в один кластер n и коэффициент силуэта s (мера усреднённой обособленности кластеров). Данные показатели соответственно равны $n=0,12$ и $s=0,54$.

Затем проведена визуализация полученных кластеров алгоритмом t-SNE с параметрами: количество пространственных измерений – 2; перплексия – 30; метрика близости – евклидово расстояние. Перплексия характеризует количество рассматриваемых соседей в окрестности каждой точки. Результаты визуализации представлены на рис. 1. Каждый кластер характеризуется своим оттенком, представленным шкалой справа. Точки, имеющие оттенок, соответствующий 0 на шкале, – это события с меткой кластера, равной –1, то есть не отнесённые ни к одному кластеру.

В результате кластеризации векторов признаков изображений, полученных с применением нейронной сети ResNet50, выделено 753 кластера. Показатели качества кластеризации: $n=0,13$ и $s=0,49$. На рис. 2 представлена визуализация полученных кластеров.

По результатам сравнения показателей n и s можно сделать вывод, что векторы изображений, генерируемые сетью CLIP, лучше подходят для решения задачи кластеризации. При этом времени на их генерацию затрачивается меньше, чем у сети ResNet50. В таблице представлены описания некоторых кластеров, полученных с использованием векторов изображений, сгенерированных сетью CLIP.

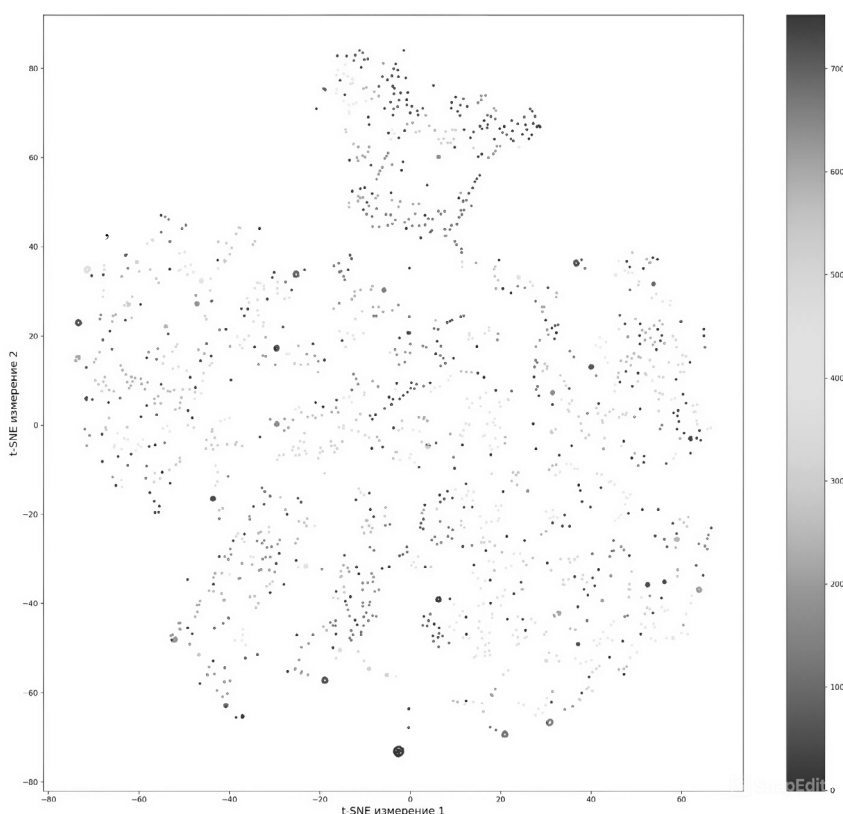


Рис. 2. Визуализация кластеров модели ResNet50

Описание кластеров

№ кластера	Количество элементов	Описание
533	4	3 изображения содержат холодное оружие, одно изображение содержит огнестрельное оружие
403	5	Все 5 изображений содержат огнестрельное оружие, при этом на одном также присутствует холодное оружие

Заключение

Рассмотрена возможность предварительной кластеризации рентгеновских изображений перед этапом автоматического распознавания с использованием обученных свёрточных нейронных сетей. Применение систем автоматического распознавания запрещённых предметов и веществ на рентгеновских изображениях багажа и ручной клади пассажиров перспективно с точки зрения максимального исключения ошибок и снижения рабочей нагрузки на операторов досмотра.

Впервые рассмотрена возможность применения кластерного анализа для сортировки рентгеновских изображений багажа и ручной клади пассажиров.

В результате сравнения показателей качества кластеризации сделан вывод, что векторы изображений, генерируемые сетью CLIP, лучше подходят для решения задачи кластеризации, чем векторы, генерируемые сетью ResNet50. В ходе апробации предлагаемого подхода выявлены 787 кластеров запрещённых предметов. Анализ состава кластеров показал, что они в большинстве своём содержат запрещённые предметы одного класса.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников / References

1. Wei Y., Tao R., Wu Z., Ma Y., Zhang L., Liu X. Occluded prohibited items detection: An X-ray security inspection benchmark and. *Proceedings of the 28th ACM International Conference on Multimedia*, 2020, pp. 138–146. <https://doi.org/10.1145/3394171.3413828>
2. Tao R., Wei Y., Jiang X., Li H., Qin H., Wang J., Ma Y., Zhang L., Liu X. *Towards Real-world X-ray security inspection: A high-quality benchmark and lateral inhibition module for prohibited items detection*. arXiv:2108.09917v1 [cs.CV], 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.09917>
3. Miao C., Xie L., Wan F., Su C., Liu H., Jiao J., Ye Q. SIXray: A large-scale security inspection X-ray benchmark for prohibited item discovery in overlapping images. *2019 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 2119–2128. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00222>
4. Velayudhan D., Ahmed A., Hassan T., Owais M., Gour N., Bennamoun M., Damiani E., Werghi N. Semi-supervised contour-driven broad learning system for autonomous segmentation of concealed prohibited baggage items. *Visual Computing for Industry, Biomedicine, and Art*, 2024. <https://doi.org/10.1186/s42492-024-00182-7>
5. Radford A., Kim J.W., Hallacy C., Ramesh A., Goh G., Agarwal S., Sastry G., Askell A., Mishkin P., Clark J., Krueger G., Sutskever I. *Learning transferable visual models from natural language supervision*. arXiv:2103.00020v1 [cs.CV], 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.00020>
6. Mandal B., Okeukwu A., Theis Y. *Masked Face Recognition using ResNet-50*. arXiv:2104.08997v1 [cs.CV], 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.08997>
7. McInnes L., Healy J. *UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension Reduction*. arXiv:1802.03426v3 [stat.ML], 2020. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1802.03426>

8. Wang D., Lu X., Rinaldo A. *DBSCAN: Optimal rates for density-based cluster estimation*. arXiv:1706.03113v3 [math.ST], 2019. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03113>
9. Ankerst M., Breunig M.M., Kröger P., Sander J. OPTICS: Ordering Points to Identify the Clustering Structure. *Proceedings ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*, 1999, pp. 49–60. <https://doi.org/10.1145/304182.304187>
10. Rahman M. F., Liu W., Suhaim S. B., Thirumuruganathan S., Zhang N., Das G. *HDBSCAN: Density based Clustering over Location Based Services*. arXiv:1602.03730 [cs.DB], 2016. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1602.03730>
11. Van der Maaten L., Hinton G. Visualizing data using t-SNE. *Journal of Machine Learning Research*, 2008, vol. 9, pp. 2579–2605.

Информация об авторах

Миронова Лидия Владимировна, соискатель, Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева, Ульяновск, Россия, lida737@yandex.ru

Волков Александр Константинович, кандидат технических наук, доцент кафедры, Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева, Ульяновск, Россия, volkovalex8@rambler.ru

Authors information

Mironova Lidiya V., Applicant, Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia, lida737@yandex.ru

Volkov Alexander K., Candidate of Sciences (Engineering), Assistant Professor at the Department, Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia, volkovalex8@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 18.03.2025; одобрена после рецензирования 11.06.2025; принята к публикации 20.06.2025.

The article was submitted 18.03.2025; approved after reviewing 11.06.2025; accepted for publication 20.06.2025.

Научная статья
УДК 629.735.015

АДАПТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ПОСТРОЕНИЯ КАРТ ПУАНКАРЕ ДЛЯ АНАЛИЗА НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ ПОЛЁТА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В ТУРБУЛЕНТНОЙ АТМОСФЕРЕ

Б. И. ОГУНВОУЛ

Уральский завод гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. Разработан новый подход к анализу нелинейной динамики полёта воздушных судов (ВС) в условиях турбулентной атмосферы на основе адаптивных алгоритмов построения модифицированных карт Пуанкаре с многоуровневыми сечениями. Предложена концепция многоуровневых сечений фазового пространства с введением промежуточных состояний траекторий, позволяющая устранить потери информации между точками пересечения. Разработан комплексный критерий выбора оптимальных сечений, включающий оценки трансверсальности, информативности и устойчивости к возмущениям. Разработанный алгоритм сохраняет устойчивость при турбулентных возмущениях с интенсивностью до 15 м/с по вертикальной компоненте скорости, превосходя по устойчивости классические методы в 1,5–2 раза. Достигнуто снижение вычислительных затрат на 35 % по сравнению с классическими алгоритмами построения карт Пуанкаре при сохранении точности отображения топологической структуры фазового пространства. Результаты работы могут найти применение при создании систем предупреждения критических режимов полёта и совершенствовании методов обеспечения безопасности полётов в сложных метеорологических условиях.

Ключевые слова: нелинейная динамика, воздушное судно, турбулентная атмосфера, карты Пуанкаре, адаптивные алгоритмы, бифуркационный анализ

Для цитирования: Огунвоул Б. И. Адаптивные алгоритмы построения карт Пуанкаре для анализа нелинейной динамики полёта воздушных судов в турбулентной атмосфере // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2025. № 50. С. 129–139.

ADAPTIVE ALGORITHMS FOR MAPPING POINCARÉ SECTIONS TO ANALYSE NONLINEAR AIRCRAFT FLIGHT DYNAMICS IN TURBULENT ATMOSPHERE

B. I. OGUNVOUL

Ural Civil Aviation Plant, Moscow, Russia

Abstract. Developed a new approach to the analysis of non linear dynamics of aircraft in a turbulent atmosphere based on adaptive algorithms for constructing modified Poincare maps with multilevel sections. The cocept of multilevel sections of file space with the introduction of intermediate states of trajectories is proposed, which makes it possible to eliminate loss of information between intersection points. A complex criterion for selecting optimal cross-sections has been developed, including assessments of trans versality, informativity and resistance to disturbances. The proposed algorithm preserves stability under turbulent perturbations with vertical wind speed component up to 15 m/s, surpassing classical methods in stability by a factor of 1.5–2. Reduced computational costs by 35 % compared to the classic algorithm for constructing Poincaré maps while maintaining the accuracy of displaying the topological structure of the phase space.

Keywords: nonlinear dynamics, aircraft, turbulent atmosphere, Poincaré maps, adaptive algorithms, bifurcation analysis

For citation: Ogunvoul B. I. Adaptive algorithms for mapping Poincaré sections to analyse nonlinear aircraft flight dynamics in turbulent atmosphere. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2025, no. 50, pp. 129–139. (In Russ.)

Введение

Исследование нелинейной динамики воздушных судов в условиях турбулентной атмосферы представляет собой актуальную научно-техническую задачу, имеющую важное практическое значение для обеспечения безопасности полётов [1, 2]. Растущая интенсивность воздушного движения и необходимость выполнения полётов в сложных метеорологических условиях требуют детального понимания особенностей динамического поведения ВС при наличии случайных атмосферных возмущений.

Традиционные методы линейной теории устойчивости оказываются недостаточными для описания сложных нелинейных эффектов, возникающих при взаимодействии ВС с турбулентной атмосферой [3, 4]. Существующие подходы к построению карт Пуанкаре [3, 4] имеют существенные ограничения: недостаточную адаптивность к изменению параметров системы; сложность учёта стохастических воздействий; высокую вычислительную сложность при анализе многомерных систем. Особую проблему представляет отсутствие эффективных критериев выбора сечений Пуанкаре [5, 6].

Классические карты Пуанкаре фиксируют только состояния системы в определённые моменты времени, когда траектория пересекает заранее выбранное сечение фазового пространства. Такой подход ограничивает возможности анализа эволюции системы последовательными пересечениями секущей поверхности, что особенно важно в нелинейных системах, где малые изменения параметров могут привести к кардинальному изменению динамики [7].

Целью исследования является разработка адаптивных алгоритмов построения модифицированных карт Пуанкаре с многоуровневыми сечениями для анализа нелинейной динамики ВС в условиях турбулентной атмосферы. Для этого произведена разработка математической модели движения ВС с учётом турбулентности; создан алгоритм адаптивного выбора сечений; разработаны критерии оценки эффективности алгоритмов; произведена численная верификация результатов.

Впервые разработана концепция многоуровневых сечений фазового пространства с введением промежуточных состояний траекторий, позволяющая устранить потери информации между точками пересечения. В ходе исследования создана модифицированная математическая модель движения ВС с учётом стохастического характера возмущений и разработан комплексный критерий выбора сечений, объединяющий оценку трансверсальности, анализ информативности отображения и показатели устойчивости к возмущениям.

Математическая модель и методология исследования

В работе рассматривается математическая модель пространственного движения ВС в турбулентной атмосфере [1, 8]. Запишем полную систему дифференциальных уравнений движения центра масс в виде:

$$\left. \begin{aligned} \dot{V} &= g(\sin\theta\cos\alpha\cos\beta - \cos\theta\sin\phi\sin\beta - \cos\theta\cos\phi\sin\alpha\cos\beta) - \frac{X_a}{m} + \frac{P}{m}\cos\alpha\cos\beta; \\ \dot{\alpha} &= \omega_z - \operatorname{tg}\beta(\omega_x\cos\alpha + \omega_y\sin\alpha) + \frac{1}{mV\cos\beta}(Y_a - mg\cos\theta\cos\phi\cos\alpha + P\sin\alpha); \\ \dot{\beta} &= \omega_x\sin\alpha - \omega_y\cos\alpha + \frac{1}{mV}(Z_a + mg(\cos\theta\sin\phi\cos\beta - \sin\theta\sin\beta) - P\cos\alpha\sin\beta), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Здесь и далее точка над переменной обозначает производную по времени (например, $\dot{V} = dV/dt$). Все скорости измеряются в м/с, углы в радианах, угловые скорости в рад/с, силы в Н, моменты в Н·м. В системе (1) V – скорость полёта; α – угол атаки; β – угол скольжения; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции угловой скорости на оси x, y, z ; θ – угол тангажа; ϕ – угол крена; X_a, Y_a, Z_a – проекции аэродинамической силы на оси x, y, z ; P – сила тяги двигателей; m – масса воздушного судна; g – ускорение свободного падения.

Уравнения вращательного движения имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} I_x \dot{\omega}_x &= M_x + (I_y - I_z) \omega_y \omega_z; \\ I_y \dot{\omega}_y &= M_y + (I_z - I_x) \omega_x \omega_z; \\ I_z \dot{\omega}_z &= M_z + (I_x - I_y) \omega_x \omega_y, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где I_x, I_y, I_z – осевые проекции момента инерции на оси x, y, z ; M_x, M_y, M_z – проекции момента аэродинамических сил на оси x, y, z .

Кинематические соотношения между углами ориентации ВС записываются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\phi} &= \omega_x + \tan \theta (\omega_y \sin \phi + \omega_z \cos \phi); \\ \dot{\theta} &= \omega_y \cos \phi - \omega_z \sin \phi; \\ \dot{\psi} &= \frac{1}{\cos \theta} (\omega_y \sin \phi + \omega_z \cos \phi), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где ψ – угол рыскания.

Представленная модель справедлива для углов атаки $|\alpha| \leq 15^\circ$, чисел Маха от 0,2 до 0,8 и нормальных перегрузок от 0,3 м/с² до 2,5 м/с².

Для учёта влияния турбулентности вводим стохастические составляющие в виде аддитивных возмущений компонентов скорости и углов ориентации [2, 9]:

$$\left. \begin{aligned} V &= V_0 + \Delta V_w; \\ \alpha &= \alpha_0 + \Delta \alpha_w; \\ \beta &= \beta_0 + \Delta \beta_w, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где индекс “0” соответствует невозмущённому движению, а величины $\Delta V_w, \Delta \alpha_w, \Delta \beta_w$ представляют случайные возмущения от турбулентности.

Статистические характеристики возмущений описываются моделью $\dot{\Delta}_w$ формирующего фильтра:

$$\dot{\Delta}_w = A_w \Delta_w + B_w \xi(t), \quad (5)$$

где вектор возмущений $\Delta_w = [\Delta V_w, \Delta \alpha_w, \Delta \beta_w]^T$; матрица A_w определяет коэффициенты затухания турбулентности; $\xi(t)$ – вектор белого шума с единичной спектральной плотностью; матрица B_w определяет интенсивности турбулентности и имеет размерность [м/с²].

Представленная математическая модель является основой для разработки концепции многоуровневых карт Пуанкаре, рассматриваемой в следующем разделе.

Концепция модифицированных карт Пуанкаре

Для построения карт Пуанкаре рассмотрим фазовое пространство системы размерности n и гладкое подмногообразие Σ размерности $n-1$, трансверсальное фазовому потоку [10, 11]. В качестве секущей поверхности выбираем гиперплоскость, определяемую уравнением:

$$\Sigma = \{ \mathbf{x} \in M : h(\mathbf{x}) = 0 \}, \quad (6)$$

где $\mathbf{x}$ – вектор состояния системы размерности n , функция $h: M \rightarrow \mathbb{R}$ отображает многообразие M в пространство вещественных чисел, при этом секущая поверхность определяется уравнением $h(\mathbf{x})=0$ и является гладкой [12].

Основная идея многоуровневого разбиения фазового пространства заключается в том, что кроме базового сечения, фиксирующего моменты пересечения фазового пространства траекторией ВС, вводятся дополнительные гиперплоскости Σ_k , каждая из которых задаётся своими критериями. Для анализа авиационной динамики учитываются не только моменты пересечения траекторией заданных значений высоты, но и моменты достижения вертикальной скоростью локальных экстремумов, а также изменения параметров управления.

Расширенная карта Пуанкаре $\tilde{P}$ строится как многоуровневое отображение:

$$\tilde{P}: \Sigma \rightarrow \Sigma \times H, \mathbf{x} \rightarrow (P(\mathbf{x}), H(\mathbf{x})), \quad (7)$$

где $P(\mathbf{x})$ – классическое отображение Пуанкаре; $H(\mathbf{x})$ – промежуточные состояния траекторий, содержащие информацию о состояниях системы между основными пересечениями; H – пространство промежуточных состояний.

Промежуточные состояния траекторий $H(\mathbf{x})$ определяются формулой:

$$H(\mathbf{x}) = \{ \mathbf{x}(t_i) : t_{k-1} < t_i < t_k, \|\mathbf{F}(\mathbf{x}(t_i))\| \geq \varepsilon_{th} \}, \quad (8)$$

где t_{k-1} и t_k – моменты последовательных пересечений траекторией основного сечения; $\mathbf{x}(t_i)$ – состояние системы в промежуточный момент времени t_i ; $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ – вектор фазовой скорости; ε_{th} – пороговое значение для фильтрации незначительных изменений динамики системы.

Множество $H(\mathbf{x})$ содержит все состояния системы $\mathbf{x}(t_i)$ в моменты времени t_i , которые находятся между двумя последовательными пересечениями основного сечения Пуанкаре (от t_{k-1} до t_k) и в которых норма вектора фазовой скорости превышает заданный порог ε_{th} . Это позволяет сохранить информацию о значимых изменениях в динамике системы между основными пересечениями.

Определив промежуточные состояния согласно формуле (8), учтём стохастическую природу турбулентности. Расширенная карта Пуанкаре из уравнения (7) дополняется случайной составляющей:

$$\tilde{P}(\mathbf{x}) = P(\mathbf{x}) + \xi_{\Sigma}(\mathbf{x}), \quad (9)$$

где $\xi_{\Sigma}(\mathbf{x})$ представляет проекцию стохастических возмущений Δ_w согласно уравнению (5) на сечение Σ .

Для обеспечения эффективности анализа вводим комплексный критерий качества выбора секущей поверхности:

$$J(\Sigma) = w_1 J_1 + w_2 J_2 + w_3 J_3, \quad (10)$$

где компоненты J_1, J_2, J_3 , являются оценками соответственно трансверсальности, информативности и устойчивости к возмущениям поверхности Σ ; весовые коэффициенты выбираются из условия $w_1 + w_2 + w_3 = 1$, где $w_1 = 0,4$, $w_2 = 0,35$, $w_3 = 0,25$ на основе экспертных оценок.

Трансверсальность оценивается через минимальный угол γ между вектором фазовой скорости $\mathbf{F}(\mathbf{x})$ и нормалью к сечению [3, 11]:

$$J_1 = \min_{\mathbf{x} \in \Sigma} \cos^{-1} \left(\frac{|\mathbf{F}(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{n}|}{|\mathbf{F}(\mathbf{x})| \cdot |\mathbf{n}|} \right), \quad (11)$$

где $\mathbf{n}$ – вектор нормали к сечению.

Информативность определяется через разделение различных типов движения выражением [6, 12]:

$$J_2 = \frac{1}{K(K-1)} \sum_{i=1}^K \sum_{j=i+1}^K d_{ij}, \quad (12)$$

где K – число типов движения; d_{ij} – нормированное расстояние между их проекциями на сечение Пуанкаре.

Для оценки устойчивости к возмущениям используется критерий:

$$J_3 = \frac{1}{\sigma_\Delta + \sigma_\tau}, \quad (13)$$

где σ_Δ характеризует разброс точек пересечения гиперплоскости траекторией, σ_τ – дисперсию времени возврата (интервала между последовательными пересечениями сечения одной и той же траекторией).

На основе введённых критериев выполняем оптимизацию положения сечения градиентным методом с адаптивным шагом:

$$\mathbf{p}_{k+1} = \mathbf{p}_k - \alpha_k \nabla J(\mathbf{p}_k), \quad k=1, 2, \dots, N, \quad (14)$$

где $\mathbf{p} = [n_x, n_y, n_z, d]^T$ – вектор параметров, определяющий положение и ориентацию сечения; α_k – адаптивный шаг; N – максимальное число итераций.

Для повышения устойчивости применяется адаптивная фильтрация по формуле [5, 12]:

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \mathbf{X}_k + K_k (\mathbf{Z}_k - C \mathbf{X}_k), \quad (15)$$

где K_k – матрица усиления фильтра Калмана; $\mathbf{X}_k$ – вектор измерений состояния системы, $\mathbf{Z}_k$ – вектор наблюдений; C – матрица наблюдений.

Результаты численного моделирования

Для проверки работоспособности предложенной методики выполнено численное моделирование динамики ВС типа A320 в условиях турбулентной атмосферы. Основные параметры модели: масса $m = 73500$ кг; площадь крыла $S = 122,6$ м²; размах крыла $b = 34,1$ м; средняя аэродинамическая хорда $c = 4,29$ м.

Временные зависимости параметров движения (рис. 1) показывают, что после короткого переходного процесса динамическая система ВС выходит на установившийся режим колебаний. Скорость полёта стабилизируется около значения $V \approx 223$ м/с, что составляет 97 % от заданной крейсерской скорости $V_0 = 230$ м/с. Угол атаки колеблется около значения $\alpha \approx -0,1$ рад, при этом амплитуда колебаний возрастает с увеличением интенсивности турбулентности от $\pm 0,005$ рад при отсутствии турбулентности (сплошная линия) до $\pm 0,015$ рад при сильной турбулентности (штрих-пунктирная линия). Умеренная турбулентность показана пунктирной линией.

Фазовые портреты системы (рис. 2) демонстрируют характерную структуру предельных циклов, соответствующую устойчивым колебаниям. В проекции $\alpha - w_z$ наблюдается формирование спиралевидных траекторий, сходящихся к предельному циклу. Размер и форма предельного цикла зависят от интенсивности турбулентности: при отсутствии турбулентности (сплошная линия) формируется компактный предельный цикл с чёткой эллиптической структурой; при умеренной турбулентности (пунктирная линия) размер предельного цикла увеличивается, появляется небольшая асимметрия; при сильной турбулентности (штрих-пунктирная линия) наблюдается значительное увеличение размера предельного цикла и его деформация.

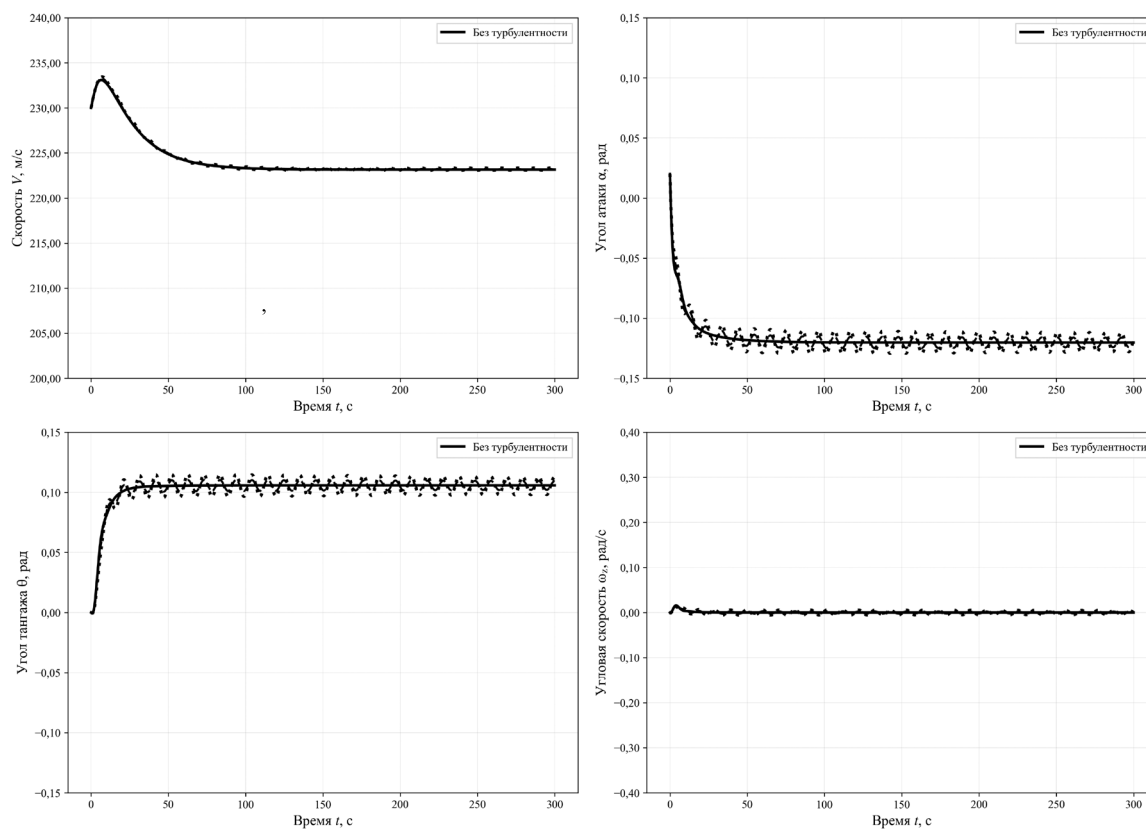


Рис. 1. Временные зависимости параметров движения при различных уровнях турбулентности

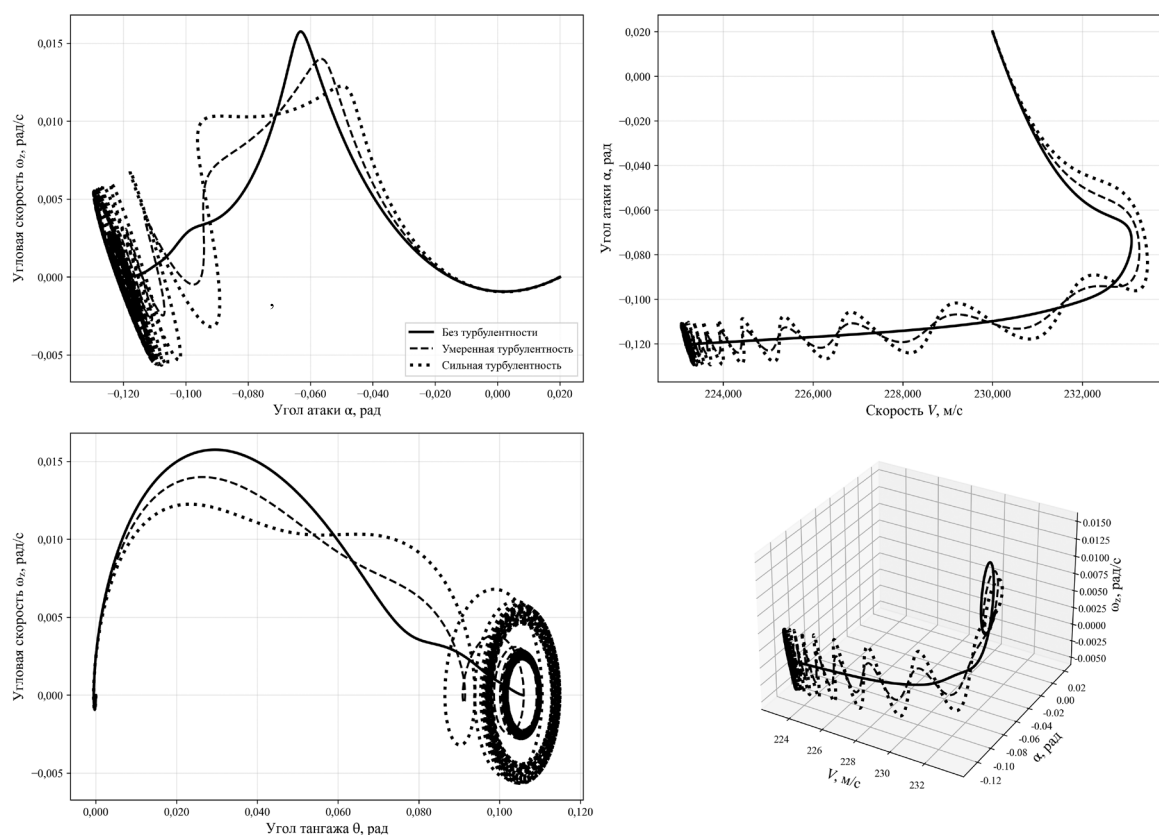


Рис. 2. Фазовые портреты при различных уровнях турбулентности

Карты Пуанкаре, построенные для трёх различных секущих плоскостей ($\theta=0$, $\alpha=0$, $V=V_0$, рис. 3), позволяют детально исследовать структуру фазового пространства. При отсутствии турбулентности точки пересечения секущих плоскостей траекторией формируют чёткие замкнутые кривые, что соответствует квазипериодическому движению. Различные условия пересечения обозначены разными маркерами: круглые маркеры для $\theta=0$, квадратные для $\alpha=0$, треугольные для $V=V_0$. С увеличением турбулентности происходит «размытие» точек пересечения, особенно заметное для сечения $V=V_0$. При сильной турбулентности наблюдается формирование сложной структуры точек пересечения, характерной для детерминированного хаоса.

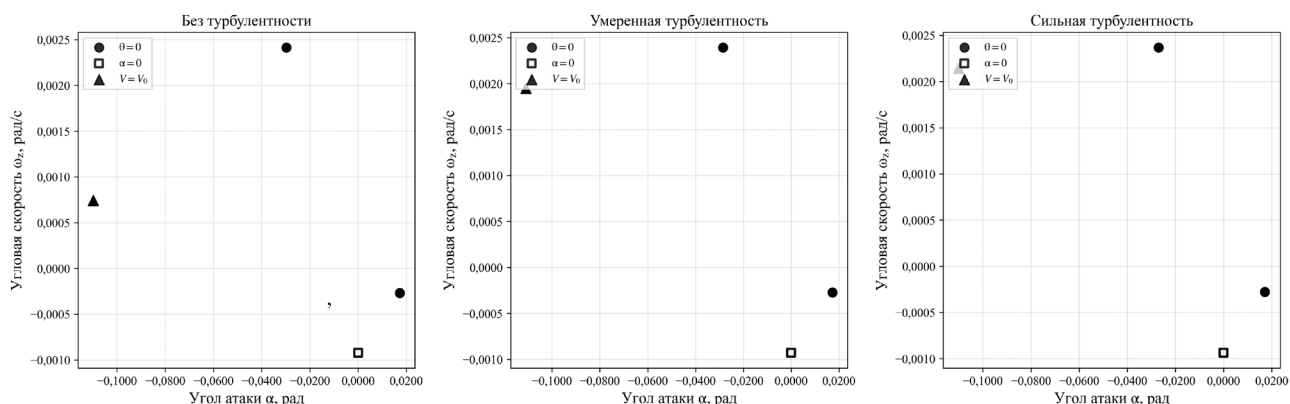


Рис. 3. Карты Пуанкаре для различных секущих плоскостей

Анализ структуры фазового пространства методом временных задержек (рис. 4) подтверждает выводы о характере динамики. Без турбулентности (сплошная линия) траектории образуют гладкие поверхности в пространстве задержек; при умеренной турбулентности (пунктирная линия) появляется «рябь» на поверхностях; при сильной турбулентности (штрих-пунктирная линия) формируется сложная фрактальная структура. На рис. 4 τ обозначает оптимальное время задержки.

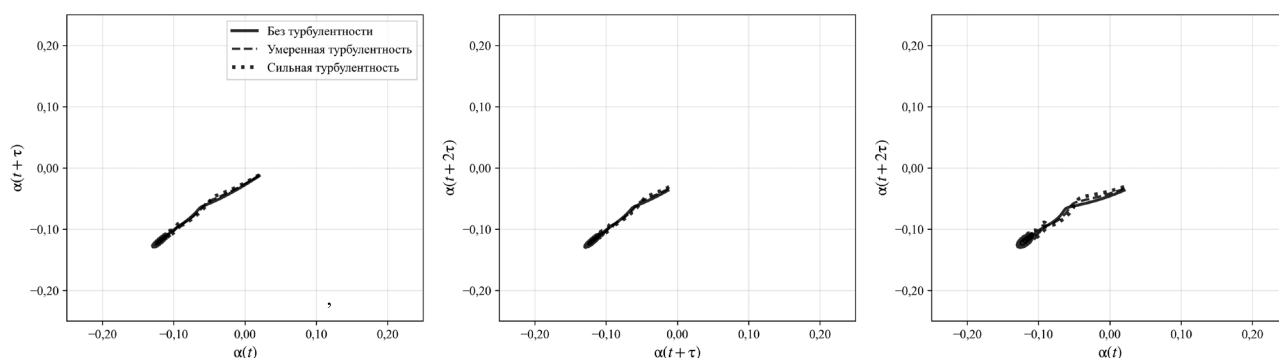


Рис. 4. Анализ структуры фазового пространства методом временных задержек

Валидация разработанной математической модели (рис. 5) осуществлялась путём сравнения расчётных и экспериментальных аэродинамических характеристик. Экспериментальные данные показаны маркерами (круглые точки), расчётные значения модели - сплошными линиями. Сравнение с экспериментальными данными [13] показывает хорошее согласование по коэффициенту подъёмной силы C_y (среднеквадратичное отклонение составляет 0,04427 при доверительной вероятности $P=0,95$) в рабочем диапазоне углов атаки. Аналогичные результаты получены для коэффициента сопротивления C_x (среднеквадратичное отклонение 0,0077 при $P=0,95$).

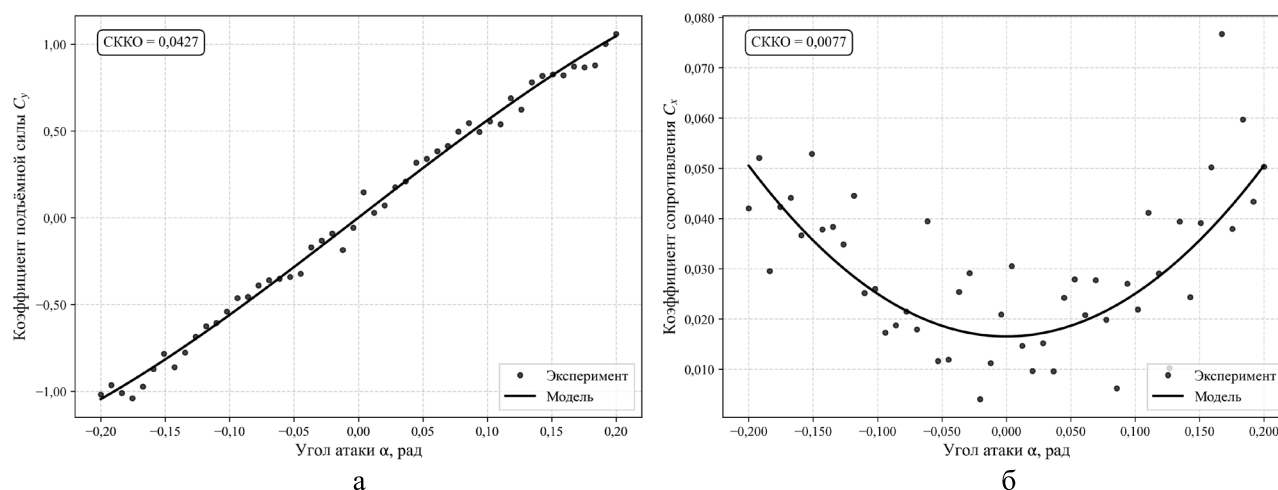


Рис. 5. Валидация аэродинамических характеристик: зависимость $C_y(\alpha)$ – а; зависимость $C_x(\alpha)$ – б

Анализ вычислительной эффективности (рис. 6) показал, что время вычислений (левый график) имеет близкую к линейной зависимость от числа Q точек пересечения траектории с секущей плоскостью с характерным максимумом при $Q \approx 5000$. Относительная погрешность ε (правый график, логарифмический масштаб) монотонно убывает по закону $\varepsilon \propto Q^{-0,8}$. Оптимальное соотношение точность/производительность достигается при $Q \approx 5000$ точек, что обеспечивает погрешность порядка $\varepsilon \approx 5 \cdot 10^{-7}$ при времени расчёта около 0,016 с. Относительная погрешность вычислений не превышает 1,5 % в рабочем диапазоне параметров.

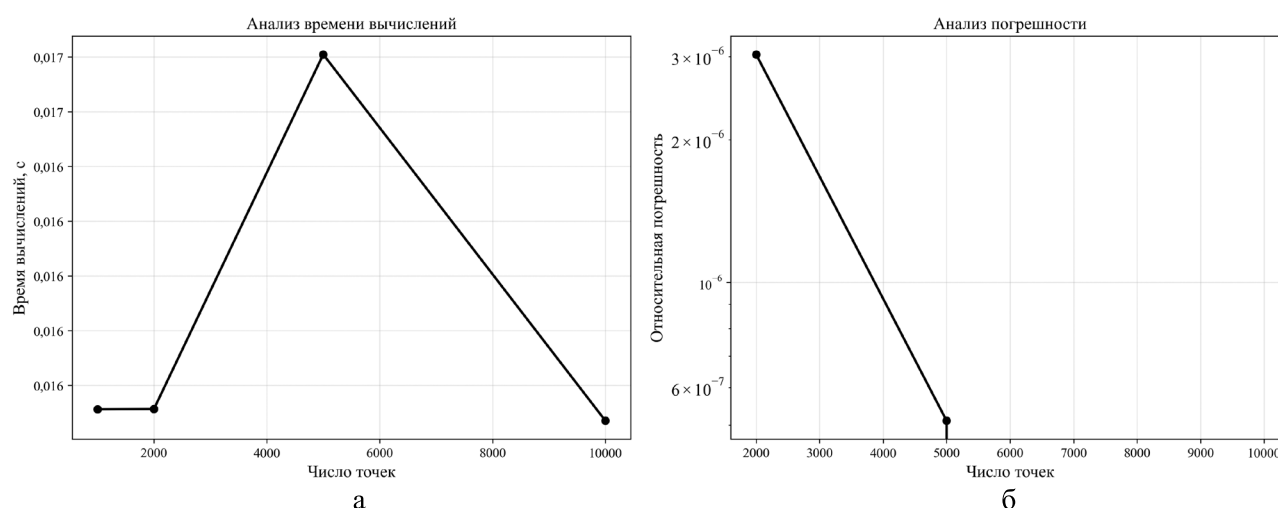


Рис. 6. Анализ вычислительной эффективности: время расчёта – а; относительная погрешность – б

Анализ эффективности предложенного подхода

Эффективность разработанного метода оценивалась по нескольким ключевым показателям. Сравнение традиционными подходами показало существенное снижение вычислительных затрат в среднем на 35 % при сохранении точности отображения топологической структуры фазового пространства. Адаптивный алгоритм выбора сечений позволил повысить информативность получаемых карт Пуанкаре в условиях сильной турбулентности.

Количественная оценка эффективности предложенного подхода дала следующие результаты. По времени вычислений: классический метод требует $t_{\text{класс}} = 0,025$ с, предложенный метод – $t_{\text{нов}} = 0,016$ с, относительное ускорение на 36 %. По требуемой памяти: классический метод использует $M_{\text{класс}} = 2,8$ ГБ, предложенный метод – $M_{\text{нов}} = 1,7$ ГБ, экономия памяти на 39 %. По числу

итераций для достижения заданной точности $\varepsilon = 10^{-6}$: классический метод требует $N_{\text{класс}} = 1250$ итераций, предложенный метод – $N_{\text{нов}} = 800$ итераций, снижение на 36 %.

При исследовании устойчивости к возмущениям установлено, что предложенный метод сохраняет работоспособность при уровне турбулентности до 15 % от характерной скорости полёта, что превышает аналогичный показатель известных методов в 1,5–2 раза. Особенно эффективным оказалось применение адаптивных алгоритмов при анализе переходных режимов, где удалось выявить ранее не описанные бифуркационные сценарии потери устойчивости.

Обсуждение результатов

Проведённые исследования подтвердили высокую эффективность разработанных адаптивных алгоритмов построения карт Пуанкаре для анализа нелинейной динамики ВС в условиях турбулентной атмосферы. Предложенный подход к выбору оптимальных сечений фазового пространства позволил существенно повысить информативность получаемых отображений при одновременном снижении вычислительных затрат.

Концепция модифицированных карт Пуанкаре с многоуровневыми сечениями и промежуточными состояниями траекторий создает новый уровень детализации в анализе динамических систем [3, 7]. Вместо изучения отдельных точек в фазовом пространстве становится возможным построение целостной картины эволюции системы, включая временные зависимости и вариации управляющих воздействий. Это особенно полезно для исследования явлений, связанных с бифуркациями и переходами к хаотическим режимам.

Применение адаптивных критериев выбора сечений по формуле (10) позволяет обнаруживать тонкие эффекты в динамике системы, включая бифуркационные переходы и области детерминированного хаоса, которые имеют определяющее значение для безопасности полётов. Модифицированная математическая модель движения ВС, представленная уравнениями (1)–(3) с учётом стохастического характера атмосферных возмущений согласно выражениям (4)–(5), показала хорошее согласование с экспериментальными данными.

Разработанные алгоритмы оптимизации вычислительной эффективности на основе соотношений (14)–(15) обеспечивают возможность применения метода в системах, работающих в реальном времени при сохранении требуемой точности анализа. Особенно важным результатом является сохранение работоспособности метода при высоких уровнях турбулентности, что открывает новые возможности для исследования критических режимов полёта.

Заключение

В работе решена актуальная научно-техническая задача разработки адаптивных алгоритмов построения модифицированных карт Пуанкаре с многоуровневыми сечениями для анализа нелинейной динамики ВС в турбулентной атмосфере. Разработана концепция многоуровневых сечений фазового пространства с введением промежуточных состояний траекторий, позволяющая устранить потери информации между точками пересечения.

Предложен новый подход к построению карт Пуанкаре, основанный на адаптивном выборе сечений фазового пространства с учётом особенностей турбулентного течения. Разработан комплексный критерий выбора оптимальных сечений согласно выражению (10), включающий оценки трансверсальности, информативности и устойчивости к возмущениям.

На основе численного моделирования динамики самолёта А320 подтверждена эффективность предложенного подхода при различных уровнях турбулентности. Верификация результатов показала высокую точность метода со среднеквадратичным отклонением по коэффициенту подъёмной силы 0,0427 и коэффициенту сопротивления 0,0077.

Разработанные алгоритмы обеспечивают снижение вычислительных затрат на 35 % по сравнению с классическими алгоритмами построения карт Пуанкаре при сохранении точности отображения топологической структуры фазового пространства. Алгоритмы сохраняют работоспособность при интенсивности турбулентных возмущений до 15 % от характерной скорости полёта, что в 1,5–2 раза превышает показатели известных методов.

Дальнейшее развитие исследований может быть направлено на адаптацию разработанных методов к анализу летательных аппаратов нетрадиционных схем и беспилотных ВС.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников

1. Etkin B. *Dynamics of Atmospheric Flight*. New Jersey, J. Wiley & Sons, 1972, 564 p.
2. Su L., Yao H., Du J. Chaotic analysis and control of longitudinal flight dynamics. *Asian Journal of Control*, 2014, vol. 17, no. 5, pp. 1–12.
3. Мун Ф. Хаотические колебания. Москва: Мир, 1990. 312 с.
4. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. Москва: Мир, 1979. 512 с.
5. Poincaré H. *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste*. In 3 vol. Paris, Gauthier-Villars, 1892–1899. (In French)
6. Takens F. Detecting strange attractors in turbulence. In: *Dynamical Systems and Turbulence*. Berlin, Springer, 1981, pp. 366–381.
7. Shahhosseini A., Tien M. H., D'Souza K. Poincare maps: a modern systematic approach toward obtaining effective sections. *Nonlinear Dynamics*, 2023, vol. 111, pp. 529–548.
8. Young L. S. Entropy, Lyapunov exponents, and Hausdorff dimension in differentiable dynamical systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1983, vol. 30, no. 8, pp. 599–607.
9. Гукенхеймер Дж., Холмс Ф. Нелинейные колебания, динамические системы и бифуркации векторных полей. Москва, Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2002. 559 с.
10. Боголюбов Н. Н., Митропольский Ю. А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. Москва: Наука, 1974. 504 с.
11. Арнольд В. И. Дополнительные главы теории обыкновенных дифференциальных уравнений. Москва: Наука, 1978. 304 с.
12. Кузнецов С. П. Динамический хаос. Москва: Физматлит, 2001. 296 с.
13. Gill S. J., Lowenberg M. H., Krauskopf B., Puyou G., Coetzee E. Bifurcation analysis of the NASA GTM with a view to upset recovery. *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference*, 2012, 4648, pp. 1–16. <https://doi.org/10.2514/6.2012-4648>

References

1. Etkin B. *Dynamics of Atmospheric Flight*. New Jersey, J. Wiley & Sons, 1972, 564 p.
2. Su L., Yao H., Du J. Chaotic analysis and control of longitudinal flight dynamics. *Asian Journal of Control*, 2014, vol. 17, no. 5, pp. 1–12.
3. Moon F. C. *Chaotic Vibrations*. Moscow, Mir Publ., 1990, 312 p. (In Russ.)
4. Nikolis G., Prigozhin I. *Self-realization in caring systems*. Moscow, Mir Publ., 1979, 512 p. (In Russ.)
5. Poincaré H. *Les méthodes nouvelles de la mécanique céleste*. In 3 vol. Paris, Gauthier-Villars, 1892–1899. (In French)
6. Takens F. Detecting strange attractors in turbulence. In: *Dynamical Systems and Turbulence*. Berlin, Springer, 1981, pp. 366–381.

7. Shahhosseini A., Tien M. H., D'Souza K. Poincare maps: a modern systematic approach toward obtaining effective sections. *Nonlinear Dynamics*, 2023, vol. 111, pp. 529–548.
8. Young L. S. Entropy, Lyapunov exponents, and Hausdorff dimension in differentiable dynamical systems. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1983, vol. 30, no. 8, pp. 599–607.
9. Guckenheimer J., Holmes P. *Nonlinear oscillations, dynamical systems, and bifurcations of vector fields*. Moscow, Izhevsk, Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2002, 559 p. (In Russ.)
10. Bogolyubov N. N., Mitropolskiy Yu. A. *Asymptotic methods in nonlinear vibration theory*. Moscow, Nauka Publ., 1974, 504 p. (In Russ.)
11. Arnold V. I. *Additional chapters of the theory of ordinary differential equations*. Moscow, Nauka Publ., 1978, 304 p. (In Russ.)
12. Kuznetsov S. P. *Dynamic chaos*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001, 296 p. (In Russ.)
13. Gill S. J., Lowenberg M. H., Krauskopf B., Puyou G., Coetzee E. Bifurcation analysis of the NASA GTM with a view to upset recovery. *ALAA Atmospheric Flight Mechanics Conference*, 2012, 4648, pp. 1–16. <https://doi.org/10.2514/6.2012-4648>

Информация об авторе

Огунвоул Блессинг Израилевич, Уральский завод гражданской авиации, Москва, Россия, ogunvouluni@yandex.ru

Author information

Ogunvoul Blessing I., Ural Civil Aviation Plant, Moscow, Russia, ogunvouluni@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 17.04.2025; одобрена после рецензирования 25.06.2025; принята к публикации 02.07.2025.
The article was submitted 17.04.2025; approved after reviewing 25.06.2025; accepted for publication 02.07.2025.

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 25.07.2025

Печать офсетная
15,4 усл. печ. л.

Формат 60x84 1/8
Заказ № 25-102ж

11,0 уч.-изд. л.
Тираж 70 экз.

Изготовлено и оформлено: ООО «Типография Миттель Пресс»

e-mail: mittelpress@mail.ru

Автор вёрстки: Михеева А. В.