

**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 (№ 354)

№ 43

**Москва
2023**

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, 2023

Редакционная коллегия

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

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

тел./факс: 8 (495) 956 49 63 (*1018)

e-mail: science@gosniiga.ru

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

Editorial Board

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

The members of the Editorial Board

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

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

e-mail: science@gosniiga.ru

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

СОДЕРЖАНИЕ

Аэронавигация и эксплуатация авиационной техники

Муравьев И. С. Метод обучения пилотов поддержанию навыков ручного пилотирования в автоматическом режиме и его экспериментальное исследование	9
Фролова Л. И., Волков А. К., Косачевский С. Г., Заббаров З. Р. Диагностика схем распределения и переключения зрительного внимания пилотов при первоначальной лётной подготовке	19
Коваленко Г. В., Ядров И. А. Перспективы применения интеллектуальных адаптивных систем поддержки принятия решений экипажами гражданских воздушных судов	28
Масленникова Г. Е., Дмитриева С. В., Тажетдинов Р. Р. Изменение тяговых характеристик вертолётов Ми-8Т в условиях температур наружного воздуха выше стандартной атмосферы	39
Павлова В. И., Ищенко Л. В. Синтез эквивалентных электрических схем замещения цепей питания приёмников электроэнергии по критерию близости амплитудно-частотных характеристик	46
Щербаков Д. Е. Метод адаптивной калибровки систем мониторинга для улучшения точности вычисления геометрической высоты воздушных судов	56
Павлов М. В., Панков А. В., Свиридов А. А. Исследование эффективности критериев при оценке прочности композитных механических соединений	68
Павлов М. В., Панков А. В., Свиридов А. А. Расчётно-экспериментальное исследование механических свойств композитных полуфабрикатов большой толщины	81
Дроков В. Г., Дроков В. В., Мурыщенко В. В., Блинов А. В., Мухутдинов Ф. И. Влияние точки отбора на информационную представимость пробы масла при диагностировании авиационных газотурбинных двигателей	93

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

- Рухлинский В. М., Куклев Е. А., Мельник Д. М.** Моделирование сбойной ситуации оператора аэродрома на основе анализа нечёткого множества данных и событий 105
- Малышев М. И.** Сложные транспортные системы: сформировавшиеся понятия и современное определение 117
- Фридлянд А. А., Чубуков А. П., Низаметдинов Р. Р.** Экономические аспекты совершенствования системы технического обслуживания и ремонта воздушных судов в условиях санкций 127
- Плясовских А. П.** К вопросу использования формул специальной теории относительности в спутниковой навигации 136
- Шаров В. Д., Образцов Р. А., Поляков П. М.** О показателях безопасности полётов, их целевых и пороговых уровнях 145
- Беньяминова П. И., Феоктистова О. Г.** Нормативно-правовое регулирование акустической безопасности при организации пассажирских перевозок воздушным транспортом 156

Интеллектуальные транспортные системы

- Плясовских А. П., Шестаков И. Н.** Радиовещательное автоматическое гибридное наблюдение АНС-В 165
- Щербаков Д. Е., Вергазов С. М., Самойлова О. В., Сутормина А. В.** Использование разных источников метеорологических данных для повышения достоверности оценок погрешностей систем измерения высоты 176
- Петрухин С. А., Черников П. Е., Глухов Г. Е., Карапетян А. Г.** Микросервисная и сервис-ориентированная архитектуры в задачах оптимизации управления информационной инфраструктурой ИТ-подразделения 187

SCIENTIFIC BULLETIN OF THE STATE SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE OF CIVIL AVIATION

№ 43

2023

CONTENTS

Navigation and operation of aircraft

Muraviov I. S. Method of teaching pilot to maintain manual pilot skills in automatic mode and its experimental study	9
Frolova L. I., Volkov A. K., Kosachevskiy S. G., Zabbarov Z. R. The research and diagnostics of cadet-pilots visual attention distribution in order to develop intelligent data analysis systems for flight simulators	19
Kovalenko G. V., Yadrov I. A. Prospects for the use of intelligent adaptive decision support systems for civil aircraft crews	28
Maslennikova G. E., Dmitrieva S. V., Tazhetdinov R. R. Change in thrust characteristics of Mi-8T helicopters at temperatures above standard air temperatures	39
Pavlova V. I., Ishchenko L. V. Synthesis of equivalent electrical replacement circuits for power supply circuits of electric power consumers by the criterion of proximity of amplitude-frequency characteristics	46
Shcherbakov D. E. Method for adaptive calibration of monitoring systems to improve the accuracy of aircraft geometric height calculation	56
Pavlov M. V., Pankov A. V., Sviridov A. A. Research of the efficiency of criteria in assessing the strength of composite mechanical joints	68
Pavlov M. V., Pankov A. V., Sviridov A. A. Research and experimental study of mechanical properties of pre-preg composite with thick thicknesses	81
Drokov V. G., Drokov V. V., Muryshchenko V. V., Blinov A. V., Mukhutdinov F. I. Influence of the sampling point on the information representativeness of the oil samples during diagnostics of aircraft gas turbine engines	93

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

Rukhlinskiy V. M., Kuklev E. A., Melnik D. M. Simulation of a failure situation of an airdrome operator based on the analysis of a fuzzy set of data and events	105
Malyshev M. I. Complex transport systems: formed concepts and modern definition	117
Fridlyand A. A., Chubukov A. P., Nizametdinov R. R. Economic aspects of improving the aircraft maintenance and repair system under sanctions	127
Plyasovskikh A. P. On the question of the use of the formula of special relativity in satellite navigation	136
Sharov V. D., Obraztsov R. A., Polyakov P. M. About safety performance indicators, their targets and triggers	145
Benyaminova P. I., Feoktistova O. G. Regulatory control of acoustic safety in the organization of passenger transportation by air	156

Intelligent transport systems

Plyasovskikh A. P., Shestakov I. N. Automatic hybrid surveillance-broadcast AHS-B	165
Shcherbakov D. E., Vergazov S. M., Samoylova O. V., Sutormina A. V. Usage of different sources of meteorological data to increase altimetry system error measurement veracity	176
Petrukhin S. A., Chernikov P. E., Glukhov G. E., Karapetyan A. G. Microservice and service-oriented architectures in the tasks of optimizing the management of IT information infrastructure	187

Научная статья
УДК 629.7.073.6

МЕТОД ОБУЧЕНИЯ ПИЛОТОВ ПОДДЕРЖАНИЮ НАВЫКОВ РУЧНОГО ПИЛОТИРОВАНИЯ В АВТОМАТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ И ЕГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

И. С. МУРАВЬЕВ

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

Аннотация. Профессиональная подготовка пилотов при переучивании на высокоавтоматизированные воздушные суда (ВС) последнего поколения требует учёта того, что их пилотирование практически не предусматривает ручного режима. Поскольку известные методы и программы профессиональной подготовки пилотов не ориентированы на полёт в автоматическом режиме пилотирования, возникает потребность в разработке качественно нового тренинга пилотов, учитывающего эти обстоятельства. Разработан метод обучения пилотов, основанный на предварительном расчёте количества информации, воспринимаемой и запоминаемой пилотом, а также на определении рационального порядка предъявления и запоминания этой информации в процессе обучения. Метод предполагает выполнение 32 полётов, обработка результатов основана на применении линейной модели с одним оператором для расчёта вероятности ошибки, допущенной пилотом в зависимости от исходного и текущего количества узнаваемой и воспроизводимой информации. Результаты эксперимента показали, что пилоты, обученные с применением разработанного метода, на 37 % эффективнее выполнили полёт при внезапном отказе автопилота. Обработка результатов эксперимента показала, что при применении разработанного метода статистически достоверно повысилась надёжность пилотирования при эксплуатации авиационной техники.

Ключевые слова: пилотирование воздушных судов, подготовка пилотов, тренинг пилотов, надёжность пилотирования, навык ручного пилотирования, пилотирование в автоматическом режиме, эксплуатация авиационной техники

Для цитирования: Муравьев И. С. Метод обучения пилотов поддержанию навыков ручного пилотирования в автоматическом режиме и его экспериментальное исследование // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 43. С. 9–18.

METHOD OF TEACHING PILOT TO MAINTAIN MANUAL PILOT SKILLS IN AUTOMATIC MODE AND ITS EXPERIMENTAL STUDY

I. S. MURAVIOV

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

Abstract. The professional training of pilots when retraining for highly automated aircraft of the latest generation requires taking into account the fact that their piloting practically does not provide for a manual mode. Since the known methods and pilot training programs are not focused on flying in automatic piloting mode, there is a need to develop a qualitatively new pilot training that takes this circumstance into account. For this purpose, a pilot

training method has been developed, based on a preliminary calculation of the amount of information perceived and remembered by the pilot, as well as on determining the rational order for presenting and memorizing this information in the learning process. The method assumes the performance of 32 flights, the processing of the results is based on the use of a linear model with one operator about the probability of an error made by the pilot, depending on the initial and current amount of recognizable and reproducible information. The results of the experiment showed that pilots trained using the developed method were 37 % more efficient in performing a flight in the event of a sudden failure of the autopilot. Processing of the results of the experiment showed that when using the developed method, the reliability of piloting during the operation of aviation equipment increased statistically significantly.

Keywords: piloting of aircraft, training of pilots, training of pilots, reliability of piloting, skill of manual piloting, piloting in automatic mode, operation of aviation equipment

For citation: Muraviov I. S. Method of teaching pilot to maintain manual pilot skills in automatic mode and its experimental study, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2023, no. 43, pp. 9–18. (In Russ.)

Введение

В настоящее время существует актуальная проблема при эксплуатации ВС последнего поколения (ВСПП), состоящая в необходимости поддержания навыков ручного пилотирования при включённом автопилоте [1, 2]. Большинство авиакомпаний проводит политику максимально возможного использования автоматике ВС при выполнении полётов. Сложность проблемы заключается не столько в том, чтобы сохранить у пилотов навыки непосредственного ручного пилотирования, а в том, чтобы научить лётный состав контролировать процессы управления ВС на различных режимах автоматизированного полёта и уметь рационально использовать весь его потенциал [3, 4].

Особенностью здесь является то, что пилот зачастую не воздействует непосредственно на органы управления (штурвал, рычаги управления двигателя), но задаёт необходимые режимы (или вводит команды) для автоматизированных систем самолёта, которые связаны со средствами управления ВС [5]. Такое «отдаление» пилота от непосредственного контура управления оказывает значительное влияние на принципы пилотирования ВСПП.

Современные методики не учитывают эти особенности, что негативно влияет на обеспечение безопасности полётов. Чтобы решить эту проблему и вернуть пилота в контур управления в процессе автоматизированного режима пилотирования, не прибегая при этом к ручному пилотированию, необходимо использовать процессы рабочей памяти пилота в период формирования навыка по управлению ВС при использовании автоматических систем управления. Эти процессы деятельности рабочей памяти состоят из процессов узнавания и воспроизведения [6, 7].

Достичь этого можно за счёт использования линейной модели с одним оператором, которая позволяет выполнить расчёт количества информации, порядок её использования в тренировочном полёте [8, 9]. Расчёт позволил также определить длительность обучения пилотов, выраженную в количестве полётов, которое необходимо выполнять пилотам в процессе обучения [10]. Подставляя различные значения величин d (информация, которую пилот должен видеть в текущий момент времени для принятия решения) и m (информация, которую может видеть пилот в текущий момент времени для принятия решения), удалось определить такое соотношение количества информации и последовательности её запоминания, которое позволило пилотам экспериментальной группы быстрее и эффективнее брать под контроль пилотирование ВС при максимальной степени автоматизации [11, 12]. Такой результат расчёта достигается за счёт постепенного увеличения запоминаемой пилотом информации:

первоначально запоминанию подлежит параметр скорости;

на втором этапе запоминанию подлежат: параметр скорости и информация на сигнализаторе режимов полёта – FMA (flight mode annunciator);

на третьем этапе запоминанию подлежат: параметр скорости, FMA и угол тангажа;
на четвёртом этапе запоминанию подлежат: параметр скорости, FMA, угол тангажа и вертикальная скорость.

Эта тренировка запоминания в свою очередь позволит сократить время на подготовку пилотов и повысить качество подготовки за счёт правильного формирования у пилотов когнитивно-информационных алгоритмов деятельности [13, 14].

Метод

Особенность метода состоит в том, что выполняется предварительный расчёт информации, которую пилоту необходимо обрабатывать в тренировочном полёте. Кроме того, с помощью математического расчёта определяется оптимальная последовательность обработки пилотом предъявляемой информации и количество информации, которую ему необходимо запоминать; также определяется необходимая длительность обучения, выраженная в количестве полётов, выполняемых в процессе обучения.

Существо расчёта состоит в следующем. Для каждого этапа полёта берётся общее количество приборов, с которыми пилоту необходимо работать. Далее, в соответствии с линейной моделью с одним оператором производится расчёт вероятности совершения пилотом ошибки при выполнении рассматриваемого этапа полёта:

$$Pr(x_n = 1) = (1 - c)^{n-1} (1 - g).$$

Здесь $x_n = 1$ означает, что в n -м повторении пилот допустит ошибку в своих действиях по восприятию и переработке информации; c – вероятность того, что пилот принимает правильное решение в текущий момент времени, или увидит то, что ему необходимо для принятия правильного решения. Также c – вероятность того, что пилот перейдёт из состояния необученности в состояние обученности, выполнив всё, что необходимо в текущий момент выполнения полёта; g – вероятность того, что пилот при выполнении текущего этапа полёта выполнит правильные действия наугад, оставшись в состоянии необученности. Определим параметр c теоретически, до проведения эксперимента, как $c = d/m$, где d – это та информация, которую пилот должен видеть, а m – информация, которую может видеть пилот в текущий момент времени для принятия решения.

Подбором различных соотношений величин d и m установлено, что для наиболее эффективного использования предъявляемой пилоту информации необходимо в процессе обучения пилотированию в автоматическом режиме контролировать «реперные» точки, выраженные в параметрах полёта или параметрах функционирования автоматизированных систем управления. Этими параметрами являются скорость полёта, информация о режиме пилотирования на FMA, угол тангажа (атаки), параметр вертикальной скорости набора или снижения. Также расчётами было установлено, что порядок контроля указанных параметров в процессе обучения должен быть последовательным с постепенным накоплением количества параметров, запоминаемых пилотом. Это позволяет сократить время формирования навыка по обработке поступающей информации, а, следовательно, сократить время профессиональной подготовки пилотов приблизительно на 40 %. Это достигается за счёт того, что навык управления вниманием при подобном способе обучения затрагивает процессы воспроизведения в памяти пилота. На современных ВС двигательный навык замещается процедурным навыком, и на передний план выходит семантическая деятельность памяти как альтернатива перцептивной деятельности человека. Подобный способ обучения позволяет задействовать именно семантическую составляющую памяти, подсознательно возвращая пилота в контур управления без контакта со штурвалом (ручкой управления), педалями.

Разработанная методика, основанная на изложенном методе, состоит из 32 полётов. Все полёты необходимо выполнять таким образом, чтобы можно было задействовать максимальное количество элементов полёта, использующих автоматические режимы пилотирования. Пять полётов пилоту необходимо выполнить без каких-либо особенностей. Далее необходимо выполнить 12 полётов, при которых пилоту необходимо или запоминать, или записывать параметры скорости полёта при изменении режимов на FMA. Далее необходимо выполнить семь полётов, в которых при изменении режимов на FMA пилоту необходимо запоминать или записывать параметры скорости и тангажа. Далее необходимо выполнить восемь полётов, в которых при изменении режимов на FMA пилоту необходимо запоминать или записывать параметры скорости, тангажа и вертикальной скорости.

Экспериментальная часть

Разработанная методика использовалась для обучения лётного состава. В экспериментальную группу по типологическим методикам [7, 15], были отобраны 20 пилотов. Они имели приблизительно одинаковый налёт (опыт лётной работы), не имели перерывов в лётной работе в течение двух последних лет, разница в возрасте между самым старшим и самым младшим составляла не более трёх лет. Все пилоты являлись командирами ВС, имеющими небольшой опыт эксплуатации ВСПП с общим налётом на эксплуатируемый тип ВС 1500–2000 ч. Эти пилоты прошли дополнительную подготовку по разработанной методике обучения.

Кроме того, была сформирована контрольная группа из 20 человек с учётом тех же типологических характеристик, что и экспериментальная группа, но уже прошедших обучение по существующим программам подготовки.

После прохождения пилотами экспериментальной группы подготовки по разработанной методике был проведён двухэтапный эксперимент.

Целью первого этапа являлась проверка достижения уравнивания опытных групп по типологическим характеристикам. На этом этапе пилоты выполняли по одному полёту по маршруту в ручном режиме пилотирования на освоенном типе ВС. При этом в кабине находился пилот-инструктор, который фиксировал ошибки в пилотировании или их отсутствие. Результаты выполнения первого этапа эксперимента (табл. 1) показывают, что условия отбора пилотов по выбранным параметрам в основном обеспечили уравнивание групп по типологическим характеристикам.

Таблица 1

Результаты первого этапа эксперимента

Количество допущенных ошибок	Количество человек в группе, допустивших ошибки в пилотировании	
	Контрольная	Экспериментальная
0	–	–
3	1	2
5	4	4
7	4	3
9	4	4
11	3	3
13	3	2
15	1	1

На втором этапе эксперимента определялось отличие навыков пилотов в управлении ВС при внезапном переходе от автоматического режима пилотирования с максимальной степенью автоматизации к полёту с минимальной степенью автоматизации. Также проверялась гипотеза о том, что контрольная и экспериментальная группы принадлежат к одной генеральной совокупности.

Пилоты контрольной и экспериментальной группы выполняли тренировочные полёты с пилотами-инструкторами на новом для пилотов обеих групп типе ВС. Причём пилоты контрольной группы выполняли 32 полёта в режиме минимальной степени автоматизации (насколько это позволяет ВС). Пилоты экспериментальной группы выполняли полёты в режиме наивысшей степени автоматизации по разработанной методике. После выполнения 32 полётов всем пилотам на различных этапах пилот-инструктор проводил внезапную проверку в виде нештатного отключения автопилота, и в два этапа производилось оценивание адаптации испытуемого к ручному полёту. Оценивание проводилось комплексно по двум параметрам: время, за которое пилот берёт под контроль ВС в ручном режиме пилотирования, и качество пилотирования.

Качество пилотирования при эксплуатации авиационной техники оценивалось следующим образом.

Выполнение полёта без отклонений параметров от заданных режимов и при безошибочном и своевременном выполнении операций на оценку «отлично» оценивалось в один балл.

Допущение задержки в своевременности выполнения операции; допущение ошибки в выполнении операции, не влияющей на выход параметров полёта за пределы установленного режима, а также допущение выхода оцениваемых параметров полёта за пределы установленного режима – оценка «хорошо», два балла.

Допущение задержки в своевременности выполнения операции; допущение ошибки в выполнении операции, влияющей на выход параметров полёта за пределы установленного режима, а также допущение выхода оцениваемых параметров полёта за пределы установленного режима – оценка «удовлетворительно», три балла.

Невыполнение какой-либо операции, а также допущение выхода оцениваемых параметров полёта за пределы режима на оценку «удовлетворительно» оценивалось в четыре балла. Время адаптации оценивалось в секундах, при этом одна секунда приравнивалась к одному баллу. Результаты оценивались как по данным пилота-инструктора, так и по материалам объективного контроля (табл. 2).

Таблица 2

Результаты оценивания пилотов при выполнении полётов на втором этапе эксперимента

Количество баллов, которое получили испытуемые в процессе эксперимента	Количество испытуемых, получивших соответствующее количество баллов	
	Контрольная группа	Экспериментальная группа
9	-	1
10	-	2
11	-	1
12	1	1
13	-	3
14	2	2
15	1	1
16	2	4

Окончание таблицы 2

Количество баллов, которое получили испытуемые в процессе эксперимента	Количество испытуемых, получивших соответствующее количество баллов	
	Контрольная группа	Экспериментальная группа
17	5	3
18	3	1
19	2	1
20	2	-
21	2	-

Обработка результатов эксперимента

Для того, чтобы выяснить принадлежность выборок (экспериментальной и контрольной группы) к одной генеральной совокупности, а также с целью проверки эффективности метода обучения, который использовался при подготовке пилотов в экспериментальной группе, были вычислены оценки коэффициента корреляции r Пирсона и t -критерия Стьюдента [16] в программе SPSS (табл. 3).

Таблица 3

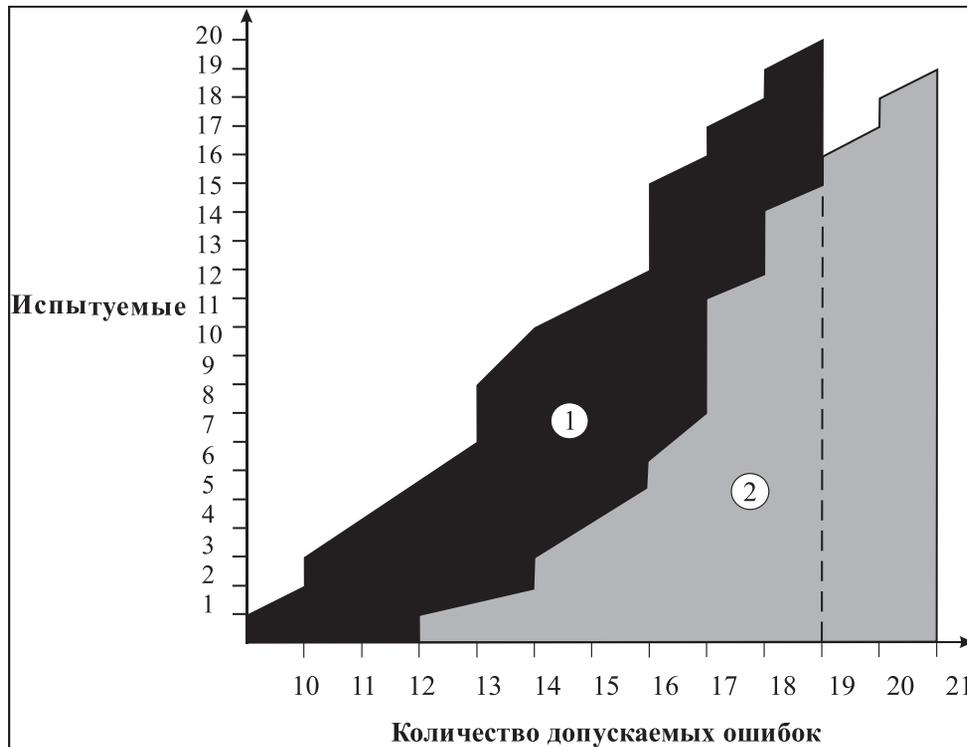
Результаты обработки данных эксперимента –
оценки коэффициента r Пирсона и критерия t Стьюдента

Параметры выборок	Группа		Парные разности
	Контрольная	Экспериментальная	
Среднее значение	17,3	14,4	2,9
Объём выборки	20	20	20
Стандартное отклонение	2,4	2,9	0,8
Стандартная ошибка	0,5	0,7	0,2
Корреляция r	0,972		
Уровень значимости p	0,000		
Доверительный интервал 95 %			
Нижняя граница			2,6
Верхняя граница			3,3
Значение критерия t Стьюдента			15,9

Проверка гипотезы об эффективности разработанного метода обучения показала следующие результаты. Эмпирическое значение критерия t Стьюдента составило 15,9 при уровне значимости $p < 0,01$ (см. табл. 3), следовательно, между группами есть различия, и разработанная методика эффективна.

Вычисления показали, что коэффициент корреляции r Пирсона показывает устойчивую положительную взаимосвязь между контрольной и экспериментальной группами по шести исследованным признакам (0,972), что даёт основания утверждать, что обе выборки можно отнести к одной генеральной совокупности [17].

На рисунке изображён график зависимости сокращения количества ошибочных действий по убыванию у испытуемых пилотов контрольной и экспериментальной групп.



Графическое представление сокращения количества ошибок, допускаемых: в экспериментальной группе – 1, по сравнению с контрольной – 2

Таким образом, вероятность успешного выполнения полёта в случае нештатной работы автопилота и вынужденного перехода на пилотирование с минимальной степенью автоматизации у экспериментальной группы пилотов на 37 % больше, чем у пилотов контрольной группы, что является показателем повышения надёжности обучения при использовании предложенного метода и разработанной на его основе методики обучения.

Заключение

Повышение надёжности обучения пилотов можно объяснить успешным использованием линейной модели с одним оператором, которая позволила выполнить расчёт количества информации, порядок её использования в тренировочном полёте. Расчёт позволил определить длительность обучения пилотов, выраженную в количестве полётов, выполняемых пилотами в процессе обучения. Методом перебора различных значений величины d (информация, которую пилот должен видеть в текущий момент времени для принятия решения) и m (информация, которую может видеть пилот в текущий момент времени для принятия решения) удалось определить такое соотношение количества информации и последовательность её запоминания, которое позволило пилотам экспериментальной группы быстрее и эффективнее брать под контроль пилотирование ВС при минимальной степени автоматизации.

Это позволяет преодолеть ограниченность рабочей памяти человека на фоне возрастающих объёмов информации в зрительном канале. Также применение метода способствует правильному формированию когнитивно-информационных преобразователей алгоритмов деятельности на основе процессов работы памяти, которые позволяют на каждом этапе полёта определять необходимый информационный сигнал и не воспринимать информационный шум. Подобный

метод можно использовать при обучении операторов любых высокоавтоматизированных интеллектуальных эргатических систем.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников

1. Гандер Д. В., Алексеенко М. С. Теоретико-методологический анализ проблемы управления высокоавтоматизированным воздушным судном при выполнении пилотом отвлекающей деятельности // Проблемы безопасности полётов. 2018. № 9. С. 3–14.
2. Муравьев И. С. Анализ результатов исследований в области управления современными воздушными судами // Математические методы в технологиях и технике. 2022. № 10. С. 73–76.
3. Гузий А. Г., Лушкин А. М., Марков Н. А., Майорова Ю. А. Методика рискометрии чрезвычайных ситуаций с воздушными судами гражданской авиации // Проблемы безопасности полётов. 2020. № 7. С. 31–41.
4. Гандер Д. В., Ворона А. А., Пономаренко В. А., Алексеенко М. С. Методологические и теоретические предпосылки психологических исследований лётного труда на современном этапе развития авиации // Психология и психотехника. 2016. № 11(98). С. 906–912.
5. Коронков С. О. Методика автоматизированного исследования рабочей нагрузки лётчика // Программные системы и вычислительные методы. 2022. № 4. С. 63–74.
6. Муравьев И. С., Куц К. А. Математическое моделирование процесса взаимодействия между экипажами автоматизированных воздушных судов при выполнении полётов // Проблемы лётной эксплуатации и безопасность полётов. 2020. № 14. С. 26–32.
7. Muraviov I. Kovalenko G., Bogomolov A. Method for Improving the Reliability of an Ergatic Control System for an Automated Aircraft, Proceedings of 2022 International Russian Automation Conference RusAutoCon-2022, Sochi, 2022, pp. 628–632. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896244>
8. Гузий А. Г., Куницын А. Н., Мишин А. В., Марков Н. А. Методологический подход к оптимизации надзора за безопасностью полётов гражданской авиации России // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2020. № 33. С. 78–87.
9. Bogomolov A. V., Sviridyuk G. A., Keller A. V., Zinkin V. N., Alekhin M. D. Information-logical Modeling of Information Collection and Processing at the Evaluation of the Functional Reliability of the Aviation Ergate Control System Operator, Proceedings of the Third International Conference ERGO-2018: Human Factors in Complex Technical Systems and Environments, St. Petersburg, 2018, pp. 106–110. <https://doi.org/10.1109/ERGO.2018.8443849>
10. Муравьев И. С. Роль и место когнитивно-информационных преобразователей алгоритмов деятельности пилотов в процессе управления высокоавтоматизированным воздушным судном // CredeExperto: транспорт, общество, образование, язык. 2022. № 1. С. 18–36. https://doi.org/10.51955/23121327_2022_1_18
11. Солдатов С. К., Засядько К. И., Богомоллов А. В., Вонаршенко А. П., Язлюк М. Н. Психофизиологические профессионально важные качества лётчиков-инструкторов и возможности их развития // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2019. Т. 53. № 1. С. 86–91.
12. Засядько К. И., Вонаршенко А. П., Солдатов С. К., Богомоллов А. В., Язлюк М. Н. Анализ профессионально важных качеств лётчиков-инструкторов и возможностей их развития // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2020. Т. 54. № 1. С. 52–56.
13. Засядько К. И., Солдатов С. К., Богомоллов А. В., Вонаршенко А. П., Язлюк М. Н. Психофизиологические особенности профессиональной деятельности лётчика при визуальном поиске и обнаружении малоразмерных наземных объектов в сложных метеоусловиях // Психология. Психофизиология. 2020. Т. 13. № 4. С. 87–99.

14. Солдатов С. К., Гузий А. Г., Богомолов А. В., Шишов А. А., Кукушкин Ю. А., Щербаков С. А., Кирий С. В. Априорное оценивание профессиональной надёжности лётчика на этапе подготовки к полётам // Проблемы безопасности полётов. 2007. № 8. С. 33.
15. Муравьев И. С. Оценка функционирования системы «экипаж – высокоавтоматизированное воздушное судно – среда» на основе когнитивно-информационных преобразователей алгоритмов деятельности пилотов // Качество и жизнь. 2022. № 1(33). С. 65–76.
<https://doi.org/10.34214/2312-5209-2022-33-1-65-76>
16. Наследов А. Д. IMB SPSS Statistics 20 и AMOS: профессиональный статистический анализ данных. СПб.: Питер, 2013. 416 с.
17. Бешелев С. Л., Гурвич Ф. Г. Математико-статистические методы экспертных оценок. Москва: Статистика, 1980. 263 с.

References

1. Gander D. V., Alekseenko M. S. Theoretical and methodological analysis of the problem of controlling a highly automated aircraft when the pilot performs distracting activities, *Problemy bezopasnosti polyotov*, 2018, no. 9, pp. 3–14. (In Russ.)
2. Muravyov I. S. Analysis of the results of research in the field of control of modern aircraft. *Matematicheskie metody v tekhnologiyakh i tekhnike*, 2022, no. 10, pp. 73–76. (In Russ.)
3. Guziy A. G., Lushkin A. M., Markov N. A., Mayorova Yu. A. Methods of risk metering of emergency situations with civil aviation aircraft, *Problemy bezopasnosti polyotov*, 2020, no. 7, pp. 31–41. (In Russ.)
4. Gander D. V., Vorona A. A., Ponomarenko V. A., Alekseenko M. S. Methodological and theoretical prerequisites for psychological studies of flight labor at the present stage of aviation development, *Psikhologiya i psikhotehnika*, 2016, no. 11 (98), pp. 906–912. (In Russ.)
5. Koronkov S. O. A technique for automated research of the pilot's workload, *Programmnye sistemy i vychislitel'nye metody*, 2022, no. 4, pp. 63–74. (In Russ.)
6. Muravyov I. S., Kuts K. A. Mathematical modeling of the process of interaction between the crews of automated aircraft during the performance of flights, *Problemy lyotnoj ehkspluatatsii i bezopasnost' polyotov*, 2020, no. 14, pp. 26–32. (In Russ.)
7. Muraviov I. Kovalenko G., Bogomolov A. Method for Improving the Reliability of an Ergatic Control System for an Automated Aircraft. *Proceedings of 2022 International Russian Automation Conference Rus-AutoCon-2022*, Sochi, 2022, pp. 628–632. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896244>
8. Guziy A. G., Kunitsyn A. N., Mishin A. V., Markov N. A. Methodological approach to optimizing the oversight of the safety of civil aviation flights in Russia, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2020, no. 33, pp. 78–87. (In Russ.)
9. Bogomolov A. V., Sviridyuk G. A., Keller A. V., Zinkin V. N., Alekhin M. D. Information-logical Modeling of Information Collection and Processing at the Evaluation of the Functional Reliability of the Aviation Ergate Control System Operator, *Proceedings of the Third International Conference ERGO-2018: Human Factors in Complex Technical Systems and Environments*, St. Petersburg, 2018, pp. 106–110.
<https://doi.org/10.1109/ERGO.2018.8443849>
10. Muravyov I. S. The role and place of cognitive-information converters of pilot activity algorithms in the process of controlling a highly automated aircraft, *CredeExperto: transport, society, education, language*, 2022, no. 1, pp. 18–36. (In Russ.) https://doi.org/10.51955/23121327_2022_1_18
11. Soldatov S. K., Zasyadko K. I., Bogomolov A. V., Vonarshenko A. P., Yazlyuk M. N. Psychophysiologic occupationally important qualities of pilot-instructors and their development, *Aerospace and Ecological Medicine*, 2019, vol. 53, no. 1, pp. 86–91. (In Russ.)
12. Zasyadko K. I., Vonarshenko A. P., Soldatov S. K., Bogomolov A. V., Yazlyuk M. N. Analysis of qualities professionally important for flight instructor and their enhancement, *Aerospace and Ecological Medicine*, 2020, vol. 54, no. 1, pp. 52–56. (In Russ.)

13. Zasyadko K. I., Soldatov S. K., Bogomolov A. V., Vonarshenko A. P., Yazlyuk M. N. Psychophysiological features of aircraft pilots during visual search and detection of small-size ground objects in difficult weather conditions, *Psychology. Psychophysiology*, 2020, vol. 13, no. 4, pp. 87–99. (In Russ.)
14. Soldatov S. K., Guziy A. G., Bogomolov A. V., Shishov A. A., Kukushkin Yu. A., Shcherbakov S. A., Kiriya S. V. A priori assessment of the pilot's professional reliability at the stage of preparation for flights, *Problemy bezopasnosti polyotov*, 2007, no. 8, p. 33. (In Russ.)
15. Muravyov I. S. Evaluation of the functioning of the system “crew – highly automated aircraft – environment” based on cognitive-information converters of pilot activity algorithms, *Kachestvo i zhizn`*, 2022, no. 1(33), pp. 65–76. (In Russ.) <https://doi.org/10.34214/2312-5209-2022-33-1-65-76>
16. Nasledov A. D. *IMB SPSS Statistics 20 i AMOS: professional'nyj statisticheskij analiz dannykh [IMB SPSS Statistics 20 and AMOS: Professional Statistical Data Analysis]*, St. Petersburg, Piter Publ., 2013, 416 p. (In Russ.)
17. Beshelev S. L., Gurvich F. G. *Matematiko-statisticheskie metody ehkspertnykh otsenok [Mathematical and statistical methods of expert assessments]*, Moscow, Statistika Publ., 1980, 263 p. (In Russ.)

Информация об авторе

Муравьев Иван Станиславович, кандидат технических наук, докторант, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия, mantus87@mail.ru

Author information

Muraviov Ivan S., Candidate of Sciences (Engineering), Doctoral Candidate, St. Petersburg State University of Civil Aviation named in honor of Air Chief Marshal A. A. Novikov, St. Petersburg, Russia, mantus87@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 12.04.2023; одобрена после рецензирования 03.07.2023; принята к публикации 11.07.2023.
The article was submitted 12.04.2023; approved after reviewing 03.07.2023; accepted for publication 11.07.2023.*

Научная статья
629.7:378.8

ДИАГНОСТИКА СХЕМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ И ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ЗРИТЕЛЬНОГО ВНИМАНИЯ ПИЛОТОВ ПРИ ПЕРВОНАЧАЛЬНОЙ ЛЁТНОЙ ПОДГОТОВКЕ

Л. И. ФРОЛОВА¹, А. К. ВОЛКОВ¹, С. Г. КОСАЧЕВСКИЙ¹, З. Р. ЗАББАРОВ²

¹ *Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева,
Ульяновск, Россия*

² *Аэрофлот – российские авиалинии, Москва, Россия*

Аннотация. В настоящей работе исследуются вопросы диагностики схем распределения и переключения зрительного внимания пилотов при первоначальной лётной подготовке с применением технологии айтрекинга. Разработана диагностическая методика оценки схем распределения и переключения зрительного внимания (РПЗВ) курсанта-пилота, включающая сбор данных глазодвигательной деятельности (ГДД), их автоматическую классификацию в однородные группы (кластер-анализ) и проведение линейного дискриминантного анализа. Для апробации предложенной методики были использованы данные, полученные в результате эксперимента, проведённого на базе тренажёрного центра Ульяновского института гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева (УИ ГА). По результатам автоматической классификации данных ГДД курсантов-пилотов выявлены четыре схемы РПЗВ. Согласно предложенной методике разработана дискриминантная модель. Использование данной модели позволит автоматизировать процесс оценки схем РПЗВ, что в последующем может стать предпосылкой для создания современных интерфейсов в тренажёрных комплексах подготовки пилотов, которые используют аппаратные методы психофизиологического мониторинга на основе биологической обратной связи. На основе экспериментальных исследований уточнена классификация схем РПЗВ пилотов при первоначальной лётной подготовке с применением авторского комплексного показателя ГДД, характеризующего РПЗВ пилотов.

Ключевые слова: безопасность полётов, пилот, профессиональная подготовка, интеллектуальный анализ данных, технология айтрекинга, транспортные системы страны, эксплуатация авиационной техники

Для цитирования: Фролова Л. И., Волков А. К., Косачевский С. Г., Заббаров З. Р. Диагностика схем распределения и переключения зрительного внимания пилотов при первоначальной лётной подготовке // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 43. С. 19–27.

THE RESEARCH AND DIAGNOSTICS OF CADET-PILOTS VISUAL ATTENTION DISTRIBUTION IN ORDER TO DEVELOP INTELLIGENT DATA ANALYSIS SYSTEMS FOR FLIGHT SIMULATORS

L. I. FROLOVA¹, A. K. VOLKOV¹, S. G. KOSACHEVSKIY¹, Z. R. ZABBAROV²

¹ *Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia*

² *Aeroflot – Russian Airlines, Moscow, Russia*

Abstract. The paper investigates the issues of diagnosing schemes for pilot's visual attention switching and distribution during initial flight training using Eye-tracking technology. A diagnostic technique has been

developed for evaluating schemes for cadet-pilot's visual attention switching and distribution, including the collection of data on oculomotor activity, their automatic classification into homogeneous groups (cluster analysis) and linear discriminant analysis. To test the proposed technique, it was used the data obtained as a result of an experiment conducted on the basis of the training center of Ulyanovsk Civil Aviation Institute. According to the results of the cadet-pilots' oculomotor data automatic classification, four schemes of visual attention switching and distribution were identified. According to the proposed technique, a discriminant model was developed. The use of this model will automate the process of evaluating schemes of visual attention switching and distribution, which in the future can become a prerequisite for creating modern interfaces in pilot training simulators that use instrumental methods of psychophysiological monitoring based on biofeedback. The novelty of the research is that, on the basis of experimental studies, the classification of pilots' schemes of visual attention switching and distribution during initial flight training was refined using a set of author's complex indicators characterizing the pilots' attention distribution.

Keywords: flight safety, pilot, professional training, data mining, eye-tracking technology, transport systems of the country, operation of aircraft

For citation: Frolova L. I., Volkov A. K., Kosachevskiy S. G., Zabbarov Z. R., The research and diagnostics of cadet-pilots visual attention distribution in order to develop intelligent data analysis systems for flight simulators, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2023, no. 43, pp. 19–27. (In Russ.)

Введение

Неотъемлемой составляющей проблемы безопасности полётов в транспортных системах страны является обеспечение качественной профессиональной подготовки лётного состава гражданской авиации (ПП ЛС ГА). В условиях постоянного усложнения авиационной техники важным направлением совершенствования ПП ЛС ГА является реализация компетентностной системы подготовки и оценки пилотов СВТ&А (Competency-based Training and Assessment), рекомендованной Международной организацией гражданской авиации (ИКАО) [1].

Реализация СВТ&А вызвана необходимостью перехода от существующей системы оценки качества подготовки, основанной на субъективных оценках пилота-инструктора, на систему, в основе которой лежат объективные критерии освоения компетенций. Для этого необходимо проведение исследований по формированию системы объективных критериев на основе эффективного использования как возможностей современных лётных тренажёров, так и дополнительных систем, в частности, систем регистрации движения глаз (айтрекеров), позволяющих исследовать процессы взаимодействия пилота с системой отображения полётной информации (Electronic Flight Instrument Systems – EFIS), формирования ситуационной осведомлённости и принятия решения.

Рассмотрим ряд ключевых работ, связанных с исследованием ГДД пилотов на основе применения технологии айтрекинга. В работе [2] исследователи отмечают, что отслеживание взгляда может быть полезным инструментом для обучения пилотов стратегиям мониторинга, например, при видеодемонстрации визуального образа эксперта или опытного пилота начинающим пилотам. В [3] авторы обращают внимание на то, что с помощью технологии айтрекинга можно выявить показатели ГДД, которые будут отражать изменения уровня стресса и внимания. Авторы предлагают даже новую программу обучения пилотов, включающую в обязательном порядке теоретическую информацию о методиках распределения зрительного внимания и формирования ситуационной осведомлённости как о важных и сложных аспектах работы пилота.

Авторы [4, 5] пришли к выводу, что определённые схемы РПЗВ, по-видимому, помогают улучшить навыки пилотирования, и предположили, что будущие исследования с использованием технологии айтрекинга должны прояснить взаимосвязь между ГДД пилота и его компетентностью.

В [6, 7] исследователи предлагают новую концепцию диагностики профессиональной подготовленности лётного состава на основе окулометрических данных, основанную на сравнениях исследуемых фрагментов полёта с сопоставимыми фрагментами из специализированной базы данных. Результатом проведённых исследований является вывод, что дисперсия изменчивости фиксируемых параметров на 46 % обусловлена влиянием навыков пилотирования и на 54 % – совместным влиянием психофизиологического состояния пилотов и ошибок оценки ГДД, что позволяет говорить о сопоставимом влиянии исследуемых факторов на анализируемые характеристики.

Исследования РПЗВ пилотов в ходе тренажёрной подготовки отражены в работе [8], в которой исследованы методы профессиональной подготовки пилотов на основе оптимизации распределения внимания при эксплуатации самолётов с EFIS. В результате установлено, что РПЗВ влияет на качество техники пилотирования, в связи с чем разработаны рекомендации по совершенствованию методики начальной профессиональной подготовки курсантов-пилотов для эксплуатации авиационной техники.

Однако во всех этих работах конкретного инструмента контроля сформированности рациональной схемы РПЗВ курсанта-пилота разработано не было.

Целью настоящего исследования является разработка диагностической методики оценки РПЗВ курсанта-пилота, которую можно в дальнейшем применить в интеллектуальных интерфейсах тренажёров самолётов.

Основная часть исследования

Технология айтрекинга представляет собой количественный метод регистрации ГДД испытуемого, находящегося в процессе наблюдения за зрительным стимулом. При записи ГДД регистрируются окулометрические параметры, среди которых основными являются фиксации и саккады. Фиксации представляют собой паузы в движении глаз, при которых сетчатка глаза стабилизируется. Подсчитано, что 90 % времени визуального сканирования составляют фиксации, которые могут длиться от 150 до 600 мс. Саккады представляют собой быстрые движения глаз с целью изменения положения фиксации. Саккадические движения являются непродолжительными по времени, их длительность составляет от 10 до 100 мс [9].

Для исследования и диагностики РПЗВ курсантов-пилотов на базе тренажёрного центра УИ ГА авторами настоящей статьи были проведены экспериментальные исследования. Для регистрации и обработки параметров ГДД использовался внешний айтрекер Gazepoint 3 HD, особенностью которого является высокая частота дискретизации (150 Гц). Кроме того, для проведения экспериментальных исследований было разработано специализированное программное обеспечение, обеспечивающее более эффективные обработку, анализ и визуализацию данных айтрекинга по сравнению со стандартным программным обеспечением Gazepoint Analysis UX Edition.

В эксперименте приняли участие 30 курсантов-пилотов. Каждый из курсантов-пилотов выполнил на тренажёре самолёта DA 40NG участок горизонтального полёта с выдерживанием заданных значений приборной скорости, высоты полёта и курса, отклонения от которых использовались для оценки качества пилотирования. Полёт выполнялся в условиях имитации приборного полёта. Для того, чтобы избежать ведения курсантом-пилотом визуальной ориентировки и оценить умение пилотировать по правилам приборных полётов, погодные условия во время эксперимента соответствовали САТ¹.

В ходе анализа статистических данных использовались методы кластерного и дискриминантного анализов. Классификацию схем РПЗВ курсантов-пилотов осуществляли на основе

¹ САТ – видимость, соответствующая точному заходу на посадку по приборам с высотой принятия решения не ниже 60 м (200 фут), а также при метеорологической видимости не менее 800 м или дальности видимости на взлётно-посадочной полосе (ВПП) не менее 550 м.

предложенного авторами комплексного показателя ГДД E , характеризующего РПЗВ курсанта-пилота при взаимодействии с EFIS:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^k E_{ROI} w_k}{\sum_{i=1}^n E_{ROI} w_n},$$

где E_{ROI} – индекс, характеризующий параметр ГДД в области интереса зрительного стимула; w – числовое значение важности для области интереса, полученное с помощью экспертного опроса и метода анализа иерархий [10];

k – количество областей интереса, контролируемых на заданном режиме полёта;

n – общее количество областей интереса.

Предыдущие исследования авторов [11] позволили выявить 3 наиболее информативных параметра ГДД: количество фиксаций (Fixation count, FC); длительность фиксаций (Fixation duration, FD); возвратные саккады (Reverse saccades, RS).

В настоящем исследовании с целью разработки диагностической методики оценки РПЗВ пилота авторами проведена автоматическая классификация данных ГДД курсантов-пилотов (кластер-анализ). Кластер-анализ проведён методом Варда (иерархическим методом). В качестве меры выбрано «Евклидово расстояние». Построенная авторами дендрограмма для 30 респондентов представлена на рис. 1.

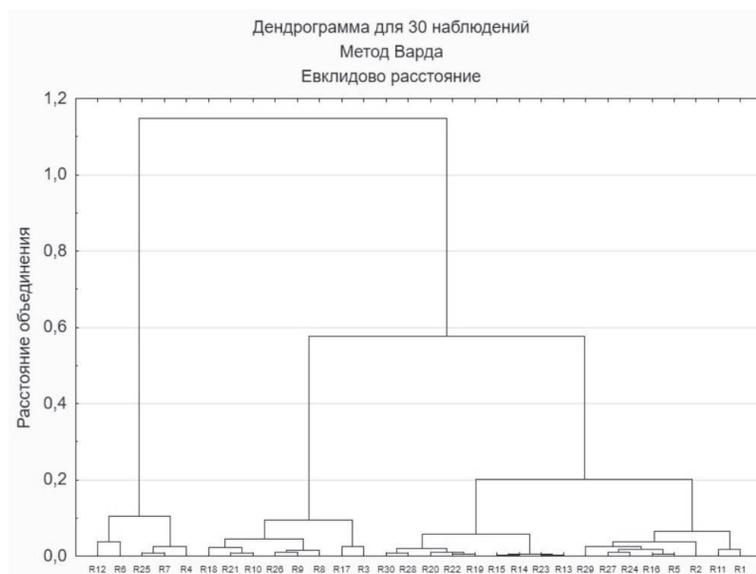


Рис. 1. Дендрограмма наблюдений

В соответствии с рис. 1 следует рассматривать четыре кластера респондентов. Для проверки предположения о четырёх кластерах респондентов был проведён кластер-анализ методом k -средних. На рис. 2 представлены выявленные кластеры, входящие в них респонденты обозначены индексами R_x . Для каждого респондента указано расстояние до центра кластера.

По результатам применения двух методов кластеризации наблюдается схожая кластерная структура респондентов, что характеризует устойчивую кластеризацию респондентов и возможность в дальнейшем использовать предложенный комплексный показатель ГДД.

Для углублённого анализа найденных кластеров рассмотрим графики средних значений кластеров, которые строятся по значению комплексного показателя ГДД для каждого из трёх информативных параметров ГДД (рис. 3).

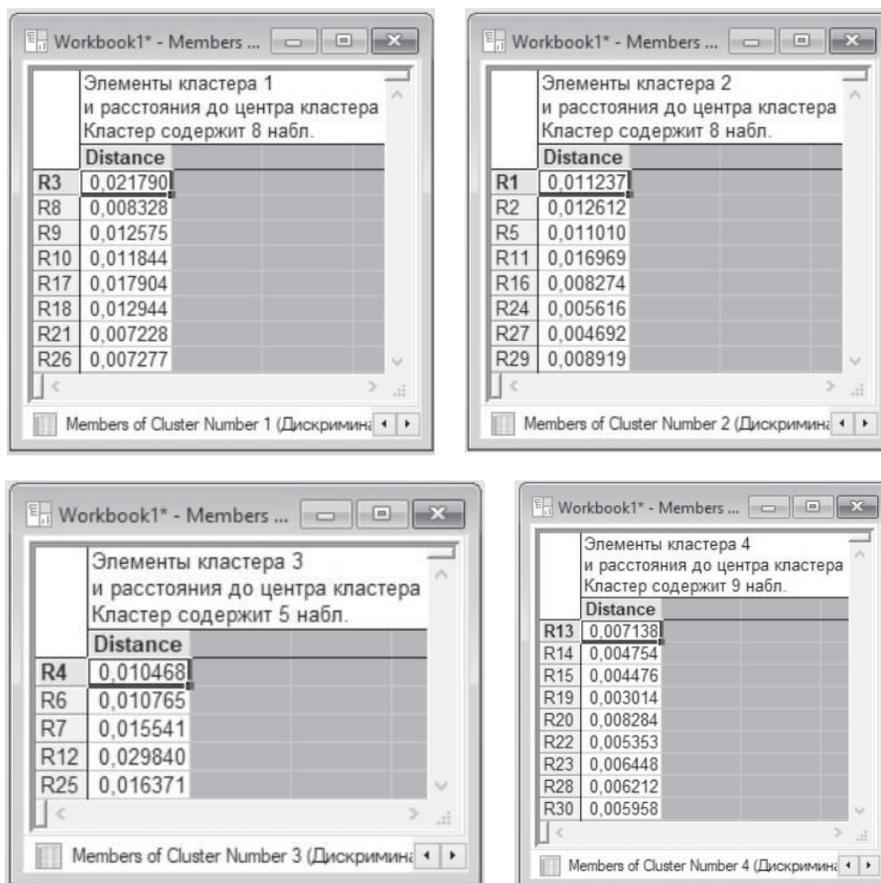


Рис. 2. Элементы и расстояния до центров кластеров

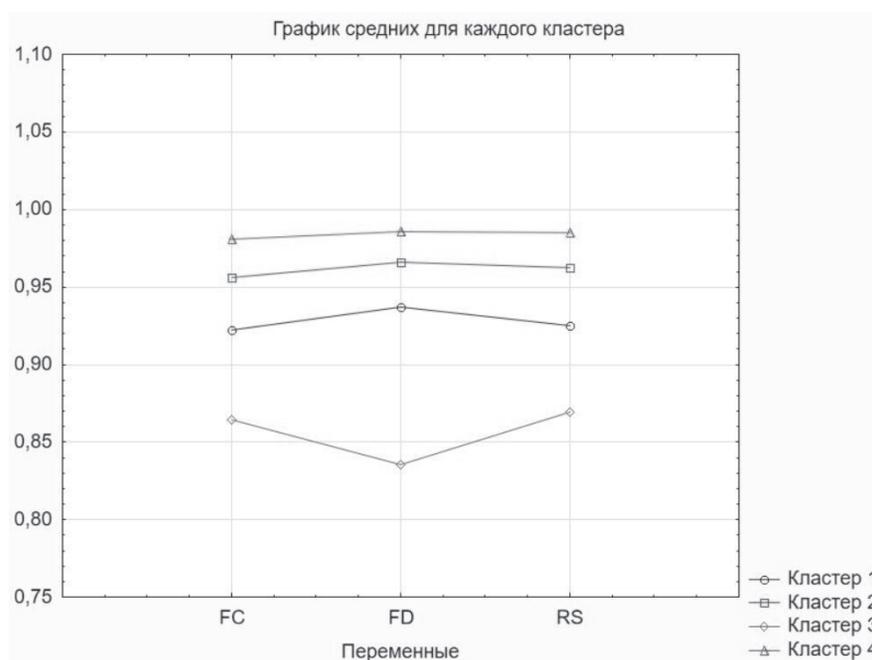


Рис. 3. Графики средних значений

Опишем два кластера, исходя из анализа рис. 3:

1. Третий кластер характеризуется самыми низкими значениями комплексного показателя ГДД для всех трёх информативных параметров ГДД относительно значений аналогичных

параметров других кластеров. Респонденты имели наименьшую длительность фиксаций взгляда на областях интереса (среднее значение показателя равно 0,835) и количество возвращений к ним (среднее значение показателя равно 0,869).

2. Четвёртый кластер характеризуется самыми высокими значениями комплексного показателя ГДД для всех трёх информативных параметров ГДД относительно значений аналогичных параметров других кластеров. Респонденты имели наибольшую длительность фиксаций взгляда на областях интереса (среднее значение показателя равно 0,985) и количество возвращений к ним (среднее значение показателя равно 0,984).

Проведённый кластерный анализ позволил установить четыре основные группы пилотов-курсантов, внутри которых респонденты используют схожие схемы РПЗВ. Далее с целью разработки диагностической методики оценки РПЗВ пилота применим дискриминантную модель. В качестве группирующей переменной в дискриминантной модели выбраны значения четырёх полученных кластеров респондентов.

Показателем качества проведённой дискриминации является значение статистики лямбда Уилкса ($\lambda_W = [0; 1]$). Хорошая дискриминация соответствует значению статистики Уилкса, находящемуся около нуля. Соответственно плохая дискриминация соответствует значению статистики Уилкса, находящемуся около единицы. В термине мощности дискриминации (мощность равна единица минус вероятность ошибки) это можно описать следующим образом. Мощность дискриминации будет равна 1, если значение λ_W близко к нулю. В противном случае мощность будет близка к нулю. В данном случае значение λ_W равно 0,0279852, что говорит о достаточном качестве дискриминации. Приближённое значение F-статистики, связанной с λ_W : $F(9,58) = 21,77486$.

Рассчитанный процент правильной классификации для выявленных групп составил 100 %. Соответственно дискриминантная модель обладает свойством устойчивости и может быть использована для линейной классификации пилотов-курсантов.

Респондент	Observed Classif.	Квадраты расстояний Махаланобиса до центров кластеров			
		2_cluster p=,26667	1_cluster p=,26667	3_cluster p=,16667	4_cluster p=,30000
R1	2_cluster	1,5979	5,67710	83,2672	9,7463
R2	2_cluster	3,7911	7,48671	102,5748	11,7965
R3	1_cluster	29,8516	9,13216	67,0261	54,1291
R4	3_cluster	118,2553	66,31645	6,2140	164,9963
R5	2_cluster	1,6826	16,77454	127,0359	2,4810
R6	3_cluster	95,4722	49,86770	2,0799	134,4002
R7	3_cluster	141,4324	81,35307	2,9741	190,0251
R8	1_cluster	11,7647	2,01346	67,8158	27,7346
R9	1_cluster	4,8049	1,41003	73,4026	17,8167
R10	1_cluster	7,4658	2,81258	57,2703	21,6834

Рис. 4. Квадраты расстояний Махаланобиса

На рис. 4 приведены квадраты расстояний Махаланобиса до центров найденных кластеров. Результаты представлены для первых 10 респондентов. Данный показатель модели рассматривается как объективный критерий отнесения пилота-курсанта к той или иной классификационной группе. Другими словами, данный критерий можно интерпретировать как критерий оценки сформированности РПЗВ.

Переменная	Функции классификации; группировка: Класс			
	2_claster p=,26667	1_claster p=,26667	3_claster p=,16667	4_claster p=,30000
FC	1250,39	1237,96	1245,74	1337,52
FD	2882,73	2814,52	2369,40	2923,02
RS	4397,03	4174,85	3983,88	4463,36
Константа	-4107,35	-3821,13	-3262,68	-4295,53

Рис. 5. Коэффициенты дискриминантных функций

Дискриминантная модель включает в себя четыре функции классификации схем РПЗВ курсанта-пилота. Коэффициенты полученных уравнений линейной регрессии представлены на рис. 5. В общем виде полученная модель выражается формулой:

$$\begin{cases} F_1 = 1250,39FC + 2882,73FD + 4397,03RS - 4107,35, \\ F_2 = 1237,96FC + 2814,52FD + 4174,85RS - 3821,13, \\ F_3 = 1245,74FC + 2369,40FD + 3983,88RS - 3262,68, \\ F_4 = 1337,52FC + 2923,02FD + 4463,36RS - 4295,53. \end{cases}$$

Использование полученной модели в алгоритме программного обеспечения позволит автоматизировать процесс оценки схем РПЗВ и может стать предпосылкой для создания современных интерфейсов в тренажёрных комплексах подготовки пилотов, использующих аппаратные методы психофизиологического мониторинга на основе биологической обратной связи.

Заключение

В статье показано, что применение технологии айтрекинга позволяет решать диагностические задачи в области подготовки пилотов.

Проведена апробация комплексного показателя ГДД, характеризующего РПЗВ курсанта-пилота при взаимодействии с EFIS.

Разработана диагностическая методика оценки РПЗВ курсанта-пилота, включающая следующие основные этапы:

- сбор параметров ГДД курсантов-пилотов с использованием технологии айтрекинга согласно предложенному комплексному показателю ГДД, характеризующему РПЗВ курсанта-пилота при взаимодействии с EFIS;
- автоматическая классификация данных ГДД курсантов-пилотов (кластер-анализ);
- проведение линейного дискриминантного анализа с целью нахождения переменных, определяющих различия в выявленных кластерах.

На основе экспериментальных исследований уточнена классификация схем РПЗВ пилотов при первоначальной лётной подготовке. Разработана дискриминантная модель, которая обеспечивает возможность классифицировать курсанта-пилота относительно его схемы РПЗВ.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. ИКАО Doc 9868. Правила аэронавигационного обслуживания. Подготовка персонала. 3-е изд., перераб. ИКАО, 2020. 230 с.
2. Lefrançois O., Matton N., Causse M., Gourinat Y. The role of Pilots' monitoring strategies in flight performance, *Proceedings of the 32nd EAAP Conference*, Cascais, Portugal, 26–30 September 2016, available at: https://oatao.univ-toulouse.fr/16173/1/Lefrancois_16173.pdf (accessed: 10.11.2022).
3. Dehais F., Causse M., Pastor J. Embedded eye tracker in a real aircraft: new perspectives on pilot/aircraft interaction monitoring. *Proceedings from The 3rd International Conference on Research in Air Transportation*, Fairfax, USA, Federal Aviation Administration, 2008, pp. 303–309.
4. Peissl S., Wickens C., Baruah R. Eye-Tracking measures in aviation: a selective literature review. *The International Journal of Aerospace Psychology*, 2018, no. 28, pp. 1–15. <https://doi.org/10.1080/24721840.2018.1514978>
5. Ziv G. Gaze behavior and visual attention: a review of eye tracking studies in aviation, *The International Journal of Aviation Psychology*, 2016, no. 26, pp. 75–104. <http://dx.doi.org/10.1080/10508414.2017.1313096>
6. Куравский Л. С., Мармалюк П. А., Юрьев Г. А., Беляева О. Б., Прокопьева О. Ю. Диагностика лётного состава по результатам работы на авиационных тренажёрах // Экспериментальная психология. 2016. Том 9. № 3. С. 118–137. <https://doi.org/10.17759/exppsy.2016090310>
7. Куравский Л. С., Мармалюк П. А., Юрьев Г. А., Беляева О. Б., Прокопьева О. Ю. Количественные критерии и концепция диагностики лётного состава по данным видеоокулографии // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2015. № 9. С. 24–43.
8. Косачевский С. Г., Айдаркин Д. В., Качан Д. В. Оценка эффективности методики первоначальной профессиональной подготовки пилотов для эксплуатации самолёта с электронными системами отображения информации // Научный вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21(5) С. 8–22. <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2018-21-5-8-22>
9. Duchowski A. T. *Eye tracking methodology theory and practice*. Springer, London, 2017, 387 p.
10. Айдаркин Д. В., Когут С. В., Косачевский С. Г., Фролова Л. И. Применение метода анализа иерархий для оценки качества профессиональной подготовки лётного состава гражданской авиации // Научный вестник УИ ГА. 2019. № 11. С. 17–22.
11. Volkov A.I., Frolova L., Kosachevsky S., Zabbarov Z. Eye-tracking study on interaction of cadet pilots with electronic flight instrument system. *AIP Conference Proceedings*, 2700, 020051 (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0125010>

References

1. ICAO Doc. 9868. *Procedures for Air Navigation Services – Training*, 3d ed., ICAO, 2020, 218 p.
2. Lefrançois O., Matton N., Causse M., Gourinat Y. The role of Pilots' monitoring strategies in flight performance, *Proceedings of the 32nd EAAP Conference*, Cascais, Portugal, 26–30 September 2016, available at: https://oatao.univ-toulouse.fr/16173/1/Lefrancois_16173.pdf (accessed: 10.11.2022).
3. Dehais F., Causse M., Pastor J. Embedded eye tracker in a real aircraft: new perspectives on pilot/aircraft interaction monitoring. *Proceedings from The 3rd International Conference on Research in Air Transportation*, Fairfax, USA, Federal Aviation Administration, 2008, pp. 303–309.
4. Peissl S., Wickens C., Baruah R. Eye-Tracking measures in aviation: a selective literature review. *The International Journal of Aerospace Psychology*, 2018, no. 28, pp. 1–15. <http://doi.org/10.1080/24721840.2018.1514978>
5. Ziv G. Gaze Behavior and Visual Attention: A Review of Eye Tracking Studies in Aviation, *The International Journal of Aviation Psychology*, 2016, no. 26, pp. 75–104. <http://dx.doi.org/10.1080/10508414.2017.1313096>
6. Kuravsky L. S., Marmalyuk P. A., Yuryev G. A., Belyaeva O. B., Prokopieva O. Yu. Flight crew diagnostic using aviation simulator training data, *Experimental psychology (Russia)*, 2016, vol. 9, no. 3, pp. 118–137. (In Russ.)

7. Kuravsky L. S., Marmalyuk P. A., Yuryev G. A., Belyaeva O. B., Prokopieva O. Yu. Quantitative criteria and the concept of flight personnel diagnostics based on videooculography data, *Journal Neurocomputers*, 2015, no. 9, pp. 24–43. (In Russ.)
8. Kosachevskiy S. G., Aidarkin D.V., Kachan D.V. Evaluation of the effectiveness methods of initial pilots' professional training to operate the aircraft equipped with electronic flight instrument systems, *Civil Aviation High Technologies*, 2018, vol. 21(5), pp. 8–22. (In Russ.)
9. Duchowski A. T. *Eye tracking methodology theory and practice*. Springer, London, 2017, 387 p.
10. Aidarkin D. V., Kogut S. V., Kosachevsky S. G., Frolova L. I., Analytic hierarchy process application for evaluation of professional pilot training quality, *Nauchnyj vestnik UI GA*, 2019, no. 11, pp. 17–22. (In Russ.)
11. Volkov A.I., Frolova L., Kosachevsky S., Zabbarov Z. Eye-tracking study on interaction of cadet pilots with electronic flight instrument system. *AIP Conference Proceedings*, 2700, 020051 (2023).
<https://doi.org/10.1063/5.0125010>

Информация об авторах

Фролова Лидия Ивановна, начальник отдела, аспирант кафедры, Ульяновский институт гражданской авиации, Ульяновск, Россия, frolova.i.lidiya@gmail.com

Волков Александр Константинович, кандидат технических наук, доцент кафедры, Ульяновский институт гражданской авиации, Ульяновск, Россия, volkovalex8@rambler.ru

Косачевский Сергей Григорьевич, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры, Ульяновский институт гражданской авиации, Ульяновск, Россия, kosach-51@mail.ru

Заббаров Зульфат Рифкатович, аспирант кафедры, Ульяновский институт гражданской авиации; пилот ПАО «Аэрофлот – российские авиалинии», Москва, Россия, zabbarovz@gmail.com

Authors information

Frolova Lidiya I., Head of Department, Postgraduate Student, Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia, frolova.i.lidiya@gmail.com

Volkov Alexander K., Candidate of Sciences (Engineering), Assistant Professor at the Department, Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia, volkovalex8@rambler.ru

Kosachevskiy Sergey G., Candidate of Sciences (Engineering), Assistant Professor, Professor at the Department, Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia, kosach-51@mail.ru

Zabbarov Zulfat R., Postgraduate Student, Ulyanovsk Civil Aviation Institute; Pilot, Aeroflot – Russian Airlines, Moscow, Russia, zabbarovz@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 20.05.2023; одобрена после рецензирования 05.07.2023; принята к публикации 13.07.2023.

The article was submitted 20.05.2023; approved after reviewing 05.07.2023; accepted for publication 13.07.2023.

Дискуссионная статья
УДК 629.7.058

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ЭКИПАЖАМИ ГРАЖДАНСКИХ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

(публикуется в рамках реализации молодёжной политики Научного вестника ГосНИИ ГА)

Г. В. КОВАЛЕНКО, И. А. ЯДРОВ

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

Аннотация. По статистике около 42 % ошибок, связанных с негативным влиянием человеческого фактора в области авиации, составляют ошибки, совершённые членами экипажей воздушных судов (ВС) при принятии решений. Одно из перспективных направлений в этой области заключается в разработке и применении систем поддержки принятия решений. Статья посвящена вопросам разработки и внедрения в интеллектуальные транспортные системы особых авиационных интеллектуальных адаптивных систем поддержки принятия решений (ИАСППР): в работе рассматриваются основные направления, определяющие подход оператора к процессу принятия решений в авиации, а также предлагается концепция ИАСППР, разработанная на основе применения морфологического анализа и объединения. Устанавливается, что предложенный подход позволит ИАСППР приспосабливаться к условиям окружающей среды, а также изменять режим функционирования в зависимости от текущего психофизиологического состояния оператора и показателей эффективности его деятельности, что обуславливает перспективы применения таких систем в авиации. В частности, ИАСППР могут быть использованы для поддержки принятия членами экипажа ВС решений по обходу грозовых очагов, оптимизируя маршрут полёта с целью предотвратить попадание самолёта в зону грозовой деятельности и обеспечить экономию топлива.

Ключевые слова: воздушный транспорт, воздушное судно, гражданская авиация, автоматизация, принятие решений, человеко-машинные системы, интеллектуальные транспортные системы, интеллектуальные адаптивные системы, системы поддержки принятия решений

Для цитирования: Коваленко Г. В., Ядров И. А. Перспективы применения интеллектуальных адаптивных систем поддержки принятия решений экипажами гражданских воздушных судов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 43. С. 28–38.

PROSPECTS FOR THE USE OF INTELLIGENT ADAPTIVE DECISION SUPPORT SYSTEMS FOR CIVIL AIRCRAFT CREWS

(Published as part of the implementation of the youth policy of the Scientific Bulletin
of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation)

G. V. KOVALENKO, I. A. YADROV

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

Abstract. The human factor studies show that 42 % of aviation mistakes are caused by the pilots' poor decision-making. Decision Support Systems (DSS) are known to be one of the most perspective approaches in the field of optimizing the decision-making process. This article is dedicated to the issues of developing and implementing special aviation intelligent adaptive decision support systems (IADSS). It discusses the main directions that determine the operator's approach to the decision-making process in aviation, and proposes a concept of an IADSS developed based on the methods of dismemberment, morphological analysis, and integration. Such an approach is supposed to allow the system to dynamically adapt to the environment as well as to change the mode of its operation depending on the current psychophysiological state and performance characteristics of the operator. The IADSS is aimed at preventing decision-making errors and improving the operator's performance. Particularly, it can be employed in order to provide an intelligent support for the flight crew members during the thunderstorm avoidance procedure so as to optimize the initial flight route, preventing the aircraft from entering the area of thunderstorm activity and ensuring an acceptable level of fuel efficiency.

Keywords: air transport, aircraft, civil aviation, automation, decision-making, human-machine systems, intelligent transport systems, intelligent adaptive systems, decision support systems

For citation: Kovalenko G. V., Yadrov I. A. Prospects for the use of intelligent adaptive decision support systems for civil aircraft crews, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2023, no. 43, pp. 28–38. (In Russ.)

Введение

Главная цель внедрения автоматизации, в том числе и на воздушном транспорте, заключается в стремлении реализовать управление технологическими процессами без непосредственного участия человека, что во многих областях имеет положительные результаты. Так, переход к эксплуатации высокоавтоматизированных воздушных судов (ВС) значительно повысил уровень безопасности перевозок: на них число погибших пассажиров на 1 млн перевезённых составляет 0,03, что на порядок меньше, чем на ВС предыдущего поколения [1].

Активное участие человека играет существенную роль в функционировании даже самых передовых автоматизированных систем. Именно люди осуществляют контроль работы, обслуживание и совершенствование этих систем, и даже высокоавтоматизированные системы являются, всё же, не чем иным, как *человеко-машинными системами (ЧМС)*. Чем более сложной становится автоматизированная система, тем бóльшую роль в процессе обеспечения её безопасного функционирования играют возможности и профессиональная подготовка человека-оператора [2].

В исследованиях [3] указывается, что хотя человек способен к интегральному, многоуровневому восприятию и обладает уникальной системой переработки информации, в процессе формирования им концептуальной модели реальности может возникнуть множество ошибок, вызванных самим оператором; в частности, эти ошибки могут привести к формированию неадекватного оперативного образа [4]. Кроме того, людям свойственны ограниченные объём и концентрация внимания, а также сравнительно небольшая продолжительность состояния сосредоточенности [5].

Поскольку создание современных автоматизированных систем без участия человека-оператора невозможно, для обеспечения их эффективного функционирования требуется особый, ориентированный на взаимодействие с оператором подход к их созданию [6], наиболее полно реализующийся в концепции интеллектуальной адаптивной автоматизации.

Интеллектуальная адаптивная система (ИАС) представляет собой комплексную ЧМС, способную самостоятельно адаптироваться к изменениям элементов системы – человека-оператора и машинной составляющей, а также к изменениям во внешней среде [7]. *Интеллектуальность* ИАС связана с такими характеристиками, как способность анализировать, принимать

решения, обучаться на опыте и изменять своё поведение с целью оптимизации работы и достижения поставленных задач. При этом свойство адаптации заключается в возможности ИАС изменять режим функционирования в зависимости от показателей эффективности деятельности человека и его текущего психофизиологического состояния – *внутренняя адаптация*, а также приспосабливаться к изменяющимся условиям окружающей среды – *внешняя адаптация* [8].

Существуют различные принципы классификации адаптивных систем в соответствии с применяемыми в них уровнями автоматизации. В таблице представлен предложенный в [9] способ классификации, позволяющий выделить десять уровней автоматизации ИАС в зависимости от способа распределения между оператором и системой функций по:

- 1) мониторингу состояния внешней и внутренней среды;
- 2) анализу данных и разработке стратегий;
- 3) выбору одной из возможных стратегий;
- 4) реализации выбранной стратегии.

Классификация ИАС по уровням автоматизации [9]

Уровень		Функции			
		Мониторинг	Анализ	Выбор	Реализация
1	Ручной контроль	Человек	Человек	Человек	Человек
2	Поддержка реализации	Человек / Автоматика	Человек	Человек	Человек / Автоматика
3	Пакетная обработка	Человек / Автоматика	Человек	Человек	Автоматика
4	Общий контроль	Человек / Автоматика	Человек / Автоматика	Человек	Человек / Автоматика
5	Поддержка принятия решений	Человек / Автоматика	Человек / Автоматика	Человек	Автоматика
6	Смешанное принятие решений	Человек / Автоматика	Человек / Автоматика	Человек / Автоматика	Автоматика
7	Негибкая система	Человек / Автоматика	Человек	Человек	Автоматика
8	Автоматическое принятие решений	Человек / Автоматика	Человек / Автоматика	Автоматика	Автоматика
9	Контроль	Человек / Автоматика	Автоматика	Автоматика	Автоматика
10	Полная автоматизация	Автоматика	Автоматика	Автоматика	Автоматика

Выбор уровня автоматизации является одним из наиболее важных этапов создания ИАС, требующий от её разработчиков учёта множества факторов, причём предпочтения оператора являются одним из ключевых. Участники опроса [10], проведённого Национальным управлением по авиации и исследованию космического пространства США среди пилотов гражданских ВС на тему их отношения к высокоавтоматизированным системам управления, были почти единодушны во мнении, что члены экипажа ВС по-прежнему должны нести полную ответственность за управление самолётом; они также предпочли автоматизированные системы, которые осуществляют поддержку членов экипажа при принятии решений, полностью автоматическим. Таким образом, уровень автоматизации, соответствующий поддержке принятия

решений экипажем, в наибольшей степени удовлетворяет запросам пилотов, способствуя сохранению полного контроля над ВС и снижая уровень рабочей нагрузки на членов экипажа [9].

В ходе изучения особенностей принятия решений в авиации были выявлены два основных направления, определяющие подход оператора к процессу.

Классический подход в области принятия решений предполагает, что лицо, принимающее решение (ЛПР), является полностью информированным и действует максимально рационально [11], комплексно оценивая проблемы и принимая единственно возможное *оптимальное решение*.

Тем не менее, при таком рациональном подходе требования к ЛПР значительно превышают интеллектуальные возможности человека в области обработки информации. Результаты исследования [12] показали, что при работе в сложных ситуациях в условиях стресса и ограниченного времени операторы не действуют в соответствии с классическим подходом к принятию решения, даже если были ему обучены: ЛПР не создаёт набор альтернатив, но *сразу* генерирует решение, руководствуясь при этом своим опытом.

Основанный на этих соображениях *натуралистический подход* в области принятия решений учитывает ограниченность возможностей человека, а его целью является моделирование процесса принятия не *оптимального*, но *удовлетворительного* решения, принимаемого квалифицированным персоналом в нестандартных ситуациях [13].

Подход, используемый оператором для решения задачи, в целом определяется располагаемым для принятия решения временем: в случае ограниченного времени ЛПР скорее прибегнет к натуралистическому способу принятия решений, а по мере его увеличения попытается оптимизировать решение и выберет стратегии, больше похожие на классические. С другой стороны, новые технологии, обеспечивающие поддержку принятия решений оператором, позволяют преодолеть трудности, вызванные ограниченностью интеллектуальных возможностей человека, и реализовать более комплексные подходы.

Система поддержки принятия решений (СППР) – комплекс математических и эвристических моделей и методов, направленных на:

- 1) формирование перечня альтернативных решений;
- 2) определение последствий реализации каждой из предложенных альтернатив;
- 3) обоснование выбора наиболее приемлемого решения [14].

Такого рода системы позволяют повысить скорость и эффективность процесса принятия решений, а также обеспечить возможность использования классического подхода.

В обеспечении работы как СППР, так и ИАС определяющую роль играют *модели* – системы алгоритмов и данных, являющиеся основой программного обеспечения этих систем [15]. Это свидетельствует о потенциальном положительном результате, который может быть достигнут применением методов разработки ИАС при создании СППР.

Различают виды моделей: 1) модель *задания*, определяющая функционирование технически ориентированных ЧМС; 2) модель *пользователя*, используемая для осуществления адаптации ИАС, вызванной текущим состоянием оператора; 3) модель *системы* (пользователь и машина) и модель *окружающей среды*, совместно реализующие принцип адаптивной автоматики. Существуют различные подходы к разработке ИАС и в частности к разработке моделей: одним из наиболее популярных является метод, основанный на использовании *агентов* [16].

Динамические среды характеризуются недетерминированными и быстрыми изменениями, а также наличием некоторого уровня неопределённости [17]. Следовательно, для обеспечения эффективности работы в таких средах СППР необходимо динамически адаптироваться к постоянно изменяющимся условиям. Реализация этого требования обеспечит возможность получения благоприятных результатов при применении интеллектуальных адаптивных технологий, а также подходов к их созданию при разработке СППР.

Таким образом, целью авторов настоящей статьи является разработка концепции интеллектуальной адаптивной системы поддержки принятия решений, а также обоснование перспективы

применения таких систем в области авиации. Данная цель достигается путём решения следующих задач: 1) обоснование актуальности внедрения СПРР в области авиации, а также достоинств предлагаемого уровня автоматизации авиационной ЧМС; 2) определение принципов создания интеллектуальной адаптивной системы поддержки принятия решений; 3) оценка потенциальных преимуществ применения таких систем на воздушном транспорте.

Создание концептуальной схемы интеллектуальной адаптивной системы поддержки принятия решений

Интеллектуальные адаптивные системы поддержки принятия решений (ИАСППР) представляют собой активные ЧМС, способные динамически адаптироваться к изменяющимся внешним и внутренним условиям функционирования с целью осуществления эффективной поддержки принятия решений, объединяя в себе черты как ИАС, так и СПРР. Несмотря на то, что в предлагаемой концепции ИАСППР создание перечня альтернативных решений и реализация одного из них осуществляются автоматически, ответственность за выбор стратегии поведения возложена на оператора.

Предлагаемый вариант ИАСППР может быть получен путём объединения типовой структуры ИАС и обобщённой схемы СПРР.

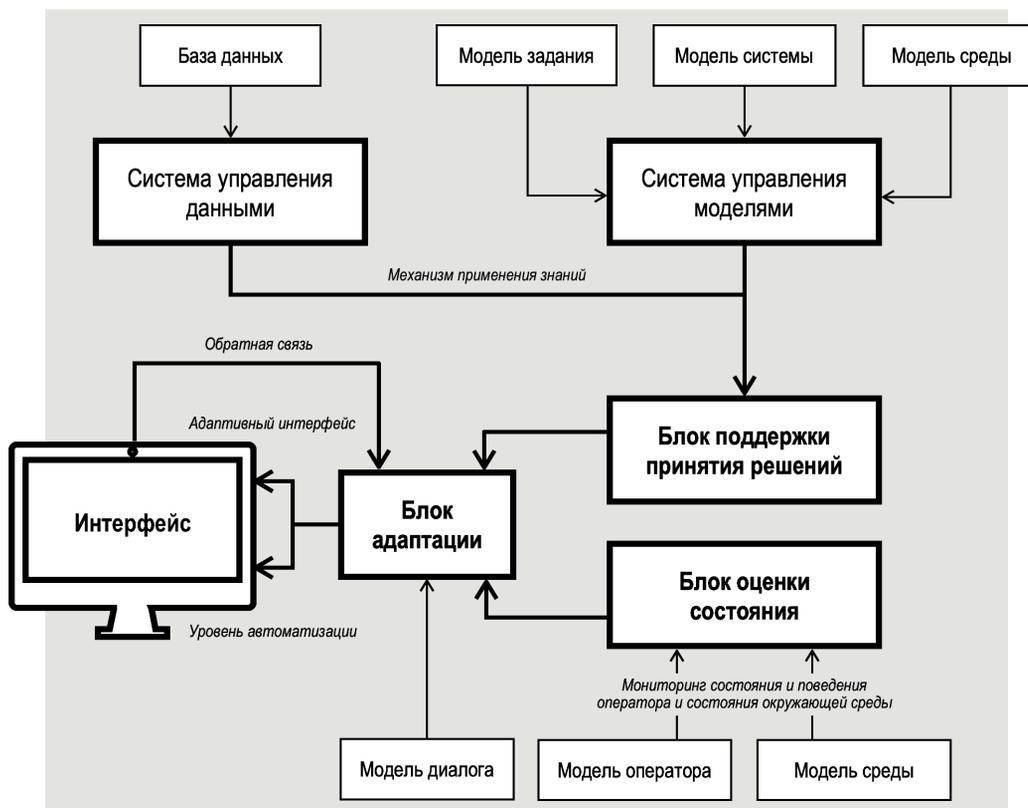


Рис. 1. Предлагаемая концептуальная схема ИАСППР

Основные элементы предлагаемой ИАСППР изображены на рис. 1.

1. *Блок оценки состояния*, осуществляющий оценку физиологического, эмоционально-психологического и поведенческого состояния оператора, а также состояния окружающей среды в режиме реального времени. В основе этого блока лежат модели:

а) *модель оператора*, как совокупность знаний системы о функциях и полномочиях человека-оператора и включающая в себя, в частности, алгоритм принятия им решений;

б) *модель среды*, как совокупность знаний системы об окружающей среде, выраженных в виде физических, психологических и (или) культурных законов.

2. *Блок поддержки принятия решений*, генерирующий возможные пути принятия решений и осуществляющий выбор наиболее оптимальных из них на основе применения моделей. Работа блока основана на использовании *механизма применения знаний*, функционирование которого определяется взаимодействием следующих систем:

а) *система управления данными*, как программное обеспечение, осуществляющее управление базой данных, соответствующей решаемой задаче. Этот элемент блока поддержки принятия решений освобождает оператора от необходимости анализировать данные, на основании которых осуществляется принятие решений;

б) *система управления моделями*, преобразующая данные в информацию путём применения той или иной модели [18]. Таким образом, модели представляют собой совокупность знаний системы об окружающем мире, выполняемой задаче и компонентах самой системы и могут быть представлены в следующем виде: 1) *модель среды* – законы, действующие в окружающем мире; 2) *модель задания* – алгоритм работы системы; 3) *модель системы* – структурная схема системы.

3. *Блок адаптации*, использующий модель диалога, определяющую порядок взаимодействия пользователя и системы, для осуществления адаптации к внутренним и внешним условиям функционирования. Основная задача блока адаптации – обеспечение наибольшего соответствия между текущим психофизиологическим состоянием оператора и способом оказания интеллектуальной поддержки со стороны системы, например, путём внесения изменений в пользовательский интерфейс.

4. *Интерфейс*, являющийся средством взаимодействия пользователя и системы.

5. *Контур обратной связи*, позволяющий отрегулировать уровень адаптации таким образом, чтобы поддерживать состояние оператора, например, производительность или уровень рабочей нагрузки, на оптимальном уровне путём осуществления повторной оценки состояния пользователя по завершении очередного цикла адаптации.

Адаптивная автоматика повышает производительность человека как элемента авиационных адаптивных систем [19, 20]. Исследование [7], проведённое в целях оценки эффективности интеллектуального адаптивного интерфейса для обеспечения управления беспилотными летательными аппаратами, показало, что использование интеллектуальной адаптивной автоматики позволяет повысить уровень ситуационной осведомлённости операторов, сократить время выполнения ими задач, а также снизить рабочую нагрузку пилотов. Используемый в предлагаемой ИАСППР уровень автоматизации не способствует исключению человека-оператора из контура управления, что удовлетворяет запросам членов лётных экипажей ВС гражданской авиации [10], позволяя сохранить им полный контроль над системой.

Таким образом, внедрение интеллектуальной адаптивной автоматики в СППР действительно может способствовать обеспечению эффективного взаимодействия между элементами ЧМС, в том числе и на воздушном транспорте. Выполнение полёта осуществляется, как правило, в динамически изменяющейся среде, что несомненно приводит к изменению уровня когнитивных возможностей оператора на различных этапах полёта и обуславливает важность осуществления адаптации системы «человек – высокоавтоматизированное ВС» к внешним и внутренним условиям функционирования. В частности, предлагаемый вариант модели ИАСППР может быть адаптирован для применения в системах, осуществляющих интеллектуальную поддержку принятия решений экипажем ВС при выборе оптимального маршрута обхода очагов грозы.

Перспективы применения ИАСППР для обхода очагов грозы

В соответствии с анализом [21], в 13 % авиационных происшествий, произошедших в период с 2000 по 2018 гг., ключевую роль сыграли сложные метеоусловия, в которых выполнялся полёт, причём 20,5 % из них связаны с попаданием ВС в зону грозы и ливневых осадков. Это

свидетельствует о том, что гроза действительно представляет собой реальную угрозу безопасности полётов.

Несмотря на всю опасность гроз для гражданских ВС, не было проведено достаточного количества исследований о принятии пилотами решений об их обходе [22]. В данной области можно выделить серию экспериментов, проведённых под руководством Ю. К. Стрелкова в 1986–1987 гг.

В одном из экспериментов [23] пилотам и штурманам предлагалось рассмотреть изображение грозовых засветок, при этом одна из возможных стратегий обхода (I стратегия на рис. 2) уже была изображена. Задача испытуемых заключалась в том, чтобы согласиться с предлагаемым решением, либо предложить собственный способ. Обработка результатов эксперимента позволила выделить пять стратегий решения задачи (см. рис. 2).

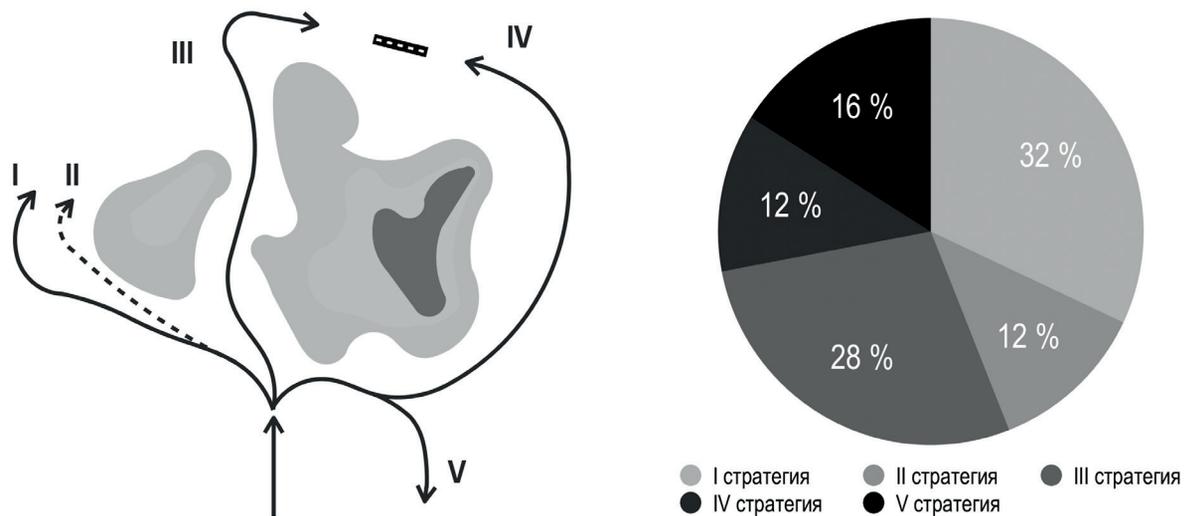


Рис. 2. Эксперимент по обходу грозы

Разнообразие стратегий указывает на то, что члены экипажа склонны по-разному воспринимать и оценивать ситуацию, они принимают различные, а иногда – противоположные решения по обходу грозовых зон. Кроме того, участники эксперимента, выбравшие стратегии II, III или IV (т. е. более половины испытуемых), сознательно подвергли ВС и пассажиров опасности, связанной с неблагоприятными последствиями, которые могут возникнуть вследствие попадания самолёта в зону грозы.

Результаты эксперимента [23] показали, что на момент его проведения не существовало единой методики осуществления обхода грозовых очагов, позволяющей унифицировать процесс принятия решений, что могло привести к необоснованному риску со стороны пилотов, руководствующихся при осуществлении обхода соображениями экономической эффективности выполнения полёта. И сейчас данная проблема ещё не нашла своего решения.

Действительно, в настоящий момент члены экипажей ВС гражданской авиации вынуждены самостоятельно принимать решения по обходу грозовых очагов, руководствуясь при этом только информацией о метеорологической обстановке вокруг ВС, отображаемой на экране бортового радиолокатора, и требованиями Руководства по производству полётов авиакомпании. Выполняя полёт таким образом, пилоты могут столкнуться с проблемой выбора оптимального способа обхода грозы, который обеспечивал бы минимальные отклонения от первоначального маршрута для уменьшения расходов, связанных с затратой дополнительного топлива, без создания при этом чрезмерной угрозы для безопасности полётов. Этот факт позволяет предположить, что применение специальных ИАСППР, осуществляющих поддержку принятия экипажем ВС решений по обходу очагов грозы, может способствовать оптимизации процесса обхода грозы

и оказать благоприятное влияние на состояние безопасности полётов гражданской авиации. С другой стороны, необходимость разработки и внедрения такой системы поддержки экипажа объясняется потенциально достижимым с её помощью экономическим эффектом.

Заключение

Принятие решений представляет собой сложный психологический процесс, а ошибочные решения в такой сфере, как авиация, могут привести к тяжёлым и даже катастрофическим последствиям. Результаты исследования [24] показали, что по статистике 42 % от числа ошибок, причиной которых стало негативное влияние человеческого фактора на выполнение полёта, составляют ошибки в принятии решений. Данный факт подтверждает актуальность разработки для интеллектуальных транспортных систем специальных СППР, функционирование которых направлено на оказание помощи членам лётных экипажей и оптимизацию процесса принятия решений, позволяя обеспечить высокий уровень ситуационной осведомлённости пилотов.

Предлагаемая концепция ИАСППР может быть реализована путём объединения типовой структуры ИАС и обобщённой схемы СППР, что позволит полученной системе динамически адаптироваться к изменяющимся внутренним и внешним условиям функционирования. Главное её достоинство – возможность реализовать гибкое управление знаниями, накопленными за период функционирования системы, и использовать их для принятия оптимальных решений. Одновременно использование предлагаемых моделей может способствовать эффективной оценке текущего состояния оператора и окружающей среды, повышая эффективность функционирования системы.

Перспектива использования ИАСППР на воздушном транспорте обуславливается положительными результатами применения авиационной интеллектуальной адаптивной автоматики: использование таких систем может не только обеспечить исключение ошибок человека-оператора, но также способствовать снижению уровня его рабочей нагрузки.

В частности, ИАСППР могут использоваться экипажами ВС при принятии решений по обходу очагов грозы, позволяя оптимизировать маршрут полёта ВС таким образом, чтобы не допустить попадание самолёта в зону грозы и обеспечить её обход на безопасном удалении, регламентированном нормативными документами, а также обеспечить сокращение расхода топлива. Применение ИАСППР может способствовать поддержанию заданного уровня безопасности полётов и экономии топлива, что указывает на актуальность дальнейших исследований в данной области.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников

1. Коваленко Г. В., Муравьев И. С., Нуждин С. Г. Анализ состояния аварийности современной авиации в Российской Федерации // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2017. № 2(15). С. 26–36.
2. Vainbridge L. Ironies of automation, *Automatica*, 1983, vol. 19, no. 6, pp. 775–779.
3. Котик М. А. Курс инженерной психологии. Таллин: Валгус, 1978. 374 с.
4. Цибулевский И. Е. Ошибочные реакции человека-оператора. Москва: Советское радио, 1979. 208 с.
5. Wickens C. D. Automation and human performance, *Engineering Psychology and Human Performance*, 4th Edition, Boston, MA, Pearson, 2012, pp. 377–404.
6. Коваленко Г. В., Михальчевский Ю. Ю., Ядров И. А. Неудовлетворительное взаимодействие между элементами интеллектуальной адаптивной системы ВС, как одна из основных причин катастрофы

Boeing 737 MAX8 авиакомпании Ethiopian Airlines // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2022. № 4(37). С. 5–18.

7. Hou M., Kobierski R. D., Brown M. Intelligent adaptive interfaces for the control of multiple UAVs, *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 2007, vol. 1, no. 3, pp. 327–362.

8. Коваленко Г. В., Михальчевский Ю. Ю., Муравьев И. С., Ядров И. А. Эволюция в сфере разработки интеллектуальных систем и интеллектуальные адаптивные системы // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2023. № 1(38). С. 5–18.

9. Endsley M. R., Kaber D. B. Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task, *Ergonomics*, 1999, vol. 42, no. 3, pp. 462–492.

10. Tenney Y. J., Rogers W. H., Pew R. W. *Pilot opinions on high level flight deck automation issues: Toward the development of a design philosophy*, NASA-CR-4669, 1995, 16 p.

11. Lehto M. R., Nah F. *Decision-making models and decision support. Handbook of human factors and ergonomics*, John Wiley & Sons, 2006, pp. 191–242.

12. Klein G. A. A Recognition Primed Decision (RPD) Model of Rapid Decision Making, *Decision Making in Action*, 1993, vol. 5, no. 4, pp. 138–147.

13. Zsombok C. E. *Naturalistic Decision Making*, Psychology Press, 1997, 440 p.

14. Ittman H. Decision Support Systems (DSS): A survey, *South African Journal of Business Management*, 1984, vol. 15, no. 4, pp. 189–196.

15. Brézillon P. Context modeling: Task model and practice model, *International and Interdisciplinary Conference on Modeling and Using Context*, 2007, pp. 122–135.

16. Hou M., Banbury S., Burns C. *Intelligent adaptive systems: An interaction-centered design perspective*, CRC Press, 2014, 336 p.

17. Stieglitz N., Knudsen T., Becker M. C. Adaptation and inertia in dynamic environments, *Strategic Management Journal*, 2016, vol. 37, no. 9, pp. 1854–1864.

18. Tariq A., Rafi K. Intelligent decision support systems-A framework, *Information and Knowledge Management*, 2012, vol. 2, no. 6, pp. 12–20.

19. Parasuraman R. *Theory and design of adaptive automation in aviation systems*, Catholic Univ of America, Washington DC cognitive science lab, 1992, 44 p.

20. Lavie T., Meyer J. Benefits and costs of adaptive user interfaces, *International Journal of Human-Computer Studies*, 2010, vol. 68, no. 8, pp. 508–524.

21. Сладкова Л. А. Анализ статистики авиакатастроф // Научные достижения и открытия 2019: сборник статей VIII Международного научно-исследовательского конкурса. Пенза: МЦНС «Наука и Просвещение», 2019. 146 с.

22. Boyd D. D. In-Flight Decision-Making by General Aviation Pilots Operating in Areas of Extreme Thunderstorms, *Aerospace Medicine Human Performance*, 2017, vol. 88, no. 12, pp. 1066–1072.

23. Стрелков Ю. К. Инженерная и профессиональная психология: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. Москва: Издательский центр «Академия»; Высшая школа, 2001. 360 с.

24. Hooye B. L. Pilot navigation errors on the airport surface: Identifying contributing factors and mitigating solutions, *The International Journal of Aviation Psychology*, 2006, vol. 16, no. 1, pp. 51–76.

References

1. Kovalenko G. V., Muravyev I. S., Nuzhdin S. G. About analysis of modern aviation accident rate state in Russian Federation, *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoj aviatsii*, 2017, no. 2(15), pp. 26–35. (In Russ.)

2. Bainbridge L. Ironies of automation, *Automatica*, 1983, vol. 19, no. 6, pp. 775–779.

3. Kotik M. A. *The course on Engineering Psychology*, Tallin, Valgus, 1978, 374 p. (In Russ.)

4. Tsibulevsky I. E. *Oshibochnye reaktsii cheloveka-operatora [Erroneous reactions of the human operator]*, Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1979, 208 p. (In Russ.)

5. Wickens C. D. Automation and human performance, *Engineering Psychology and Human Performance*, 4th Edition, Boston, MA, Pearson, 2012, pp. 377–404.
6. Kovalenko G. V., Mikhailchevsky Y. Y., Yadrov I. A. Unsatisfactory intellectual adaptive system development as a cause of Ethiopian Airlines Boeing 737 MAX8 accident, *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoj aviatsii*, 2022, no. 4(37), pp. 5–18. (In Russ.)
7. Hou M., Kobierski R. D., Brown M. Intelligent adaptive interfaces for the control of multiple UAVs, *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, 2007, vol. 1, no. 3, pp. 327–362.
8. Kovalenko G. V., Mikhailchevsky Y. Y., Muravyev I. S., Yadrov I. A. The evolution of intelligent systems development and intelligent adaptive systems, *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoj aviatsii*, 2022, no. 1(38), pp. 5–18. (In Russ.)
9. Endsley M. R., Kaber D. B. Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task, *Ergonomics*, 1999, vol. 42, no. 3, pp. 462–492.
10. Tenney Y. J., Rogers W. H., Pew R. W. *Pilot opinions on high level flight deck automation issues: Toward the development of a design philosophy*, NASA-CR-4669, 1995, 16 p.
11. Lehto M. R., Nah F. *Decision-making models and decision support. Handbook of human factors and ergonomics*, John Wiley & Sons, 2006, pp. 191–242.
12. Klein G. A. A Recognition Primed Decision (RPD) Model of Rapid Decision Making, *Decision Making in Action*, 1993, vol. 5, no. 4, pp. 138–147.
13. Zsombok C. E. *Naturalistic Decision Making*, Psychology Press, 1997, 440 p.
14. Ittman H. Decision Support Systems (DSS): A survey, *South African Journal of Business Management*, 1984, vol. 15, no. 4, pp. 189–196.
15. Brézillon P. Context modeling: Task model and practice model, *International and Interdisciplinary Conference on Modeling and Using Context*, 2007, pp. 122–135.
16. Hou M., Banbury S., Burns C. *Intelligent adaptive systems: An interaction-centered design perspective*, CRC Press, 2014, 336 p.
17. Stieglitz N., Knudsen T., Becker M. C. Adaptation and inertia in dynamic environments, *Strategic Management Journal*, 2016, vol. 37, no. 9, pp. 1854–1864.
18. Tariq A., Rafi K. Intelligent decision support systems-A framework, *Information and Knowledge Management*, 2012, vol. 2, no. 6, pp. 12–20.
19. Parasuraman R. *Theory and design of adaptive automation in aviation systems*, Catholic Univ of America, Washington DC cognitive science lab, 1992, 44 p.
20. Lavie T., Meyer J. Benefits and costs of adaptive user interfaces, *International Journal of Human-Computer Studies*, 2010, vol. 68, no. 8, pp. 508–524.
21. Sladkova L. A. Air accidents statistics analysis, *Nauchniye dostizheniya i otkrytiya 2019: sbornik statej VIII Mezhdunarodnogo nauchno-issledovatel'skogo konkursa*, Penza, MCNS “Nauka i Prosvescheniye”, 2019, pp. 18–25. (In Russ.)
22. Boyd D. D. In-Flight Decision-Making by General Aviation Pilots Operating in Areas of Extreme Thunderstorms, *Aerospace Medicine Human Performance*, 2017, vol. 88, no. 12, pp. 1066–1072.
23. Strelkov Y. K. *Inzhenernaya i professional'naya psikhologiya*, Moscow, Izdatelskiy tsentr “Akademiy”, Vyschaya shkola Publ., 2001, 360 p. (In Russ.)
24. Hooley B. L. Pilot navigation errors on the airport surface: Identifying contributing factors and mitigating solutions, *The International Journal of Aviation Psychology*, 2006, vol. 16, no. 1, pp. 51–76.

Информация об авторах

Коваленко Геннадий Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры лётной эксплуатации и безопасности полётов, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия, kgvf@inbox.ru

Ядров Илья Александрович, инженер, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия, yadrov.ilya@gmail.com

Authors information

Kovalenko Gennadiy V., Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Professor at the Department of Flight Operations and Aviation Safety, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named in honor of Air Chief Marshal A. A. Novikov, Saint Petersburg, Russia, kgvf@inbox.ru

Yadrov Ilya A., Engineer, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named in honor of Air Chief Marshal A. A. Novikov, Saint Petersburg, Russia, yadrov.ilya@gmail.com

Статья поступила в редакцию 13.06.2023; одобрена после рецензирования 06.07.2023; принята к публикации 13.07.2023.

The article was submitted 13.06.2023; approved after reviewing 06.07.2023; accepted for publication 13.07.2023

Научная статья
УДК 629.735.45.016.7

ИЗМЕНЕНИЕ ТЯГОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕРТОЛЁТОВ МИ-8Т В УСЛОВИЯХ ТЕМПЕРАТУР НАРУЖНОГО ВОЗДУХА ВЫШЕ СТАНДАРТНОЙ АТМОСФЕРЫ

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

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

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

Аннотация. В статье описаны результаты исследования изменения свободной тяги вертолётов Ми-8Т при различных температурах наружного воздуха. Основная цель выполненного исследования – проверка актуальности поправки с рег. № 64, внесённой в Руководство по лётной эксплуатации (РЛЭ) вертолёта Ми-8Т в 1998 году, о снижении на 350 кг свободной тяги вертолёта в условиях температур наружного воздуха выше стандартной атмосферы (СА). Исследование основано на изучении статистических характеристик массива оценок свободной тяги, полученных в ходе работ по оценке основных лётных характеристик вертолётов Ми-8Т в процедуре сертификации экземпляра воздушного судна (ВС). Массив содержит 590 оценок, выполненных в различных температурных условиях (от $-58\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+22\text{ }^{\circ}\text{C}$) на равнинных аэродромах (не выше 1000 м над уровнем моря). На основе анализа параметров распределения массива оценок установлено, что среднестатистическая оценка свободной тяги в условиях положительных температур наружного воздуха относительно номограмм РЛЭ действительно меньше, чем при отрицательных температурах. Однако это отличие существенно меньше заложенного в РЛЭ при внедрении поправки № 64 и составляет не 350 кг, а примерно 190 кг. Фактические характеристики в условиях положительных температур на всех типах ВС, как правило, снижаются больше расчётных при положительных температурах, однако математическое ожидание распределения массива говорит о том, что тяговые характеристики большинства вертолётов Ми-8Т во всех температурных условиях с учётом допустимых отклонений соответствуют требуемым даже без учёта поправки в 350 кг к требуемым значениям величины свободной тяги.

Ключевые слова: вертолёт Ми-8Т, температура наружного воздуха, стандартная атмосфера, свободная тяга, параметры распределения, массив оценок, эксплуатация авиационной техники

Для цитирования: Масленникова Г. Е., Дмитриева С. В., Тажетдинов Р. Р. Изменение тяговых характеристик вертолётов Ми-8Т в условиях температур наружного воздуха выше стандартной атмосферы // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 43. С. 39–45.

CHANGE IN THRUST CHARACTERISTICS OF MI-8T HELICOPTERS AT TEMPERATURES ABOVE STANDARD AIR TEMPERATURES

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

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

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

Abstract. The article describes the results of a research of the change in the free thrust of Mi-8T helicopters in various outdoor temperatures. The main purpose of the research is to check the relevance of

the amendment to the Rotocraft Flight Manual (RFM) of the Mi-8T helicopter in 1998 with registration number 64, on reducing the free thrust of the helicopter in conditions of outside air temperatures above standard air temperatures by 350 kg. The research is based on the study of the statistical characteristics of the array of free thrust estimates obtained during the assessment of the main flight characteristics of Mi-8T helicopters in the certification procedure for the aircraft instance. The array contains 590 estimates made in various temperature conditions (from -58 to $+22$ °C) at flat airfields. Based on the analysis of the parameters of the distribution of the array of estimates, it was found that the average estimate of free thrust in conditions of positive outside air temperatures relative to the nomograms of the RFM is indeed less than at negative temperatures. However, this difference is significantly less than the one laid down in the RFM during the implementation of amendment 64, and is not 350 kg, but about 190 kg. Actual characteristics in conditions of positive temperatures on all types of aircraft, as a rule, decrease more than the design ones at positive temperatures, however, the mathematical expectation of the mass distribution suggests that the traction characteristics of the vast majority of Mi-8T helicopters in all temperature conditions, taking into account permissible deviations, correspond to the required ones even without taking into account the correction of 350 kg to the required values of free thrust.

Keywords: helicopter Mi-8T, outside temperatures, standard atmosphere, free thrust, distribution parameters, array of estimates, operation of aviation equipment

For citation: Maslennikova G. E., Dmitrieva S. V., Tazhetdinov R. R. Change in thrust characteristics of Mi-8T helicopters at temperatures above standard air temperatures, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2023, no. 43, pp. 39–45. (In Russ.)

Введение

Изменение тяговых характеристик двигателей в условиях повышенных температур наружного воздуха и пониженного давления связано, в первую очередь, с изменением плотности воздуха – и это изменение описывается наряду с другими параметрами в высотно-скоростных характеристиках (ВСХ) двигателей [1–4]. Кроме этих расчётных изменений, по мере износа лопаток, загрязнения газовой воздушной тракта и других факторов, связанных с увеличением наработки, практически для всех типов эксплуатируемых двигателей характерно дополнительное падение тяговых характеристик в условиях повышенных температур наружного воздуха, которое, как правило, компенсируется введением эксплуатационных бюллетеней, расширяющих диапазон допустимых температур выходящих газов. Такие бюллетени были внедрены в своё время на двигателях АИ-24 2-ой серии, АИ-24ВТ, Д-30КУ-154-П, НК-8-2У. Проблема дополнительного падения тяговых характеристик в условиях повышенных температур наружного воздуха с увеличением наработок не обошла стороной и двигатели ТВ2-117А, установленные на вертолётах Ми-8. Вертолёты этого типа с начала серийного производства в 1970 году активно эксплуатировались в Средней Азии, в том числе в окрестностях Душанбе, то есть в условиях жары и высокогорья. Появившиеся в начале 80-х годов прошлого века замечания со стороны лётного состава на падение тяговых характеристик послужило поводом для проведения в ГосНИИ ГА лётно-исследовательской работы по оценке характеристик тяги несущего винта вертолёта Ми-8 на режимах висения в высокогорных условиях при высоких температурах, результаты которой описаны в Отчёте № 117/37-Ми-8/83, утверждённом начальником ГосНИИ ГА 31.10.1983.

В Заключении этого отчёта отмечено, что перерегулировка двигателей ТВ2-117А на повышенную мощность в порядке, определённом бюллетенем С79-175Э, описывающим процедуру перерегулирования параметров для увеличения мощности двигателей ТВ2-117А, позволяет получить прибавку свободной тяги 400–600 кг для вертолёта с ремонтными двигателями. Прибавка мощности достигается за счёт увеличения максимально допустимых значений температуры газов

и частоты вращения турбокомпрессора. Таким образом, внедрение этого бюллетеня компенсировало падение тяговых характеристик, полученное в эксплуатации, и в тот момент никаких изменений номограмм РЛЭ [5] для оценки величины свободной тяги в условиях повышенных температур наружного воздуха сделано не было.

Однако в 1998 году в РЛЭ вертолёта Ми-8Т всё же внесено изменение (рег. № 64) в порядок определения требуемой величины свободной тяги в условиях температур наружного воздуха выше СА. Этим изменением допускается снижение тяги на 350 кг относительно номограмм, полученных по данным ВСХ двигателей первой категории. За прошедшие годы методы эксплуатации вертолётов непрерывно совершенствовались, в том числе внедрено более 30 эксплуатационных бюллетеней, были и доработки, касающиеся сохранения тяговых характеристик двигателей. В этом плане интерес представляет реальное состояние тяговых характеристик вертолётов парка Ми-8Т в настоящий момент, и особенно – при эксплуатации в условиях температур наружного воздуха выше СА [6].

Результаты исследований этих характеристик описаны в настоящей статье.

Статистический анализ результатов оценок свободной тяги вертолётов Ми-8Т в различных температурных условиях

Для анализа фактических изменений тяговых характеристик вертолётов Ми-8Т при различных температурах наружного воздуха были изучены параметры трёх распределений оценок свободной тяги в условиях эксплуатации по данным контрольных облётов [7, 8], выполняемых для оценки фактических лётных характеристик при сертификации экземпляра ВС [9].

Исследования проводились на массиве из 590 оценок, выполненных в период с 2008 по 2022 год на вертолётах Ми-8Т, эксплуатирующихся в различных отечественных авиакомпаниях [10]. Оценки получены в температурных условиях от $-58\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+22\text{ }^{\circ}\text{C}$.

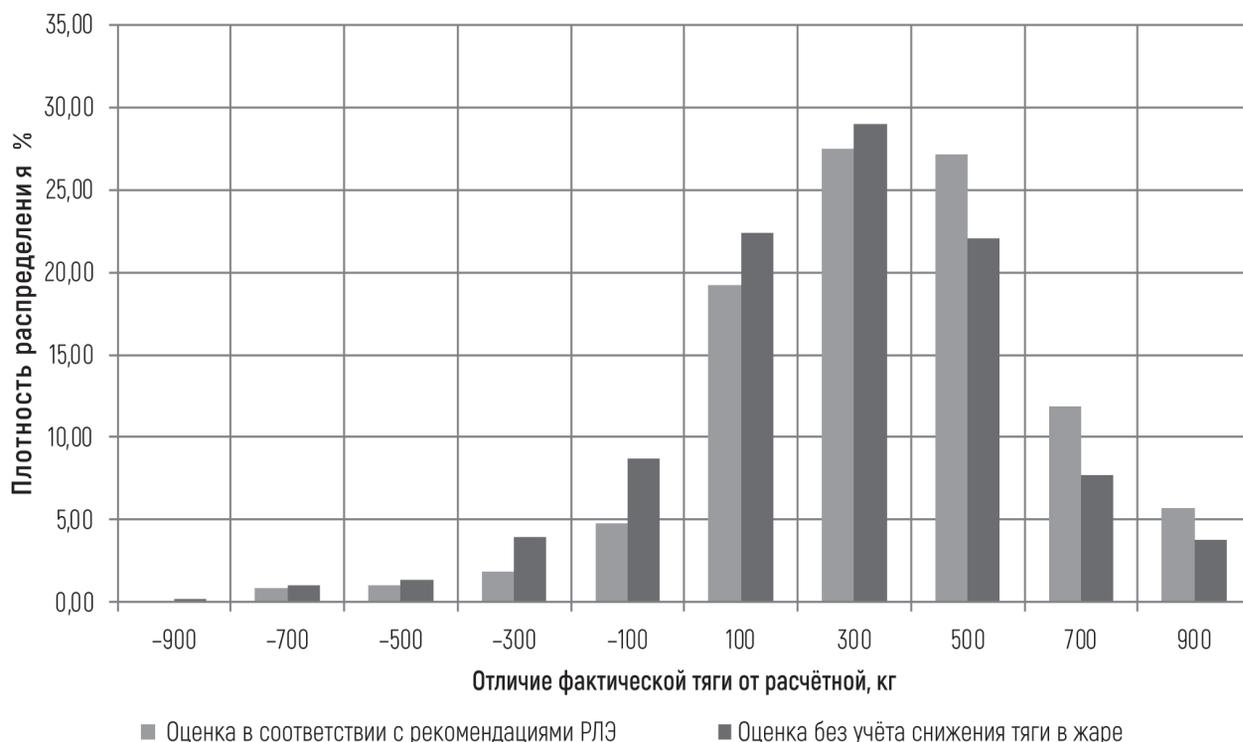


Рис. 1. Распределение оценок свободной тяги вертолётов Ми-8Т в эксплуатации относительно номограммы 3.1.2 РЛЭ

Таблица 1

Статистические оценки распределений (рис. 1)

Параметр распределения	Без изменения номограммы 3.1.2 РЛЭ	С уменьшением тяги, полученной по номограмме 3.1.2 РЛЭ, на 350 кг при температурах выше СА
Математическое ожидание, кг	176	261
Стандартное отклонение, кг	306	294
Коэффициент корреляции оценки с температурой наружного воздуха	-0,23	0,11

Из данных, приведённых на рис. 1 и в табл. 1, видно, что оба распределения – и оценок, сделанных с уменьшением расчётной свободной тяги на 350 кг при положительном отличии температуры наружного воздуха от СА, и непосредственно по данным номограммы 3.1.2 РЛЭ, имеют очень схожие параметры. Но естественно, при уменьшении расчётной тяги на 350 кг, математическое ожидание распределения смещается в сторону большего отличия от РЛЭ – среднестатистический запас тяги составляет в этом случае 261 кг, а при расчёте относительно данных номограммы РЛЭ без изменения – 176 кг. В обоих случаях среднестатистический запас тяги остается положительным, но при использовании номограмм без изменения следует считать, что свободная тяга вертолёта соответствует типовой, когда отличие фактической тяги от рассчитанной по номограмме РЛЭ находится в диапазоне от -130 кг до 482 кг (176 ± 306 кг). В этом случае количество несоответствующих типу экземпляров составит около 10 %. При уменьшении расчётной тяги при положительных температурах в соответствии с поправкой № 64 следует считать, что фактическая свободная тяга вертолёта соответствует типовой при отклонениях фактического значения от расчётного в диапазоне от -33 кг до 555 кг (261 ± 294 кг), и количество несоответствующих типу экземпляров фиксируется всего в 6 % оценок.

Для дальнейшего изучения вопроса, является ли изменение РЛЭ в части расчёта требуемой величины свободной тяги актуальным для парка эксплуатирующихся в настоящее время вертолётов Ми-8Т, рассмотрим ещё два распределения оценок величины свободной тяги: для оценок, выполненных в температурных условиях выше и ниже СА (рис. 2, табл. 2), при этом распределение для оценок в положительных температурах будем рассматривать как для случая уменьшения расчётной тяги в соответствии с изменением рег. № 64, так и по номограмме без внесения изменений.

Таблица 2

Статистические оценки распределений (рис. 2)

Параметр распределения	Температуры выше СА		Температуры ниже СА, расчёт по номограмме 3.1.2 РЛЭ
	По номограмме 3.1.2 РЛЭ	С уменьшением тяги на 350 кг	
Математическое ожидание, кг	73	428	262
Стандартное отклонение, кг	290	290	297
Коэффициент корреляции оценки с температурой наружного воздуха	-0,126	-0,126	-0,016

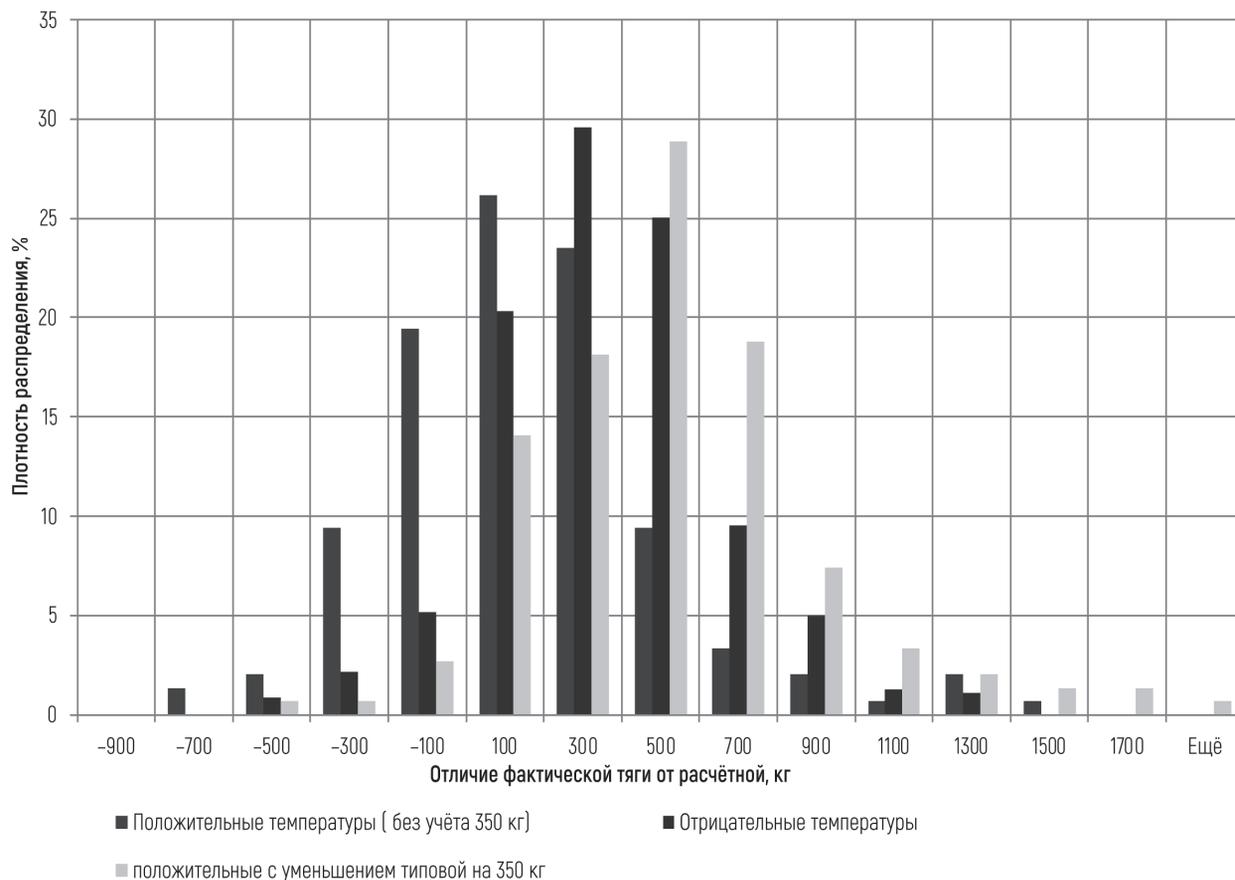


Рис. 2. Распределение отклонений фактической тяги от расчётной при положительных и отрицательных температурах наружного воздуха

Из данных, приведённых в табл. 2 и на рис. 2, можно сделать следующие выводы.

1. Параметры распределения оценок с учётом и без учёта 350 кг при положительных температурах ожидаемо не изменяются, изменение касается только математического ожидания, которое при уменьшении требуемого значения тяги на 350 кг также смещается, и среднестатистическое отличие фактической тяги от расчётной в этом диапазоне температур оказывается на 428 кг больше требуемого значения.

2. При температурах ниже СА математическое ожидание распределения оценок составляет 262 кг, при этом величина отклонения практически не зависит от величины отклонения температуры от СА. Коэффициент корреляции оценок с температурой, равный $-0,016$, свидетельствует о практическом отсутствии отклонения фактической тяги от расчётной в рассматриваемом диапазоне температур.

3. С учётом сделанного ранее замечания об изменении в процессе эксплуатации характеристик двигателей, связанных с увеличением температуры газов и падением оборотов компрессора, распределение оценок тяги, построенное без учёта поправки РЛЭ № 64, более соответствует типовым физическим процессам, сохраняя при этом среднестатистическую оценку характеристик свободной тяги, как соответствующую номограмме 3.1.2 РЛЭ вертолёта Ми-8Т.

Заключение

Для получения оценки фактической величины свободной тяги вертолёта Ми-8Т при эксплуатации на аэродромах, расположенных не выше 1000 м над уровнем моря, дополнительного

снижения на 350 кг расчётного значения свободной тяги при температурах наружного воздуха выше СА не требуется.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников

1. Авиационный турбовальный двигатель ТВ2-117 и редуктор ВР-8А. Руководство по технической эксплуатации. Москва: Машиностроение, 1987. 450 с.
2. Турбовальный двигатель ТВ3-117. Руководство по технической эксплуатации 078.00.5700 РЭ. Книга 1. Москва: Транспорт, 1986. 616 с.
3. Акимов А. И., Берестов Л. М., Михеев Р. А. Лётные испытания вертолётов. Москва: Машиностроение, 1980. 399 с.
4. Акимов А. И. Аэродинамика и лётные характеристики вертолётов. Москва: Машиностроение, 1988. 144 с.
5. Руководство по лётной эксплуатации вертолёта Ми-8Т // Министерство транспорта Российской Федерации, Департамент воздушного транспорта. Изд. 4-е. 1996. 535 с.
6. Масленникова Г. Е., Тажетдинов Р. Р. Обобщение результатов оценки основных лётных характеристик вертолётов Ми-8Т и Ми-8МТВ в процедуре сертификации экземпляра воздушного судна // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2018. № 23. С. 20–31. <https://www.elibrary.ru/ysupnb>
7. Артамонов Л. Т., Масленникова Г. Е. Типовая программа контрольного облёта вертолёта Ми-8 для оценки соответствия основных лётных характеристик типовым // Инженерно-авиационный вестник. 2005. Вып. № 1(91). С. 4–6.
8. Артамонов Л. Т., Масленникова Г. Е. Типовая программа контрольного облёта вертолёта Ми-8МТВ для оценки соответствия основных лётных характеристик типовым // Инженерно-авиационный вестник. 2005. Вып. № 1(91). С. 10–12.
9. Масленникова Г. Е. Контроль основных лётных характеристик в процедуре сертификации экземпляра ВС // Совершенствование системы обеспечения безопасной эксплуатации воздушных судов. Научные труды ГосНИИ ГА под ред. Громова М. С., Полторанина А. Я., Шапкина В. С. Москва: Воздушный транспорт, 2006. С. 71–79.
10. Масленникова Г. Е., Дмитриева С. В., Тажетдинов Р. Р. Вопросы определения величины свободной тяги вертолётов Ми-8Т и Ми-8МТВ в эксплуатации // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 39. С. 43–49. <https://www.elibrary.ru/exedty>

References

1. Aviatcionnyj turboval`nyj dvigatel` TV2-117 i reduktor VR-8A. Rukovodstvo po tekhnicheskoy ehkspluatatsii. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987, 450 p. (In Russ.)
2. Turboval`nyj dvigatel` TV3-117. Rukovodstvo po tekhnicheskoy ehkspluatatsii 078.00.5700 RE. Kniga 1, Moscow, Transport Publ., 1986, 616 p. (In Russ.)
3. Akimov A. I., Berestov L. M., Miheev R. A. *Letnye ispytaniya vertoletov*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980, 399 p. (In Russ.)
4. Akimov A. I. *Ajerdinamika i letnye harakteristiki vertoletov*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988, 144 p. (In Russ.)
5. Rukovodstvo po lyotnoj ehkspluatatsii vertolyota Mi-8T, Ministry of Transport of the Russian Federation, Department of Air Transport, Edition 4, 1996, 535 p. (In Russ.)
6. Maslennikova G. E., Tazhetdinov R. R. Synthesis of the results of the assessment of the main flight characteristics of Mi-8T and Mi-8MTV helicopters in the procedure of certification of the aircraft

copy, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2018, no. 23, pp. 20–31. (In Russ.)

7. Artamonov L. T., Maslennikova G. E. Typical control flight program of the Mi-8 helicopter to assess the compliance of the main flight characteristics with the standard, *Engineering and Aviation Bulletin*, 2005, no. 1(91), pp. 4–6. (In Russ.)

8. Artamonov L. T., Maslennikova G. E. Typical control flight program of the Mi-8MTV helicopter to assess the compliance of the main flight characteristics with the standard, *Engineering and Aviation Bulletin*, 2005, no. 1(91), pp. 10–12. (In Russ.)

9. Maslennikova G. E. Control of basic flight characteristics in the procedure for certification of the aircraft copy, Improvement of the system for ensuring the safe operation of aircraft, *Scientific works of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, ed. Gromov M. S., Poltoranin A. Ya., Shapkin V. S., Moscow, Vozdushnyj transport Publ., 2006, pp. 71–79. (In Russ.)

10. Maslennikova G. E., Dmitrieva S. V., Tazhetdinov R. R. Questions of calculation free thrust value for Mi-8T and Mi-8MTV helicopters in operation. *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 39, pp. 43–49. (In Russ.)

Информация об авторах

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

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

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

Authors information

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

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

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

Статья поступила в редакцию 10.04.2023; одобрена после рецензирования 08.06.2023; принята к публикации 16.06.2023.
The article was submitted 10.04.2023; approved after reviewing 08.06.2023; accepted for publication 16.06.2023.

Научная статья
УДК 621.31

СИНТЕЗ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ ЗАМЕЩЕНИЯ ЦЕПЕЙ ПИТАНИЯ ПРИЁМНИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПО КРИТЕРИЮ БЛИЗОСТИ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

(публикуется в рамках реализации молодёжной политики Научного вестника ГосНИИ ГА)

В. И. ПАВЛОВА^{1,2}, Л. В. ИЩЕНКО²

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

² Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. В статье представлены результаты исследований возможности применения эквивалентных схем замещения для построения цифровых двойников входных цепей питания потребителей электрической энергии, подключённых к цифровым интеллектуальным системам распределения электроэнергии бортовых систем электроснабжения воздушного судна. Необходимость синтеза эквивалентных электрических схем замещения обусловлена стремлением к унификации методов диагностирования приёмников электроэнергии средствами цифровых систем распределения и невозможностью получения реальных электрических схем всех возможных потребителей электроэнергии как минимум ввиду того, что состав и структура системы потребления электроэнергии может изменяться, оборудование может модифицироваться, а разработчики систем распределения не имеют доступа к конструкторской документации конкретных типов бортового оборудования. Показано, что существует реальная возможность подбора типовой электрической схемы замещения и идентификации её параметров таким образом, чтобы амплитудно-частотные характеристики выбранной схемы замещения совпадали с амплитудно-частотными характеристиками, экспериментально снятыми на реальном блоке. Для диагностирования входных цепей исследуемого оборудования принята гипотеза о том, что относительное изменение параметров реактивных элементов входных цепей питания диагностируемого блока приводит к такому же относительному изменению параметров реактивных элементов эквивалентной электрической схемы замещения.

Ключевые слова: диагностика авиационного оборудования, амплитудно-частотные характеристики, электрические схемы замещения, цифровой двойник, потребители электроэнергии, чувствительность, погрешности измерения, интеллектуальные транспортные системы

Для цитирования: Павлова В. И., Ищенко Л. В. Синтез эквивалентных электрических схем замещения цепей питания приёмников электроэнергии по критерию близости амплитудно-частотных характеристик // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 43. С. 46–55.

SYNTHESIS OF EQUIVALENT ELECTRICAL REPLACEMENT CIRCUITS FOR POWER SUPPLY CIRCUITS OF ELECTRIC POWER CONSUMERS BY THE CRITERION OF PROXIMITY OF AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS

(Published as part of the implementation of the youth policy of the Scientific Bulletin
of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation)

V. I. PAVLOVA^{1,2}, L. V. ISHCENKO²

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

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

Abstract. The article presents the results of research on the possibility of using equivalent substitution schemes to build digital twins of input power supply circuits of electric energy consumers connected to digital smart power distribution systems of airborne power supply systems. The need to synthesize equivalent electrical replacement circuits is due to the desire to unify methods for diagnosing electric power consumers by means of digital distribution systems and the impossibility of obtaining real electrical circuits of all possible electric power consumers, at least due to the fact that the composition and structure of the electric power consumption system can change, equipment can be modified, and developers of distribution systems do not have access to the design documentation of specific on-board equipment. It is shown that there is a real possibility of selecting a typical electrical replacement circuit and identifying its parameters in such a way that the amplitude-frequency characteristics of the selected replacement circuit coincide with the amplitude-frequency characteristics experimentally captured on a real block. To diagnose the input circuits of the equipment under study, the hypothesis was adopted that a relative change in the parameters of the reactive elements of the input power circuits of the diagnosed unit leads to the same relative change in the parameters of the reactive elements of an equivalent electrical replacement circuit.

Keywords: aviation equipment diagnostics, amplitude-frequency characteristics, electrical replacement circuits, digital twin, electricity consumers, sensitivity, measurement errors, intelligent transport systems

For citation: Pavlova V. I., Ishchenko L. V. Synthesis of equivalent electrical replacement circuits for power supply circuits of electric power consumers by the criterion of proximity of amplitude-frequency characteristics, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2023, no. 43, pp. 46–55. (In Russ.)

Введение

Современные тенденции в развитии авиационного электрооборудования непосредственно связаны с всё более широким применением цифровых технологий [1–3]. В системах электроснабжения воздушных судов (ВС) внедряются цифровые измерения, а системы распределения электроэнергии становятся цифровыми и интеллектуальными, в них возможна реализация более сложных законов управления и защиты от аварийных режимов. Дальнейшее развитие систем электроснабжения связано с разработкой цифровых двойников устройств электрооборудования [4, 5], которые используются для диагностирования и прогнозирования технического состояния источников и потребителей электроэнергии. Подключение потребителей к системе распределения позволяет оценивать параметры передаваемой электроэнергии, анализируя которые можно оценивать состояние входных цепей питания потребителей. Теоретически возможно применение двух способов определения параметров элементов входных цепей электропитания – путём анализа амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) входных импедансов [6, 7] или по переходным процессам, возникающим при включении/отключении потребителя [8, 9].

Получение АЧХ на борту ВС требует переработки цифровых коммутационных аппаратов – локальных центров управления нагрузками. Необходимо обеспечить генерацию синусоидальных сигналов в заданном диапазоне частот и измерение амплитуды выходного сигнала для формирования АЧХ.

При использовании переходной функции цифровые измерения мгновенных значений напряжений и токов потребления позволяют оценивать параметры входных цепей питания

подключаемых потребителей электроэнергии без изменения аппаратной реализации локальных центров управления нагрузками. Однако в этом случае требуется знание электрической схемы входного каскада встроенного источника питания потребителя для формирования алгоритма его диагностирования. Поэтому вместо реальных схем входных цепей питания предлагается использование эквивалентных электрических схем замещения (ЭЭСХ), которые обеспечивают совпадение с АЧХ входного импеданса, экспериментально полученного на реальном объекте, и АЧХ электрической схемы замещения. Методика синтеза таких эквивалентных электрических схем замещения необходима для дальнейшего использования для диагностирования по переходным функциям.

Постановка задачи исследования

Теоретическая возможность использования эквивалентных электрических схем замещения для диагностирования состояния входных цепей питания потребителей электроэнергии в интеллектуальных транспортных системах обусловлена изоморфизмом свойств эквивалентной электрической схемы в частотной и временной областях. Изменение АЧХ эквивалентно изменению параметров переходных процессов при ступенчатом воздействии, а значит изменение по причинам старения и деградации параметров элементов входных цепей (в первую очередь реактивных) приводит к изменению и АЧХ, и параметров переходных процессов.

Совпадение АЧХ объекта и АЧХ ЭЭСХ обеспечивается соответствием структуры (топологии) схемы и правильным выбором её параметров.

Структура ЭЭСХ определяется на основе анализа типа и формы АЧХ. Тип (класс) схемы замещения можно определить с помощью полюсно-нулевых диаграмм, представляя входную цепь в виде многопараметрического двухполюсника.

Существует 4 класса схем, отличающихся свойствами в предельных состояниях – при частоте, равной нулю и частоте, равной бесконечности. Реакция двухполюсника (его входной импеданс) тоже может быть двух типов – разрыв (сопротивление равно бесконечности) и короткое замыкание (сопротивление равно нулю). Изображение диаграммы входного импеданса двухполюсника называется характеристической строкой двухполюсника (рис. 1).

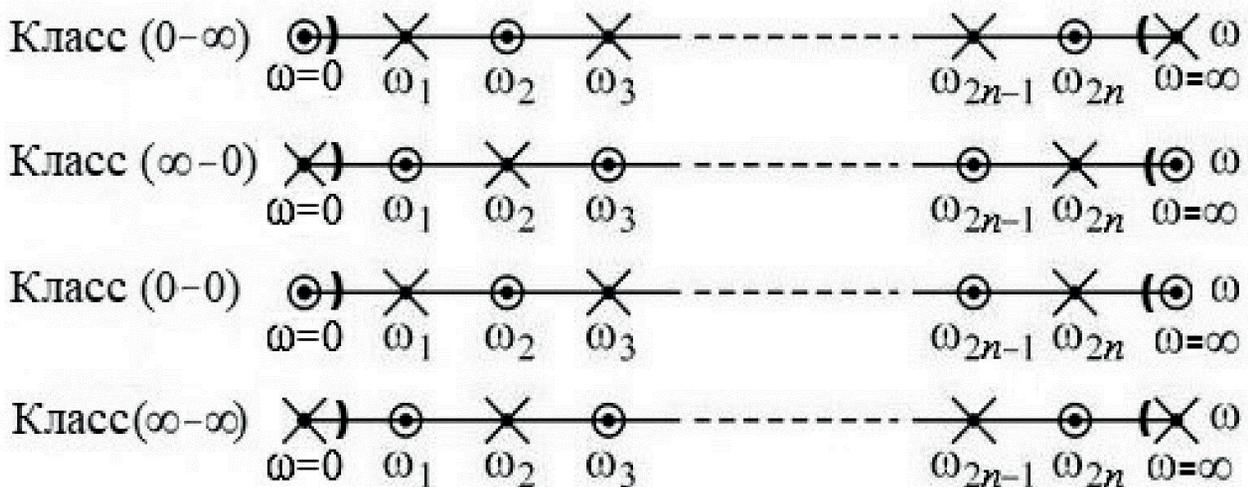


Рис. 1. Характеристическая строка двухполюсника

Количество нулей и полюсов, а соответственно количество экстремумов в АЧХ входного импеданса электрической схемы определяется количеством реактивных элементов – число резонансных частот в АЧХ на единицу меньше числа реактивных элементов в схеме.

В общем случае сопротивление реактивного двухполюсника $Z(j\omega)$ можно определить по канонической формуле Фостера [8]:

$$Z(j\omega) = \pm j\omega^{\pm 1} k \frac{\prod_{p=1}^m (\omega^2 - \omega_p^2)}{\prod_{q=1}^n (\omega^2 - \omega_q^2)},$$

где ω – частота; m – число резонансов напряжений; n – число резонансов токов; ω_p, ω_q соответственно частоты резонансов напряжений (нулей) и токов (полюсов); знаки $+, -$ зависят от характера первого резонанса; коэффициент k зависит от характера сопротивления на частоте, превышающей частоту максимального резонанса.

Таким образом, существует возможность использовать в качестве базиса электрических схем замещения канонические цепные схемы четырёх типов, соответствующие четырём классам характеристических строк полюсно-нулевых диаграмм – 2 схемы Фостера и 2 схемы Кауэра. Параметры элементов выбранных схем определяются известными методами аппроксимации, например методом наименьших квадратов или с использованием нейросетевого подхода.

Синтез электрической схемы замещения состоит из двух этапов – определения топологии электрической схемы (выбор из базиса схем) и определения её параметров, «натягивающих» АЧХ её входного импеданса на заданную.

Методика определения параметров эквивалентных электрических схем замещения

Определение параметров эквивалентных электрических схем замещения бортового оборудования ВС выполняется на нескольких этапах – на земле и в полёте (рис. 2).

Порядок выполнения работ на земле:

- получается АЧХ нового (исправного объекта);
- по АЧХ объекта выбирается структура электрической схемы замещения; экспериментальные исследования АЧХ входных каскадов реальных ВИП показали, что в максимальном случае достаточно двух каскадов с четырьмя реактивными элементами для получения необходимой структуры;
- выполняется идентификация параметров электрической схемы методом наименьших квадратов; критерием в задаче идентификации является близость АЧХ объекта и АЧХ электрической схемы замещения;
- составляется система дифференциальных уравнений (математическая модель) схемы замещения.

Идентификация параметров электрической схемы замещения – это первый шаг верификации математической модели объекта.



Рис. 2. Методика определения параметров эквивалентных электрических схем замещения

Порядок выполнения работ в полёте (после каждого включения приёмника электроэнергии):

- производятся цифровые измерения потребляемого тока для получения переходной функции;
- осуществляется идентификация параметров дифференциальных уравнений (верификация математической модели);
- рассчитываются текущие параметры электрической схемы замещения.

При более детальном анализе зависимостей резонансных частот и амплитудных значений от состояния конденсаторов (обрывов или изменения параметров) можно получить аналитические функции, по которым появится возможность однозначного диагностирования таких состояний.

Определение параметров эквивалентных электрических схем замещения выполняется и во временной области, когда требования задаются к переходной или импульсной характеристике, и в частотной области, когда требования задаются к АЧХ.

Методы исследования

Для получения математических моделей входных цепей питания потребителей электроэнергии, которые применяются для создания цифровых двойников при диагностике, можно использовать универсальный метод математического прототипирования энергетических процессов [5], метод предельных состояний [10] или любые другие методы расчёта и анализа электрических цепей [7].

В данном исследовании для формирования аналитической функции для АЧХ и составления дифференциальных уравнений используется метод предельных состояний [10], так как он в отличие от других методов расчёта позволяет получать единую аналитическую математическую модель и для АЧХ, и для дифференциальных уравнений.

Для идентификации параметров ЭЭСХ использовался метод наименьших квадратов.

Экспериментальные исследования и их результаты

Определение параметров эквивалентных электрических схем замещения состоит из нескольких этапов:

1. Выбор электрической схемы замещения.

Условия физической реализуемости зависят от того, из каких элементов предполагается синтезировать цепь, в данном случае RLC-цепь.

Реальная АЧХ определяется номинальными (расчётными) значениями параметров исследуемого объекта, допустимыми (технологическими) отклонениями параметров, измерительными и вычислительными ошибками, отклонениями параметров, обусловленными старением элементов или эксплуатационными воздействиями.

Как уже указывалось ранее, по амплитудам в резонансных точках АЧХ определяются параметры R, L, C элементов объекта исследования [9]. Структуру (топологию) электрической схемы замещения задаём, исходя из количества экстремумов исходной АЧХ.

Для контроля состояния оборудования достаточно ограничиться входным импедансом схемы $Z(f)$ на заданном множестве значений частоты f .

Таким образом, частотная характеристика многопараметрического двухполюсника RLC-цепи состоит из набора чередующихся локальных экстремумов. Координаты локальных экстремумов могут быть использованы в качестве диагностических параметров объекта. Постепенное изменение параметров элементов при их деградации можно использовать в прогнозировании состояния объекта контроля. При сохранении значений параметров электрической схемы устройства, АЧХ остается неизменной. По форме АЧХ (наличию, координатах и величинах экстремумов

на графике частотной характеристики) можно судить о состоянии контролируемого устройства. В качестве примера исходного объекта рассмотрим АЧХ исправного частотного фильтра, снятую экспериментальным путём (рис. 3).

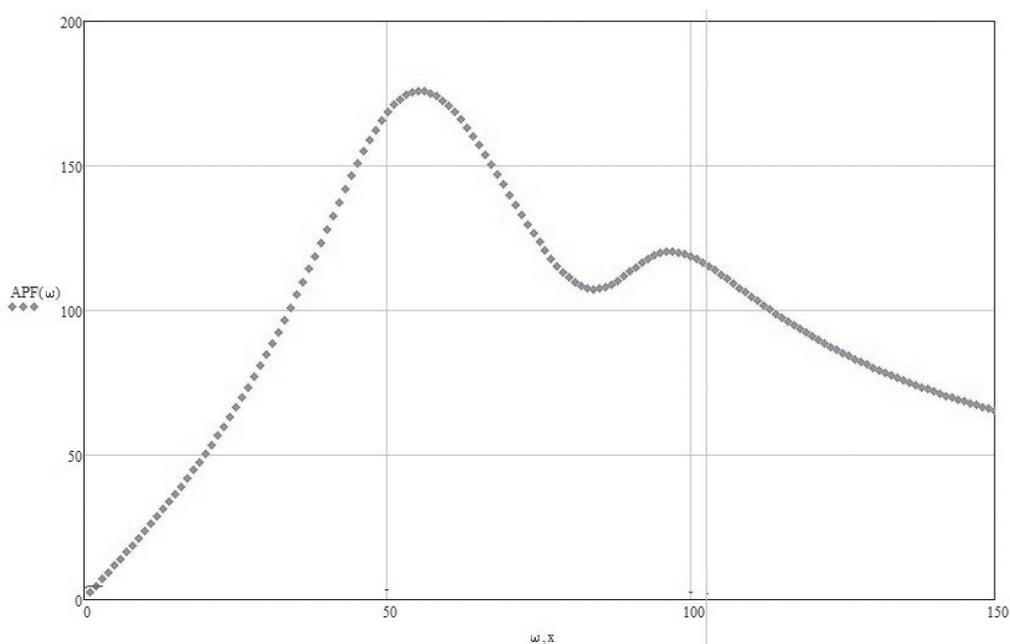


Рис. 3. АЧХ частотного фильтра

Схемы замещения на основе частотных характеристик для несложных двухполюсников, содержащих резистивные и реактивные элементы, качественно строятся на основании физических соображений о характере изменения сопротивления отдельных элементов этого двухполюсника в функции частоты.

На характеристике рис. 3 видны экстремумы: два максимума и один минимум. Это свидетельствует о наличии двух каскадов в схеме замещения. Согласно исследованиям АЧХ [8], один максимум соответствует одному каскаду (из связки резистора, индуктивности и ёмкости) элементов в исходной электрической цепи. На основании представленной АЧХ можно построить схему замещения (рис. 4), используя I каноническую схему Кауэра, в которой в продольных плечах располагаются индуктивные элементы, а в поперечных плечах – ёмкостные.

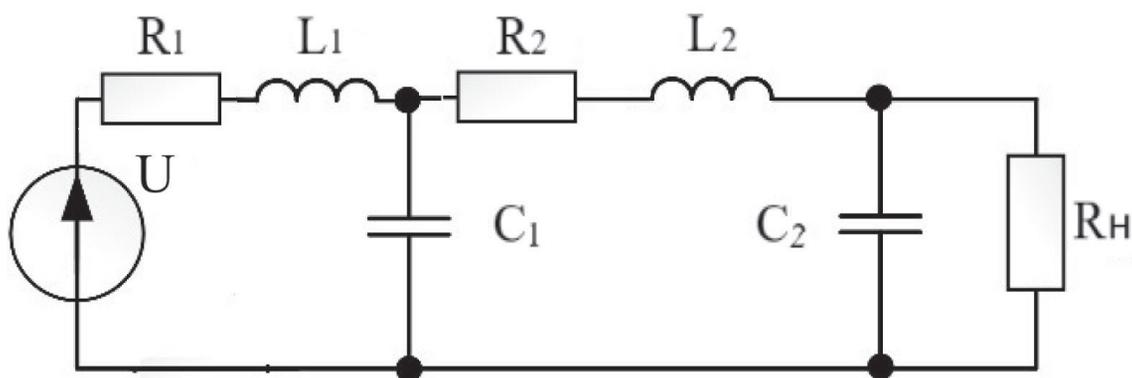


Рис. 4. Электрическая схема замещения

Выбранная схема имеет такое количество реактивных элементов, которое соответствует заданной АЧХ с конкретным количеством экстремумов.

Нескольким видам схем замещения может соответствовать одна АЧХ. Важным является то, что количество экстремумов в АЧХ схемы замещения должно совпадать с топологией АЧХ исследуемой системы.

2. *Определение чувствительности изменения контролируемых параметров от измеренных.*

Характеристики электрической цепи зависят от параметров её элементов, в первую очередь реактивных. В процессе эксплуатации значения параметров элементов неизбежно отличаются от расчётных значений, что приводит к изменению характеристик реактивных элементов. Изменения характеристик должны быть такими, при которых работа приёмника электрической энергии не нарушается. Поэтому, чем меньше изменения характеристик реактивных элементов при одном и том же отклонении величин параметров элементов, тем эффективнее приёмник электрической энергии. Для оценки возможных изменений параметров элементов при изменении характеристик устройства введём понятие чувствительности.

При решении задачи определения чувствительности элементов электрической схемы замещения использовалось программное обеспечение Scilab 6.1.1.

В результате авторами настоящей статьи найдены неизвестные параметры (R, L, C) аппроксимирующей функции от исходной АЧХ, т. е. найдено наилучшее возможное квадратическое приближение (рис. 5). При имитации изменения параметров в экспериментально полученной АЧХ все коэффициенты изменят свои значения, так как они полностью определяются исходными данными.

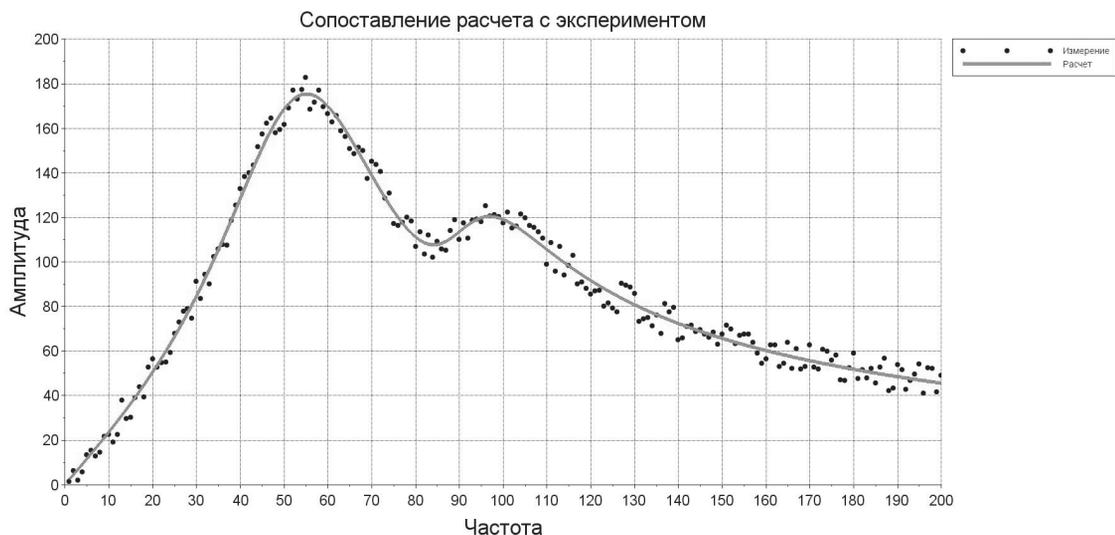


Рис. 5. График аппроксимации АЧХ

В среде Scilab 6.1.1 также были получены искомые параметры при разных значениях погрешностей измерения. На рис. 6 приведён график аппроксимации при относительной погрешности 7,5 %. Искусственно изменяя числовые значения погрешности измерений АЧХ, получаем различные диапазоны отклонения параметров (R, L, C) в зависимости от точности измерений (рис. 7).

Анализ рис. 7 показывает, что при увеличении значений относительной погрешности отдельных параметров электрической схемы замещения существенно растёт и относительная суммарная погрешность АЧХ. Наибольшее влияние на отклонение АЧХ оказывают значения характеристик параметров реактивных элементов, таких как $C1, C2$ и $L1, L2$. При имитации процесса измерения, по которому строилась исходная АЧХ, например, при максимальной относительной погрешности 16 % параметра $C2$, относительная погрешность АЧХ равна 32,5 %.



Рис. 6. График аппроксимации с погрешностью 7,5 %



Рис. 7. Относительная погрешность определения параметров R, L, C

Определить чувствительность АЧХ к изменениям параметров можно отдельно по каждому из них в схеме замещения. Тем самым на основании графика (см. рис. 7) можно проследить чувствительность АЧХ к изменениям параметров R, L, C в зависимости от точности измерений, которая в конечном счёте должна быть учтена при реализации методики диагностирования.

Заключение

Синтез эквивалентных электрических схем замещения входных цепей питания потребителей электроэнергии позволяет унифицировать методику диагностирования потребителей средствами цифровых интеллектуальных систем распределения электроэнергии. При этом существует реальная возможность использовать канонические цепные схемы в качестве базиса построения эквивалентных электрических схем замещения для любых входных цепей питания. Эквивалентность обеспечивается подбором таких параметров ЭЭСХ, которые обеспечивают совпадение АЧХ объекта и АЧХ ЭЭСХ.

Погрешности измерения при получении АЧХ конкретного объекта оказывают влияние на погрешности определения параметров электрических схем замещения. Это необходимо учитывать при формировании критериев работоспособности в «пассивном» методе диагностирования – по переходным процессам при включении приёмника электроэнергии.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников

1. Лёвин А. В., Халютин С. П., Жмуров Б. В. Тенденции и перспективы развития авиационного электрооборудования // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 213(3). С. 50–57.
2. Грузков С. А., Румянцев М. Ю. Полная электрификация воздушных судов как один из важнейших способов решения экологических проблем и повышения эксплуатационной, экономической и топливно-энергетической эффективности воздушного транспорта // Вестник Академии электротехнических наук Российской Федерации. 2016. Выпуск 18. С. 35–60.
3. Халютин С. П. Электрификация летательных аппаратов – от ПЕ-2 до полностью электрического самолета. Направления исследований // Электропитание. 2018. № 4. С. 4–26. <https://elibrary.ru/rcykld>
4. Brucherseifer E. and Fay A. Digital Twins, *Automatisierungstechnik*, 2021, vol. 69, no. 12, pp. 1023–1025. <https://doi.org/10.1515/auto-2021-0155>
5. Khalyutin S., Starostin I., Agafonkina I. Generalized Method of Mathematical Prototyping of Energy Processes for Digital Twins Development. *Energies*, 2023, 16(4), 1933. <https://doi.org/10.3390/en16041933>
6. Савелов А. А. Применение локальных центров управления нагрузками для контроля приёмников электроэнергии // Электропитание. 2018. № 1. С. 4–13.
7. Савелов А. А., Решетов С. А. и др. Разработка демонстратора системы контроля, диагностики, прогнозирования технического состояния потребителей электроэнергии: Отчёт о НИР. Москва: МГТУ ГА, 2018. 120 с.
8. Павлова В. И., Халютин С. П., Савелов А. А., Давидов А. О. Контроль и диагностика технического состояния встроенных источников питания авиационной техники // Международная конференция молодых специалистов по микро/нанотехнологиям и электронным устройствам, EDM, 2019, С. 464–468.
9. Павлова В. И., Халютин С. П. Диагностика состояния входных цепей источников вторичного электропитания на основе аналитических выражений // IEEE XXII Международная конференция молодых специалистов в области электронных приборов и материалов (EDM 2021). Дайджесты. Ая, Алтайский край, 30 июня – 04 июля 2021 года. Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2021. С. 313–317. <https://elibrary.ru/uwlssd>
10. Титов А. А., Халютин С. П. Метод предельных состояний. Символьный анализ электрических цепей. Москва: Военно-воздушная инженерная академия им. Н. Е. Жуковского. 2009. 53 с. <https://elibrary.ru/toqzqj>
11. Abderrahman Yulji, Abderrahim Tienti and Amin Budgen Stambouli. A novel modelling approach of RLC electrical circuits for symbolic circuit analysis by the direct topological method, *Arabian Journal of Science and Technology*, 2020, vol. 45, no. 3, pp. 1897–1909. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04280-0>

References

1. Lyovin A. V., Khalyutin S. P., Zhmurov B. V. Trends and prospects for the development of aviation electrical equipment, *Civil Aviation High Technologies*, 2015, vol. 213, no. 3, pp. 50–57. (In Russ.)
2. Gruzkov S. A., Romyantsev M. Yu. Complete aircraft electrification as one of the most important ways to solve environmental problems and improve operational, economic and fuel and energy efficiency of air transport, *Bulletin of the Academy of Electrical Sciences of the Russian Federation*, 2016, issue 18, pp. 35–60. (In Russ.)

3. Khalyutin S. P. Elektrifikatsiya letatel'nykh apparatov – ot PE-2 do polnost'yu ehlektricheskogo samolyota. Napravleniya issledovaniy, *Ehlektricitianie*, 2018, no. 4, pp. 4–26. (In Russ.)
4. Brucherseifer E. and Fay A. Digital Twins, *Automatisierungstechnik*, 2021, vol. 69, no. 12, pp. 1023–1025. <https://doi.org/10.1515/auto-2021-0155>
5. Khalyutin S., Starostin I., Agafonkina I. Generalized Method of Mathematical Prototyping of Energy Processes for Digital Twins Development. *Energies*, 2023, 16(4), 1933. <https://doi.org/10.3390/en16041933>
6. Savelov A. A. Primenenie local'nykh tseftrov upravleniya nagruzkami dlya kontrolya priyomnikov ehlektroehnergii, *Ehlektricitianie*, 2018, no. 1, pp. 4–13. (In Russ.)
7. Savelov S. A., Reshetov S. A. and etc. *Razrabotka demonstratora sistemy kontrolya, diagnostiki, prognozirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya potrebitelej ehlektroehnergii*, Otchyot o NIR MGTU GA, 2018, 120 p. (In Russ.)
8. Pavlova V. I., Khalyutin S. P., Savelov A. A., Davidov A. O. Kontrol' i diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya vstroennykh istochnikov pitaniya aviatsionnoj tekhniki, *Mezhdunarodnaya konferentsiya molodykh spetsialistov po mikro/nanotekhnologiyam i ehlektronnyim ustrojstvam [Monitoring and Diagnostics of the Technical Condition of Built-in Power Sources of Aviation Equipment, International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices]*, EDM, 2019, pp. 464–468. (In Russ.)
9. Pavlova V. I. Diagnostika sostoyaniya vkhodnykh tsepej istochnikov vtorichnogo ehlektricitianiya na osnove analiticheskikh vyrazheniy, *IEEE XXII Mezhdunarodnaya konferentsiya molodykh spetsialistov v oblasti ehlektronnykh priborov i materialov (EDM 2021). Dajdzhesty [Diagnostics of the State of Secondary Power Supplies Input Circuits Parameters Based on Analytical Expressions, IEEE XXII International Conference of Young Specialists in the Field of Electronic Devices and Materials (EDM 2021). Digests]*, Aya, Altai Territory, June 30 – July 04, 2021, Novosibirsk, Novosibirsk State Technical University Publ., 2021, pp. 313–317. (In Russ.)
10. Titov A. A. *Metod predel'nykh sostoyanij. Simvol'nyj analiz ehlektricheskikh tsepej [Limit state method. Symbolic analysis of electrical circuits]*, Moscow, Voenno-vozdushnaya inzhenernaya akademiya im. N. E. Zhukovskogo Publ., 2009, 53 p. (In Russ.)
11. Abderrahman Yulji, Abderrahim Tienti and Amin Budgen Stambouli. A novel modelling approach of RLC electrical circuits for symbolic circuit analysis by the direct topological method, *Arabian Journal of Science and Technology*, 2020, vol. 45, no. 3, pp. 1897–1909. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04280-0>

Информация об авторах

Павлова Виктория Игоревна, аспирант, Московский государственный технический университет гражданской авиации; ведущий инженер по лётным испытаниям ВС, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, kviki6819@gmail.com

Ищенко Леонид Викторович, аспирант, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия, ishenko998@yandex.ru

Authors information

Pavlova Viktoriya I., Postgraduate Student, Moscow State Technical University of Civil Aviation; Leading Aircraft Flight Test Engineer, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, kviki6819@gmail.com

Ishchenko Leonid V., Postgraduate Student, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia, ishenko998@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 30.05.2023; одобрена после рецензирования 20.06.2023; принята к публикации 27.06.2023.
The article was submitted 30.05.2023; approved after reviewing 20.06.2023; accepted for publication 27.06.2023.

Научная статья
УДК 629.735.054.07.058.42

МЕТОД АДАПТИВНОЙ КАЛИБРОВКИ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ВЫСОТЫ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Д. Е. ЩЕРБАКОВ

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. Адаптивная калибровка систем мониторинга выдерживания высоты НМУ (Height Monitoring Unit) опирается на вычисление средних разниц геометрических высот воздушных судов (ВС), пересекающих зону действия НМУ, между данными многопозиционных систем наблюдения (МПСН) и глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), приходящими по каналам вещательного автоматического зависимого наблюдения (АЗН-В). Зона действия НМУ разделена на определённые области – «соты», средние разницы геометрических высот считаются для каждой «соты» отдельно, за определённый промежуток времени. Суть метода адаптивной калибровки систем мониторинга состоит в расчёте корректирующих поправок отдельно по каждой «соте», которые, в свою очередь, будут применяться для коррекции результатов измерений в определённых «сотах», где значения средней разницы геометрических высот между данными МПСН и АЗН-В выходят за пределы, установленные техническим заданием к системам НМУ. Повторением процедуры пересчёта значений средних разниц геометрических высот в «сотах» определяются оптимальные, применяемые для калибровки системы мониторинга значения корректирующих поправок. Таким образом, чем большее количество раз происходит процедура пересчёта, тем более точные значения корректирующих поправок могут быть получены, и как следствие – более репрезентативные результаты измерений.

Ключевые слова: геометрическая высота, корректирующие поправки, воздушное судно, мониторинг, транспортные системы страны, интеллектуальные транспортные системы

Для цитирования: Щербаков Д. Е. Метод адаптивной калибровки систем мониторинга для улучшения точности вычисления геометрической высоты воздушных судов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 43. С. 56–67.

METHOD FOR ADAPTIVE CALIBRATION OF MONITORING SYSTEMS TO IMPROVE THE ACCURACY OF AIRCRAFT GEOMETRIC HEIGHT CALCULATION

D. E. SHCHERBAKOV

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

Abstract. Adaptive calibration for the Height Monitoring Systems HMU is based on the calculation of the average differences in the geometric heights of aircraft crossing the HMU coverage area from multi-position surveillance systems (MLAT) and GNSS arriving via ADS-B channels. The coverage area, in turn, is divided into certain areas – “cells”, the average differences are calculated for each “cell” separately,

for a certain period of time. The essence of the method for adaptive calibration of monitoring systems is to calculate the corrective rates separately for each “cell”, which, in turn, will be used to correct the measurement results in certain “cells”, where the values of the average difference in geometric heights between the MLAT and ADS-B go beyond the established limits by technical task for HMU systems. By repeating the procedure for recalculating the values of the average differences of geometric heights in “cells”, the optimal values of corrective rates are determined. Thus, the more times the recalculation procedure takes place, the more accurate correction values can be obtained, and, as a result, more accurate measurement results.

Keywords: geometric height, corrective rates, aircraft, monitoring, national transport systems, intelligent transport systems

For citation: Shcherbakov D. E. Method for adaptive calibration of monitoring systems to improve the accuracy of aircraft geometric height calculation, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2023, no. 43, pp. 56–67. (In Russ.)

Введение

На совещаниях Координационной группы Региональных мониторинговых агентств (RMACG) обсуждался и был одобрен метод сравнения систем мониторинга на основе результатов оценки погрешностей выдерживания высоты ВС [1, 2]. Метод позволяет сравнить результаты вычислений систем мониторинга, применяющих различные способы определения геометрической высоты ВС. С его помощью было показано, что системы AHMS в Китае, США и России выдают эквивалентные результаты при оценке значения погрешности системы измерения высоты (ASE) [3]. Однако применение этого метода не даёт возможности определить, какие корректирующие действия в случае необходимости следует выполнить, чтобы результаты работы систем мониторинга можно было считать идентичными.

Несмотря на то, что системы AHMS имеют очень широкую зону действия и представляют собой более новые, по сравнению с системами HMU, технические средства мониторинга характеристик выдерживания высоты, такие системы предъявляют дополнительные требования к ВС с точки зрения бортового оборудования. ВС должно иметь на борту оборудование АЗН-В, соответствующее спецификации DO-260В [4]. В такой ситуации системы HMU не теряют свою актуальность, несмотря на несравнимо меньшую зону действия. Преимущество таких систем в том, что они могут выполнять мониторинг характеристик выдерживания высоты ВС без каких-либо дополнительных требований к ВС. В связи с этим использование системы HMU включено в стратегию развития инфраструктуры систем мониторинга для Европейского региона ИКАО до 2030 года [5].

Точность вычисления геометрической высоты является одним из основных факторов, влияющих на результаты определения ASE системами мониторинга. Отечественный и международный опыт эксплуатации показал, что точность вычисления геометрической высоты ВС в системах HMU может изменяться со временем. Как следствие, оборудование для перенастройки и юстировки необходимо периодически выводить из эксплуатации на достаточно продолжительное время.

Современные отечественные системы HMU в транспортных системах страны и интеллектуальных транспортных системах получают информацию о значениях геометрической высоты как от МПСН, которые применяют метод мультилатерации для её определения, так и от ГНСС по каналам АЗН-В. Для оценки ASE применяется геометрическая высота, полученная от МПСН. Наличие информации по каналу АЗН-В позволяет при соблюдении некоторых условий применять её для адаптивной калибровки системы HMU в целях обеспечения требуемой техническим заданием к системам HMU точности.

Общие положения

Будем исходить из следующих положений:

1. Полученные в работах [1, 2] результаты, позволяют предложить использовать данные оценки геометрической высоты ВС, которые поступают по каналу АЗН-В, для калибровки систем НМУ.

2. Системы НМУ и АНМС получают идентичную метеоинформацию и опираются на одни и те же алгоритмы её обработки [6–8].

3. Большинство ВС, пролетающих через зону действия НМУ, имеют оборудование АЗН-В, что позволяет одновременно выполнять мониторинг с применением системы АНМС.

Согласно [7], основным источником ошибок в системе мониторинга НМУ являются ошибки определения геометрической высоты, полученные при применении метода мультилатерации. Практика использования систем мониторинга НМУ показывает, что эти ошибки изменяются во времени. Целью разработки метода адаптивной калибровки систем мониторинга выдерживания высоты НМУ является необходимость гарантировать, что при пролёте через зону действия НМУ ВС, не имеющих оборудования АЗН-В версии 2 (DO-260В), будет обеспечиваться достоверность оценки результатов ASE ВС.

Контроль точности систем мониторинга НМУ при определении геометрической высоты

При контроле точности систем мониторинга оцениваются две характеристики: средняя ошибка ASE и СКО средней ошибки (СКО ASE) [7]. НМУ проводит точечную оценку погрешностей выдерживания высоты ВС с интервалом 1 с в зоне действия системы. На рис. 1 и рис. 2 представлены результаты оценки погрешностей выдерживания высоты, выполняемой системной НМУ, где «Начало» – время начала оценки; «Конец» – время завершения оценки; «Длит.» – общая продолжительность оценки; «ASE» – среднее значение погрешности ASE на участке; «AAD» – среднее значение погрешности AAD (отклонение от заданной абсолютной высоты) на участке; «TVE» – среднее значение погрешности TVE (суммарная ошибка по высоте) на участке; «СКО ASE» – среднее квадратичное отклонение ASE на участке; «СКО г.в.» – среднее квадратичное отклонение геометрической высоты, оцененной методом мультилатерации на участке; «МПСН-АЗНВ» – средняя разность геометрических высот, полученных от МПСН (Нмпсн) и от ГНСС (Назнв). Вычисленные средние оценки погрешностей выдерживания высоты ВС являются результатом оценки этих погрешностей за один пролёт.

Практика показала, что современные технические средства мониторинга легко обеспечивают выполнение установленных для параметра СКО ASE требований. Критическим параметром является средняя ошибка ASE, которая может меняться как по месту, так и во времени [9].

При разработке систем НМУ, внедрённых и применяемых для отечественного воздушного транспорта, для дополнительного контроля точности оценки ASE для ВС, имеющих оборудование АЗН-В стандарта DO260-В, заложена возможность вычисления средней разности между геометрической высотой, вычисленной МПСН и средствами ГНСС в зоне действия НМУ. Такой расчёт проводится при каждом случае мониторинга ВС. Этот параметр показывает, являлись ли условия проведения данной оценки ASE (полёт ВС именно по данной траектории в данное время) приемлемыми. На рис. 1 показан результат вычисления средней разности геометрической высоты между системами МПСН и ГНСС при пролёте ВС, имеющего бортовое оборудование АЗН-В, через зону действия НМУ. Следует обратить внимание на то, что для данного полёта эта средняя разность («МПСН-АЗНВ») имеет положительное значение.

На рис. 2 представлена информация о полёте другого ВС через зону действия НМУ, где средняя разность вычисления геометрической высоты между системами МПСН и ГНСС являлась

уже достаточно значительной, чтобы оказать влияние на итоговый результат, с учётом того, что максимально допустимое значение погрешности ASE составляет 245 футов.

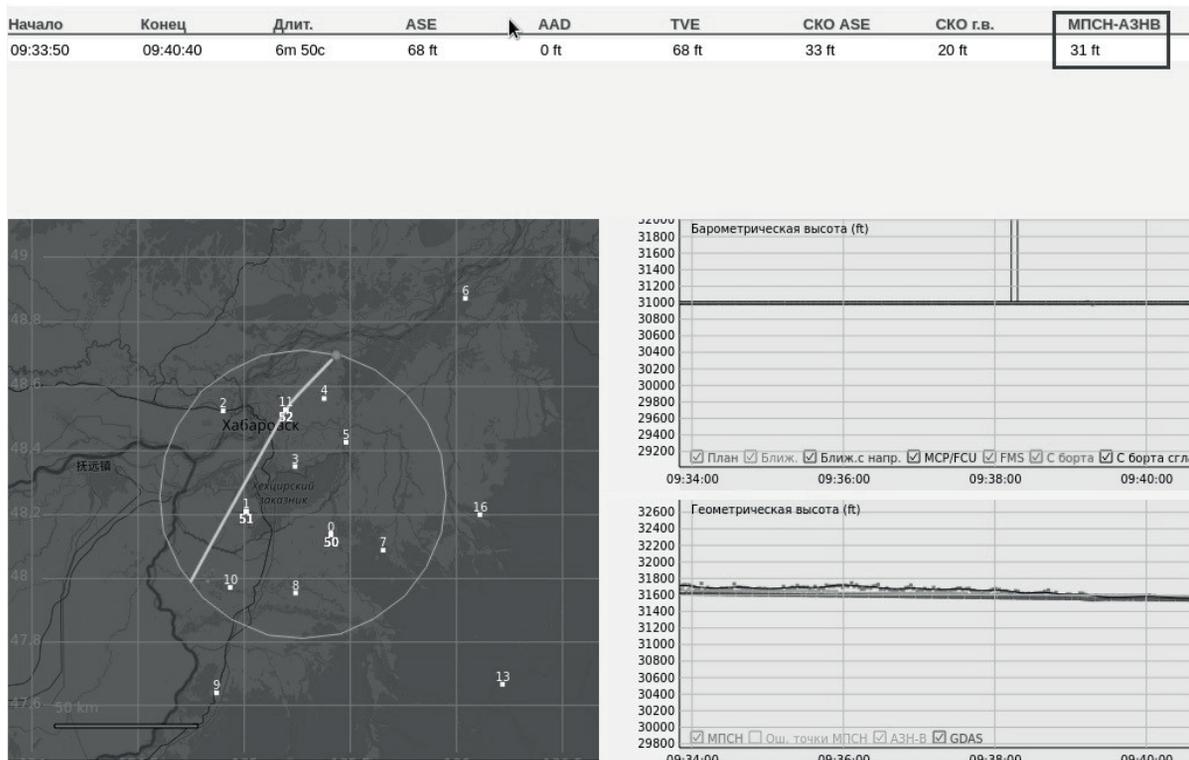


Рис. 1. Результат оценки погрешности определения геометрической высоты системой НМУ для одиночного полёта ВС с положительной разницей Нмпсн–Наэвн

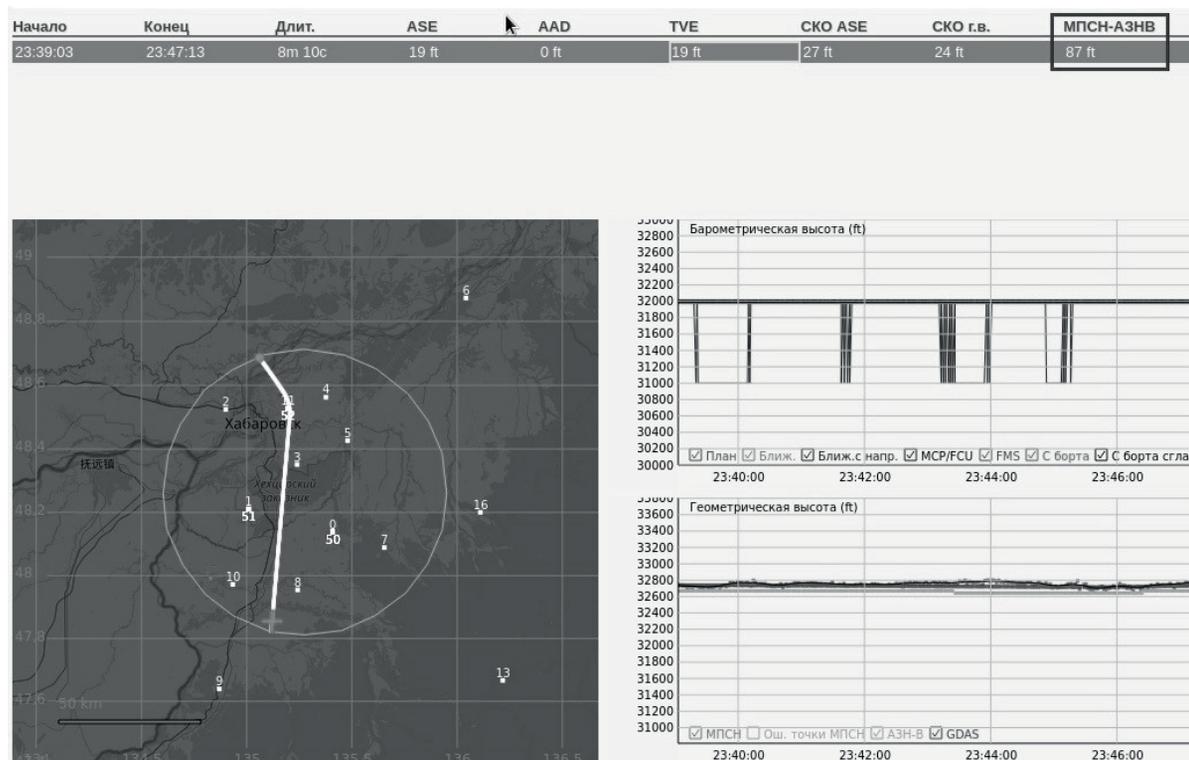


Рис. 2. Результат оценки погрешности определения геометрической высоты системой НМУ для одиночного полёта ВС со значительной разницей Нмпсн–Наэвн

При рассмотрении обобщённой характеристики точности системы НМУ по всей зоне действия можно отметить, что средняя разность между геометрическими высотами, определёнными МПСН и ГНСС (по каналам АЗН-В) для одиночного полёта ВС не может её наглядно отражать. Необходимо учитывать, что:

- разные типы ВС имеют отличающиеся навигационные характеристики;
- траектории ВС при каждом отдельном пролёте различаются;
- ошибки при определении геометрической высоты ВС как средствами МПСН, так и средствами ГНСС имеют стохастический характер.

Поэтому вычисленное среднее значение разностей геометрических высот, привязанное к отдельной траектории ВС, не может являться параметром, который давал бы некоторую интегральную оценку, отражающую наличие систематической ошибки в вычислениях геометрической высоты системами НМУ.

Оценку точности вычислений геометрической высоты системой мониторинга НМУ в зоне её действия предлагается проводить на основе статистик разностей вычислений геометрической высоты средствами МПСН и средствами ГНСС (Нмпсн–Назнв) по отдельным областям зоны действия. Для этого зона действия НМУ разбивается на отдельные «соты», с выбранным шагом сетки по широте и долготе (рис. 3), а сбор информации о точности вычислений (Нмпсн–Назнв) и её обработку следует вести не по траектории полёта одиночного ВС, а по множеству ВС для каждой отдельной выделенной области («соте») в зоне действия НМУ. Количество «сот» зависит от выбранного шага сетки. За анализируемый период времени осуществляется накопление данных в зоне действия НМУ о разностях в вычислениях геометрической высоты по всем ВС, выполнявшим полёты в «соте».

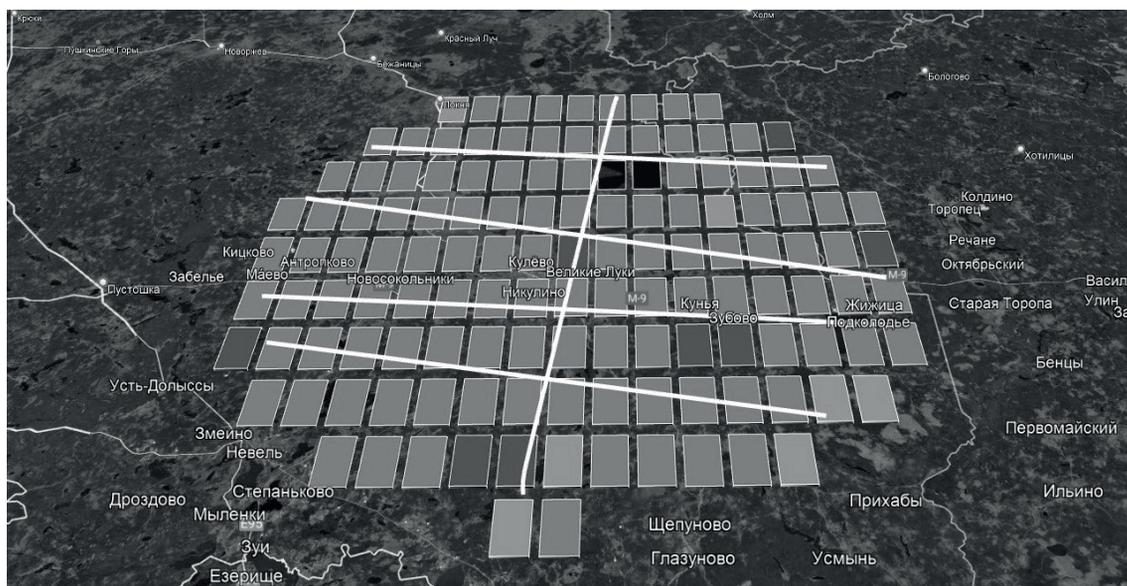


Рис. 3. Разбиение зоны действия НМУ на «соты». В «сотах» тёмно-серого и светло-серого цветов значения средних разниц Нмпсн–Назнв превышают допустимые пределы

Таким образом, для сформированных «сот» имеется набор случайных величин (разностей геометрических высот по множеству пролетевших через эту «соту» ВС), для которых оценивается средняя разность между вычислениями геометрической высоты по МПСН и на основе информации, получаемой АЗН-В.

Для оценки средней погрешности вычисления в «соте» рассчитываются:

- разность геометрических высот между каждым вычислением МПСН и соответствующим вычислением АЗН-В;

- среднее значение разностей геометрических высот в «соте»;
- СКО разностей геометрических высот;
- доверительный интервал среднего значения разностей геометрических высот.

На рис. 4 представлена матрица параметров, вычисляемых для каждой «соты» за время наблюдения, для оценки точности вычисления геометрической высоты станциями МПСН, используемыми системой мониторинга НМУ:

- среднее значение разности между геометрическими высотами, вычисленными МПСН, и соответствующими высотами, пришедшими по каналам АЗН-В (AVG);
- количество точек траекторий, попавших в «соту» (N);
- среднее квадратичное отклонение разностей геометрических высот (STDEV);
- доверительный интервал для средней разницы (interval).

СПК-П-НМУ-Геон.1.01
РАСЧЕТ ДОЛГОТА ШИРОТА Выбор дат Выбор FL Результат Перечитать Треки

Минимальное количество замеров в зоне [1] Диапазон допустимых значений разности высот (НПСН-Назн) >= [20] <= [20]

AVG	29.8	29.9	30	30.1	30.2	30.3	30.4	30.5	30.6	30.7	30.8	30.9	31	31.1	31.2	31.3	31.4
56.8																	
56.7																	
56.6																	
56.5	6.6	0.74	0.92	-3.5	-9.1	1.4	-0.9	-0.78	-7.6	-1.8	-2.3	2.8	-8.7	12	34		
56.4	10	-3.9	-0.85	4	7.4	2.7	5.3	18	23	18	14	8.5	10	12	9	11	12
56.3	-0.38	3.7	10	7.8	5	0.76	-2.7	6.1	16	7.1	4.8	8.5	14	11	9.4	13	17
56.2	22	10	5.1	5.2	2.4	9.7	4.6	4.1	3.5	-1.7	5.9	22	20	9.8	7.5	7.6	8.3
56.1		0.83	1.3	5	-0.085	8.2	10	14	2.5	-0.84	2.1	2.5	3.2	9.7	19	10	
56				13	10	6.9	28	24	14	12	11	-0.13	12	17			
55.9								13	13								
N	29.8	29.9	30	30.1	30.2	30.3	30.4	30.5	30.6	30.7	30.8	30.9	31	31.1	31.2	31.3	31.4
56.8																	
56.7																	
56.6																	
56.5	368	2102	1985	1643	1470	1300	1293	1317	1477	1704	1492	1360	1027	2520	2629	1509	561
56.4	154	247	295	347	694	787	1122	1667	2329	2606	2758	3495	3649	3382	3087	2498	1378
56.3	320	1018	1000	913	892	931	897	832	881	818	986	901	734	904	1160	1567	823
56.2	7	5614	7236	7235	6862	6736	1397	393	464	432	516	746	943	961	991	1037	62
56.1		6	46	130	553	716	6099	7205	7167	7141	7108	7093	6810	6522	2006	14	
56				21	28	30	54	110	84	110	139	150	376	396			
55.9								15	11								
STDEV	29.8	29.9	30	30.1	30.2	30.3	30.4	30.5	30.6	30.7	30.8	30.9	31	31.1	31.2	31.3	31.4
56.8																	
56.7																	
56.6																	
56.5	25.07	26.36	24.27	22.96	21.91	20.8	19.7	23.89	57.26	49.98	38.63	18.19	189.88	20.72	20.95	24.79	33.94
56.4	53.32	12.37	14.67	19.47	21.24	19.49	21.48	20.82	39.75	25.02	23.32	22.59	26.48	24.64	73.54	21.83	22.77
56.3	24.91	21.88	19.13	21.33	20.73	19.01	20.37	20.91	25.25	21.3	21.52	20.9	23.58	23.36	21.14	24.79	
56.2	29.15	26.39	24.69	24.11	22.99	27.73	26.95	21.99	20.96	25.06	25.8	29.02	26.18	25.13	25.12	25.52	27.91
56.1		4.83	18.31	15.46	20.08	30.47	28.88	31.18	25.41	24.69	23.82	25.09	27.55	30.35	32.48	35.46	
56				11.14	11.54	12.98	22.84	28.9	26.23	26.12	29.91	25.94	29.01	32.83			
55.9								22.13	7.34								
interval	29.8	29.9	30	30.1	30.2	30.3	30.4	30.5	30.6	30.7	30.8	30.9	31	31.1	31.2	31.3	31.4
56.8																	
56.7																	
56.6																	
56.5	2.6	0.91	0.7	0.64	0.62	0.59	0.58	0.76	2	1.9	1.7	1.2	1.2	1.3	1.4	1.2	2.8
56.4	8.5	1.6	1.7	2	1.6	1.4	1.3	1	1.6	0.96	0.87	0.75	0.86	0.83	2.6	0.86	1.2
56.3	2.7	1.3	1.2	1.4	1.4	1.2	1.3	1.4	1.7	1.5	1.3	1.4	1.7	1.5	1.3	1	1.7
56.2	22	0.71	0.57	0.56	0.54	0.66	1.4	2.2	1.9	2.4	2.2	2.1	1.7	1.6	1.6	1.6	6.9
56.1		3.9	5.3	2.7	2.2	2.7	2.2	0.72	0.89	0.57	0.55	0.58	0.65	0.74	1.4	1.9	
56				4.8	4.3	4.6	6.1	5.4	5.6	4.9	5	4.2	2.9	3.2			
55.9								11	4.3								

Рис. 4. Матрица параметров, вычисляемых для множества выделенных «сот»

Зададим приемлемый порог для средней разности геометрических высот, вычисляемых средствами МПСН и пришедшими по каналам АЗН-В. Оценка точности системы мониторинга НМУ тогда может быть выполнена следующим образом. Для каждой выделенной подобласти проверяется приемлемость вычисленного среднего значения разностей геометрических высот, то есть не превышает ли абсолютная величина вычисленного среднего значения разностей геометрических высот с учётом его доверительного интервала установленный порог. В случае, когда порог не превышен, принимается решение о том, что внутри рассматриваемой подобласти вычисления геометрической высоты, выполненные двумя системами, являются согласованными.

Для обобщённой оценки точности вычислений геометрической высоты ВС системой мониторинга НМУ в зоне её действия зададим процент «сот», для которых вычисленные абсолютные значения средних разностей геометрических высот не должны превышать приемлемого порога. Накопление статистической информации об ошибках вычисления геометрической высоты систем НМУ проводится за установленный период времени (в настоящее время – 1 месяц).

В случае, если этот процент «сот» меньше установленного значения, принимается решение о том, что система мониторинга НМУ не соответствует требованиям к точности вычисления геометрической высоты и необходимы действия по её корректировке.

Данный метод контроля точности системы НМУ был реализован в Программном комплексе СПК-П-НМУ-GeoH и использован при проведении эксплуатационных испытаний системы НМУ.

Метод адаптивной калибровки систем мониторинга НМУ при вычислении геометрической высоты

Опыт эксплуатации систем мониторинга НМУ показал, что точность этих систем (в том понимании, как это используется в настоящей статье, то есть точность вычисления геометрической высоты) в процессе функционирования меняется. На рис. 5, а–в приведён визуальный ряд – результаты наблюдений в соответствии с описанным выше методом.

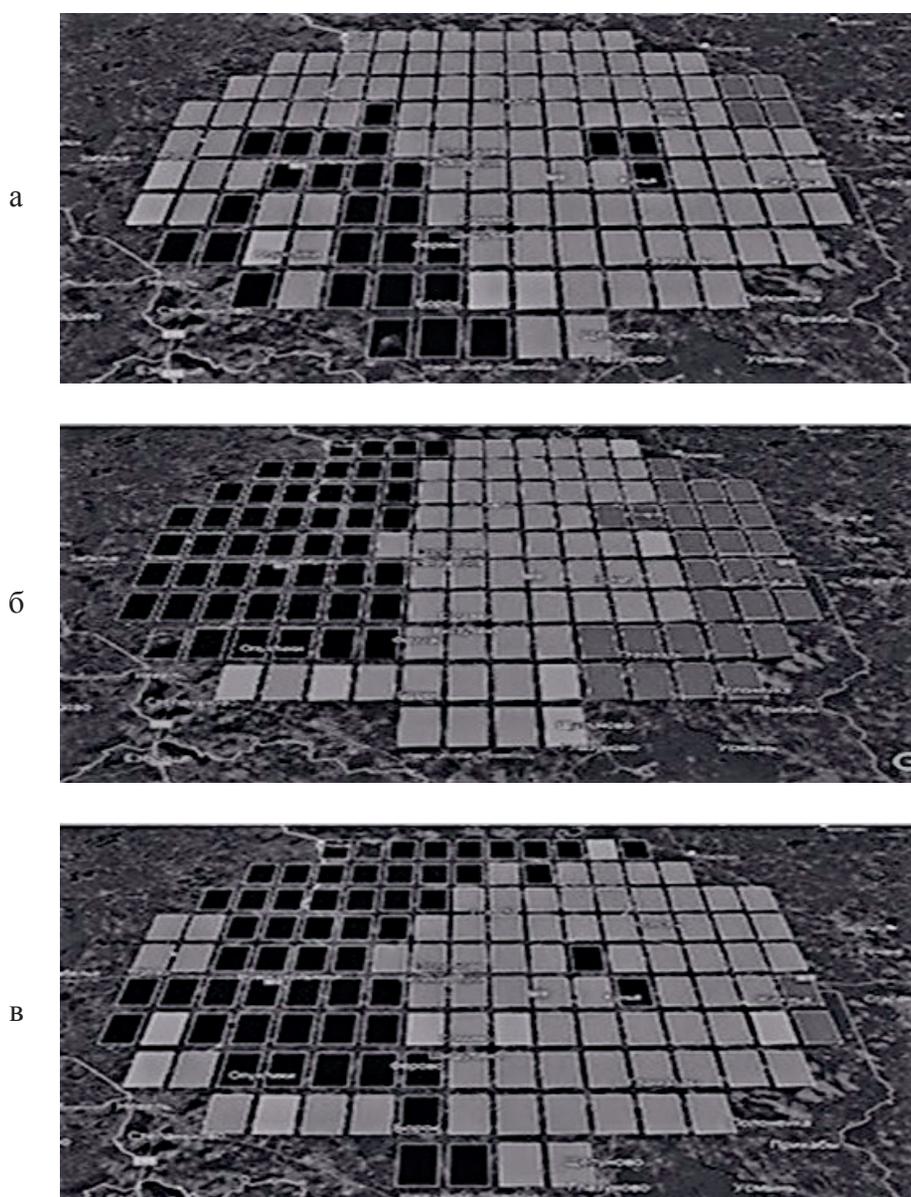


Рис. 5. Результат наблюдений НМУ (Великие Луки): а – август 2021; б – ноябрь 2021; в – февраль 2022. В «сотках», имеющих тёмно-серые и чёрные цвета, значения средних разниц Нмспн–Назнв превышают допустимые пределы

Из рис. 5 следует, что для отдельных «сот» средняя разность может значительно меняться со временем, хотя в отдельные месяцы может наблюдаться и некоторая стабильность характеристик. В целом может меняться и распределение в зоне действия НМУ «сот», в которых точности вычисления геометрической высоты удовлетворяют/не удовлетворяют установленному требованию.

Эксплуатационный опыт также показал, что коррекция станций МПСН, используемых в структуре НМУ, на основе полученных результатов не является тривиальной задачей. Система возможных управленческих воздействий на технические параметры станций МПСН (корректирующих действий) однозначно не связана с предложенной системой оценки точности на основе разбиения на «соты» зоны действия НМУ. Поэтому часто оставалось непонятным, какие изменения настроек станций необходимо выполнить, чтобы точность вычисления геометрической высоты в отдельных «сотах» улучшилась. Возник вопрос: как использовать те данные, которые были накоплены и показали наличие проблем в точности вычисления геометрической высоты?

Метод адаптивной калибровки при вычислении геометрической высоты систем НМУ позволяет корректировать ошибки без изменений технических параметров станций МПСН.

Предлагаемый метод состоит из следующих шагов.

1. Первоначальное накопление статистической информации об ошибках вычисления геометрической высоты систем МПСН в зоне действия НМУ за установленный период времени.

2. Расчёт (перерасчёт) матрицы корректирующих поправок по отдельным «сотах» – средних разностей геометрических высот, вычисленных методом мультилатерации (Нмспн) и на основе данных ГНСС, пришедших по каналам АЗН-В (Назнв).

3. Применение корректирующих поправок для уточнения результатов вычисления геометрической высоты на определённых участках траектории при её прохождении через соответствующие этим участкам «соты».

4. Продолжение сбора статистической информации об ошибках вычисления геометрической высоты систем НМУ.

5. Переход на шаг 2.

В таблице представлены результаты апробации метода калибровки.

Результаты апробации метода

Воздушное судно	Нмспн–Назнв до калибровки	Нмспн–Назнв после калибровки
394A18	–4,002475248	–9,557673092
3С70С1	–2,125307125	–8,390254848
42441E	0,150115473	–1,234823877
424429	–1,104018913	–2,342254243
424491	–6,971223022	–8,350695951
424492	–26,20351759	–27,20385046
4244B4	–4,234482759	–5,540619624
4244B5	–3,926008969	–5,339367762
4244B8	6,670533643	5,68620286
424568	8,09529703	6,56789415
42461D	1,699769053	0,45848853
42461E	0,818181818	–0,3899156

Окончание таблицы

Воздушное судно	Нмспн–Назнв до калибровки	Нмспн–Назнв после калибровки
440081	4,391959799	–2,076436789
461F06	6,809638554	0,412613557
461F4B	17,72257251	11,78168808
4B191B	7,459854015	1,008620177
4D0110	–14,48342541	–5,938401145
4D0115	–13,75271739	–8,830739941
780979	28,4598338	37,02478372
7811A3	10,12849162	18,67423384
7813C2	–5,239010989	3,186003104
781610	12,50417827	21,04408975
781AC5	–1,687845304	6,820776628
868056	–3,863746959	–10,297703
868078	–13,83170732	–20,06960431
869232	3,458128079	–2,1876159
86DA38	19,82531646	18,66859096
86E40E	42,94292804	36,56945654
86E430	27,30379747	20,89240824
86E452	24,22942643	17,83024141
86E800	10,26153846	4,60880609
87304A	25,75125628	20,23895635
873312	38,30456853	32,82005923
899022	10,20478723	9,211747516
899097	27,41343669	26,48798748
899125	8,917989418	8,054814438
A96B80	–35,82142857	–27,49171814
Среднее значение по всему перечню ВС	5,575045489	4,400183459
Среднее значение СКО по всему перечню наблюдаемых ВС	16,60768446	15,76112393

Из таблицы видно, что в результате применения метода адаптивной калибровки, при использовании корректирующих поправок, среднее значение разницы вычисления геометрических высот между системами НМУ и ГНСС сократилось примерно на 23 %, также уменьшилось СКО этих разностей.

В настоящей статье не ставилась задача проработки вопросов обеспечения единства измерений при применении и метрологического обеспечения разработанного автором метода косвенных

измерений. Поэтому в дальнейших исследованиях, с применением универсальных методических подходов, изложенных в [10–13], предполагается обеспечить профильную проработку вопросов, связанных с решением измерительных задач косвенных измерений с применением метода адаптивной калибровки при вычислении геометрической высоты системой НМУ. Это позволит, в том числе, обеспечить выявление и исключение возникновения метрологических рисков негативных ситуаций [14], или их снижение до приемлемого уровня.

Заключение

Опыт показал, что для систем мониторинга НМУ характерно ухудшение точности при вычислении геометрической высоты ВС. Для восстановления точностных характеристик необходимо выполнять временный вывод систем НМУ из эксплуатации и перенастройку оборудования. При этом нет однозначных рекомендаций по корректировке технических параметров систем, а улучшение характеристик выполняется итерационным методом подбора новых значений параметров.

Предложен метод адаптивной калибровки систем мониторинга НМУ, определяющих геометрическую высоту ВС методом мультилатерации, позволяющий улучшать точность систем мониторинга НМУ в процессе их эксплуатации на основе собранных статистических данных при сравнении вычислений геометрической высоты методом мультилатерации и полученной от ГНСС.

Проведённые оценки показали, что использование предложенного метода позволяет сократить среднее значение разностей данных о геометрических высотах примерно на 20 % и уменьшить значение СКО вычисленной системой НМУ геометрической высоты.

Полученные результаты легли в основу предложений по расширению функциональности системы мониторинга НМУ путём программной реализации предложенного метода. ФГУП «Госкорпорация по ОрВД» (владелец систем НМУ) после его рассмотрения одобрило применение метода, включив его в Технические требования к системам НМУ [15].

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников

1. Щербаков Д. Е. Сравнение систем мониторинга на основе результатов измерений погрешностей выдерживания высоты воздушных судов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2020. № 33. С. 128–138.
2. Сравнение систем мониторинга. Шестнадцатое совещание RMACG16, 14–25 июня 2021 г., WP03, RMA Eurasia. URL: <https://portal.icao.int/RMA/RMACG16> (дата обращения: 24.07.2023).
3. Резюмирующий обзор обсуждения шестнадцатого заседания RMACG16, 14–25 июня 2021 г., рабочий документ WP03, представленный председателем группы. URL: <https://portal.icao.int/RMA/RMACG16%20Report/FINAL%20SUMMARY%20OF%20DISCUSSIONS%20RMACGVM16.pdf> (дата обращения: 24.07.2023).
4. Приложение 6 к Конвенции о международной гражданской авиации. Часть 1. Международный коммерческий воздушный транспорт. Самолёты. Ред. 10, 2016. 330 с.
5. Отчёт по первому заседанию Европейской группы планирования авиационных систем, Париж, 2–5 декабря 2021 г. Стратегия развертывания инфраструктуры мониторинга RVSM для Европейского региона ИКАО (2020–2030 гг.). URL: https://portal.icao.int/EASPG/Documents/EASPG03/_EASPG03%20Final%20Report.pdf (дата обращения: 24.07.2023).
6. Терентьев Л. А., Щербаков Е. К. Использование различных метеорологических источников для повышения точности измерений ASE. WP241, Рабочий документ тринадцатого заседания координационной

группы RMA, Сальвадор, Бразилия, 11–15 мая, 2018. URL: <https://portal.icao.int/RMA/RMACG13> (дата обращения: 24.07.2023).

7. ИКАО Doc 9574. Руководство по применению минимума вертикального эшелонирования в 300 м (1000 фут) между ЭП 290 и ЭП 410 включительно. Третье издание. ИКАО. Монреаль, Канада, 2012. 70 с.

8. Мониторинг характеристик выдерживания высоты с помощью ADS-B, WP273, Рабочий документ четырнадцатого совещания координационной группы RMA, FAA USA, Лас-Пальмас, Гран-Канария, 17–21 июня 2019. URL: <https://portal.icao.int/RMA/RMACG14> (дата обращения: 24.07.2023).

9. ИКАО Doc 9937. Эксплуатационные правила и практика для региональных контрольных агентств в отношении применения минимума вертикального эшелонирования в 300 м (1000 фут) между эшелонами полета 290 и 410 включительно. Второе издание. ИКАО. Монреаль, Канада, 2002. 90 с.

10. Богоявленский А. А. Результаты испытаний системы НАСКД-200ПР для регламентного контроля авиационного оборудования вертолётов семейства Ми-8 // Мир измерений. 2022. № 1. С. 24–27.

11. Богоявленский А. А. Результаты испытаний системы НАСКД-200ПР для регламентного контроля авиационного оборудования вертолётов семейства Ми-8 (Окончание. Начало в № 1 за 2022 год) // Мир измерений. 2022. № 2. С. 30–33.

12. Богоявленский А. А., Боков А. Е., Матюхин К. Е. Метрологическое обеспечение эксплуатационных испытаний наземной автоматизированной системы контроля: методология и анализ результатов // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 219(9). С. 137–143.

13. Богоявленский А. А. Роль метрологической деятельности в условиях инновационного развития России // Мир измерений. 2021. № 1. С. 22–26.

14. Богоявленский А. А., Боков А. Е. Постановка задачи разработки методов управления метрологическими рисками негативных ситуаций в авиационной деятельности // Мир измерений. 2013. № 10. С. 3–7. <https://doi.org/10.35400/1813-8667-2013-10-3-7>

15. Научно-методическое сопровождение работ по созданию системы контроля за характеристиками выдерживания высоты воздушными судами // Отчёт ФГУП ГосНИИ ГА по этапу 1.6, Москва. 2023. 62 с.

References

1. Shcherbakov D. E. Comparison of monitoring systems based on the results of measurements of errors in maintaining the height of aircraft, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2020, no. 33, pp. 128–138. (In Russ.)

2. Comparison of monitoring systems. Sixteenth RMACG16 meeting, June 14–25, 2021, WP03, RMA Eurasia, available at: <https://portal.icao.int/RMA/RMACG16> (accessed: 24.07.2023).

3. Summary of Discussions, Sixteenth RMACG16 meeting, June 14–25, 2021, WP03, presented by the Chairperson, available at: <https://portal.icao.int/RMA/RMACG16%20Report/FINAL%20SUMMARY%20OF%20DISCUSSIONS%20RMACGVM16.pdf> (accessed: 24.07.2023).

4. Annex 6 to the International Civil Aviation Convention. Part 1. International commercial air transport. Aircraft, Ed. 10, 2016, 302 p.

5. Report of the first meeting of the European Aviation System Planning Group, Paris, 2–5 December, 2021, Strategy for the Deployment of the RVSM Monitoring Infrastructure for ICAO European Region (2020–2030), available at: https://portal.icao.int/EASPG/Documents/EASPG03/_EASPG03%20Final%20Report.pdf (accessed: 24.07.2023).

6. Terentiev L. A., Shcherbakov E. K. Use of various meteorological sources to improve the accuracy of ASE measurements. WP241, *Working Paper of the Thirteenth Meeting of the RMA Steering Group*, El Salvador, Brazil, 11–15 May, 2018, available at: <https://portal.icao.int/RMA/RMACG13> (accessed: 24.07.2023).

7. ICAO Doc 9574. Manual on a 300 m (1 000 ft) Vertical Separation Minimum Between FL 290 and FL 410 Inclusive, Third Edition, ICAO, Montreal, Canada, 2012. 62 с.

8. ADS-B Height Keeping Performance Monitoring, WP273, Working Paper of the Fourteenth Meeting of the RMA Coordination Group, FAA USA, Las Palmas, Gran Canaria, June 17–21, 2019, available at: <https://portal.icao.int/RMA/RMACG14> (accessed: 24.07.2023).
9. ICAO Doc 9937. Operating Procedures and Practices for Regional Monitoring Agencies in Relation to the Use of a 300 m (1 000 ft) Vertical Separation Minimum Between FL 290 and FL 410 Inclusive, Second Edition, ICAO, Montreal, Canada, 2002. 82 p.
10. Bogoyavlensky A. A. Test results of the NASKD-200-PR system for routine control of aircraft equipment of Mi-8 helicopters, *Measurements World*, 2022, no. 1, pp. 24–27. (In Russ.)
11. Bogoyavlensky A. A. Test results of the NASKD-200-PR system for routine control of aircraft equipment of Mi-8 helicopters (Ending. Beginning at no. 1 for 2022), *Measurements World*, 2022, no. 2, pp. 30–33. (In Russ.)
12. Bogoyavlensky A. A., Bokov A. E., Matyukhin K. E. Metrological support of operational ground-based automated control systems: methodology and analysis of results, *Civil Aviation High Technologies*, 2015, no. 219(9), pp. 137–143. (In Russ.)
13. Bogoyavlensky A. A. The role of metrological activity in the innovative development of Russia, *Measurements World*, 2021, no. 1, pp. 22–26. (In Russ.)
14. Bogoyavlensky A. A., Bokov A. E. Statement of the problem of development of methods of management of metrological risks of negative situations in aviation activities, *The world of measurement*, 2013, no. 10, pp. 3–7. (In Russ.) <https://doi.org/10.35400/1813-8667-2013-10-3-7>
15. Nauchno-metodicheskoe soprovozhdenie rabot po sozdaniyu sistemy kontrolya za kharakteristikami vyderzhivaniya vysoty vozduzhnymi sudami, Otchet FGUP GosNII GA po etapu 1.6, Moscow, 2023, 62 p. (In Russ.)

Информация об авторе

Щербаков Дмитрий Евгеньевич, старший научный сотрудник, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, shcherbakov_de@gosniiga.ru

Author information

Shcherbakov Dmitry E., Senior Researcher, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, shcherbakov_de@gosniiga.ru

Статья поступила в редакцию 12.01.2023; одобрена после рецензирования 28.07.2023; принята к публикации 07.08.2023.
The article was submitted 12.01.2023; approved after reviewing 28.07.2023; accepted for publication 07.08.2023.

Научная статья
УДК 620.171.34

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КРИТЕРИЕВ ПРИ ОЦЕНКЕ ПРОЧНОСТИ КОМПОЗИТНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

М. В. ПАВЛОВ, А. В. ПАНКОВ, А. А. СВИРИДОВ

*Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского,
Жуковский, Московская область, Россия*

Аннотация. В данной статье проведён сравнительный анализ критериев оценки прочности композитного механического соединения на примере односрезного одноболтового соединения. Оценка прочности болтовых соединений является актуальной задачей для элементов конструкции из композиционных материалов в рамках поддержания лётной годности при эксплуатации авиационной техники. Конечно-элементный анализ выполнен в программном комплексе ABAQUS; для оценки прочности в зоне отверстия используется модель характеристических длин Чанга, а для оценки инициации разрушения – критерии Хашина и LaRC05. Результаты исследования сопоставлены с экспериментальными данными. Показано, что применение определённой комбинации критериев позволяет более точно определить моды разрушения для разных расчётных случаев. Эти результаты могут быть полезными для формирования более точных подходов к прогнозированию и оценке прочности механического соединения в полимерных композиционных материалах.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, механические соединения, оценка прочности, критерий разрушения, программный комплекс ABAQUS, LaRC05, эксплуатация авиационной техники

Для цитирования: Павлов М. В., Панков А. В., Свиридов А. А. Исследование эффективности критериев при оценке прочности композитных механических соединений // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 43. С. 68–80.

RESEARCH OF THE EFFICIENCY OF CRITERIA IN ASSESSING THE STRENGTH OF COMPOSITE MECHANICAL JOINTS

M. V. PAVLOV, A. V. PANKOV, A. A. SVIRIDOV

Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovskiy, Moscow Region, Russia

Abstract. This paper considers comparative analysis of the failure criteria for composite mechanically fastened joints e.g. single-shear one-piece specimen. Evaluation of the strength of bolted joints is an urgent task for structural elements made of composite materials in the framework of maintaining airworthiness during the operation of aviation structures. Finite element analysis (FEA) was performed in ABAQUS software package, in order to assess joint failure FEA model combine Chang characteristic curve model and initiation criteria Hashin and LaRC05 for comparison. All FEA results were compared to experimental data. It is shown that the use of this possibility allows to more accurately determine the problems for different design cases. These results can be useful for developing more accurate approaches to predicting and evaluating the strength of a mechanical joint in polymer composite materials.

Keywords: composites, mechanically fastened joints, failure criteria, FEA, ABAQUS, LaRC05, operation of aircraft

For citation: Pavlov M. V., Pankov A. V., Sviridov A. A. Research of the efficiency of criteria in assessing the strength of composite mechanical joints, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2023, no. 43, pp. 68–80. (In Russ.)

Введение

В настоящее время композиционные материалы (композиты) находят всё более масштабное применение в основных силовых элементах конструкции летательных аппаратов, в частности в виде механических соединений, как композитов с композитом, так и композитов с металлами. По своему строению полимерный композиционный материал (ПКМ) представляет собой многокомпонентный материал из двух или более компонентов, в котором матрица выполняет функцию связующего между слоями армирующего наполнителя (волокна).

Основным типом механических соединений, которые применяются при изготовлении авиационной техники с большой долей композиционных материалов в основных силовых элементах конструкции, являются болтовые соединения, поскольку из-за чувствительности композиционных материалов к ударным повреждениям заклёпочные соединения ограничены в применении. При эксплуатации авиационной техники с основными силовыми элементами из композитов важным вопросом является подтверждение прочности выполняемых нетиповых ремонтов. Как правило, ремонт представляет из себя установку металлической накладке, соединённой болтами с композитной частью. Такого типа соединения, наряду с достаточно простым процессом сборки/разборки, также обладают низкой стоимостью по сравнению с другими. Однако, по сравнению с соединениями для изотропных материалов, анализировать такие соединения в конструкциях из ПКМ сложнее из-за характерной анизотропии свойств.

В целом разрушения болтовых соединений в ПКМ могут происходить по трём основным модам: разрыв по нетто-сечению, срез и смятие, а также по их комбинации. Из-за характерных особенностей разрушения эти моды можно достаточно просто определить по диаграмме нагрузка-перемещение, что наглядно показано на рис 1.

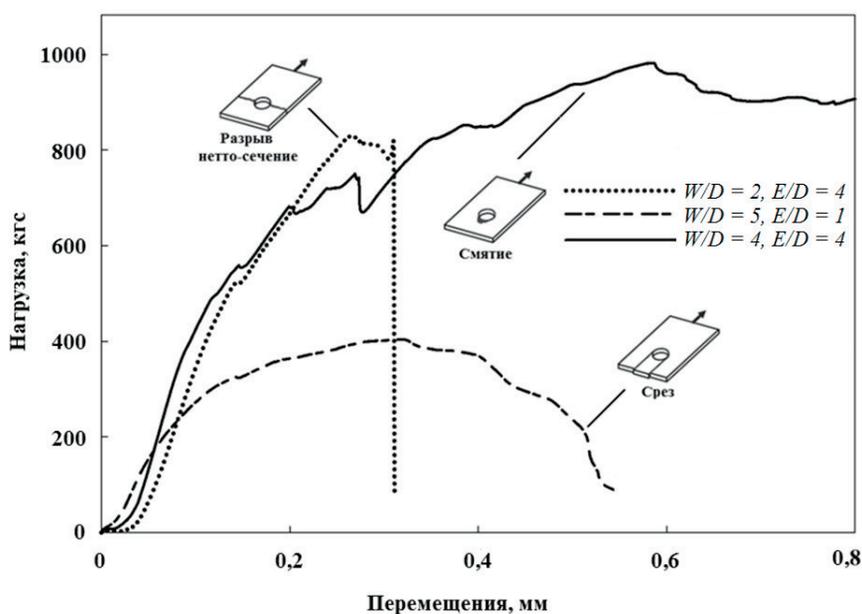


Рис. 1. Диаграмма зависимости нагрузка-перемещение для разных мод разрушения

Первая часть кривой нагрузка-перемещение для трёх образцов с разными геометрическими параметрами (W/D – отношение ширины образца к диаметру отверстия, E/D – отношение расстояния от края отверстия до ближайшей грани, перпендикулярной к нагрузке, к диаметру) имеет линейный вид, после чего один из образцов ($W/D=2$ и $E/D=4$) внезапно разрушается по нетто-сечению, о чём свидетельствует резкое падение нагрузки. У другого образца с геометрией $W/D=5$ и $E/D=1$ наблюдается также достаточно резкое снижение нагрузки, что приводит к другому типу разрушения – от среза. Разрушения по нетто-сечению и срезу являются катастрофическими, так как после достижения максимума нагрузка резко снижается до нулевого уровня, эти разрушения являются следствием высоких напряжений растяжения и сдвига. Третий образец разрушается по смятию, данный тип разрушения характеризуется тем, что образец продолжает удерживать нагрузку при значительных перемещениях. Этот тип разрушения является наиболее «желательным» для конструкции из ПКМ, так как происходит постепенно. Исходя из такого поведения ПКМ, болтовые соединения в конструкциях следует проектировать на смятие.

Механика разрушения композита весьма сложна и до конца не изучена. В настоящее время существует множество подходов к оценке прочности ПКМ. В данной работе проведён анализ односрезного одноболтового соединения с использованием разных критериев и их комбинаций.

Критерии разрушения

Стандартные модели разрушения соединений. Для создания и отработки методик прогнозирования прочности как правило используются элементарные образцы в виде односрезного одноболтового соединения.

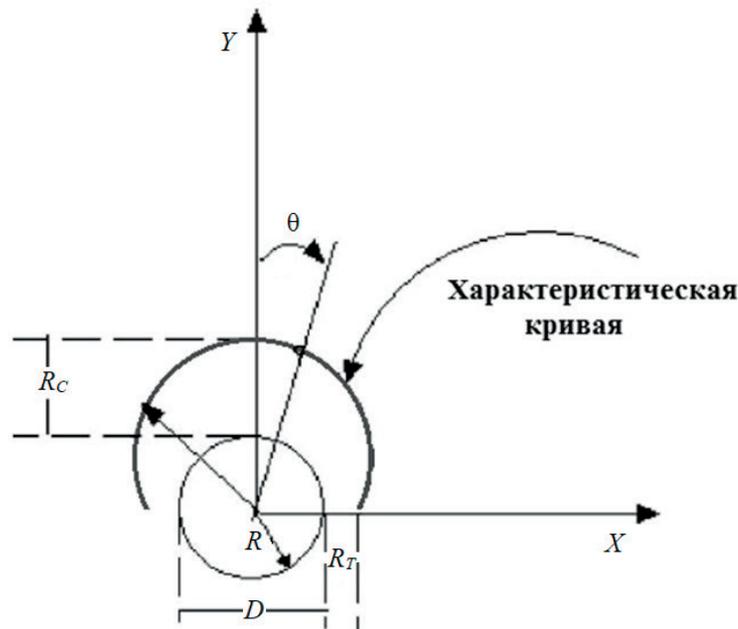


Рис. 2. Характеристическая кривая для композитной пластины с отверстием

При нагружении композитной пластины через штифт или болт (рис. 2) зона вокруг крепёжного отверстия испытывает высокие растягивающие напряжения по краям (вдоль оси X), в то время как передняя часть отверстия (вдоль оси Y) испытывает сжимающие напряжения. Кроме того, по мере увеличения прикладываемой нагрузки и деформации, контактная поверхность между пластиной и штифтом (болтом) меняется. Для оценки прочности композитных пластин с отверстием Уитни и Ньюмер [1] представили теоретическое предположение о том, что разрушение может оцениваться на основе характерного размера: разрушение происходит,

когда напряжение на характерном расстоянии от края отверстия достигает предела прочности для материала без надреза. В дальнейшем эта гипотеза была улучшена Чангом и др. [2]. Выражение для характеристической кривой Чанга может быть записано следующим образом:

$$r_C(\theta) = R + R_T + (R_C - R_T)\cos\theta, \tag{1}$$

где R – радиус отверстия; R_T и R_C являются характеристическими длинами для растяжения и сжатия соответственно, а угол θ варьируется в диапазоне значений от $-\pi/2$ до $\pi/2$ (см. рис. 2). Параметры R_T и R_C оцениваются для пластины с отверстием при растяжении и заполненным отверстием для сжатия.

Таким образом, для построения характеристической кривой необходимо сначала определить два параметра характеристических длин R_T и R_C , которые получают из экспериментов на сжатие и растяжение с заполненным и незаполненным отверстием. Если эти параметры известны, предполагаемая характеристическая кривая, соединяющая характеристические длины для сжатия и растяжения, считается найденной. Разрушение соединения оценивается не по краю отверстия крепежа, а по характеристической кривой. В этом методе соединение считается разрушенным, когда напряжения или комбинация напряжений превышают заданное значение в любом из слоёв композита вдоль характеристической кривой.

Концентрации максимальных напряжений и угол θ_f приложения силы нагружения определяют моду разрушения (рис. 3):

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq \theta_f \leq 15^\circ & - \text{Смятие} \\ 30^\circ \leq \theta_f \leq 60^\circ & - \text{Срез} \\ 75^\circ \leq \theta_f \leq 90^\circ & - \text{Разрыв по нетто-сечению} \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

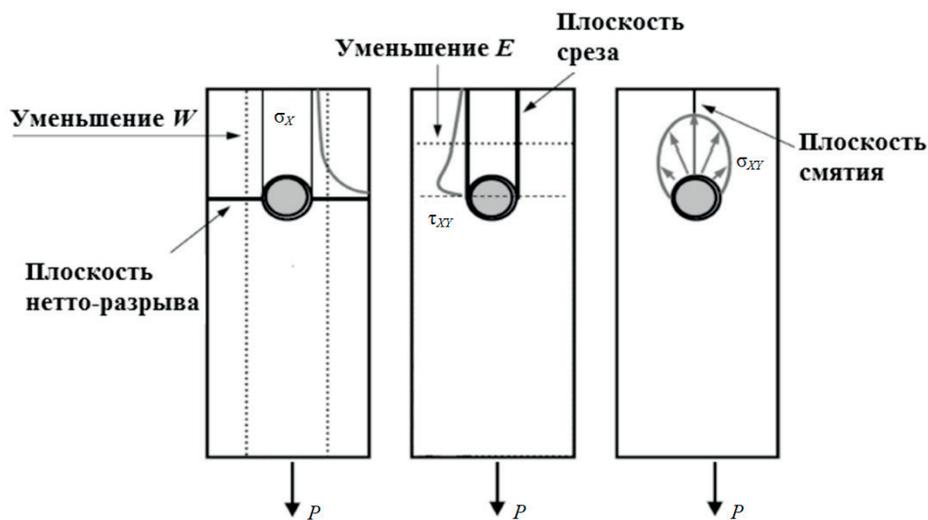


Рис. 3. Три типа разрушения образцов с болтовыми соединениями

Как указано ранее, разрушения образцов при воздействии реакции опоры (P) по нетто-сечению и срезу являются катастрофическими, так как представляют собой результат высоких напряжений растяжения (σ_x) и сдвига (τ_{xy}). Разрушение смятием ПКМ является локально-прогрессирующим повреждением, связанным со сжатием материала в контактной зоне под действием напряжений σ_{xy} . Для первых двух типов разрушения путём варьирования параметров геометрии W и E для конкретной толщины пластины можно изменить тип разрушения, как показано на рис 3.

Одним из первых критериев для оценки разрушения по характеристической кривой был критерий, предложенный Yamada [3], основанный на предположении, что непосредственно перед разрушением в слое композита произошло образование трещины вдоль армирующего наполнителя (волокна). Критерий может быть записан следующим образом:

$$\left(\frac{\sigma_X}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{XY}}{S_C}\right)^2 = e^2 \begin{cases} e < 1 \text{ нет разрушения} \\ e \geq 1 \text{ разрушение} \end{cases}, \quad (3)$$

где σ_X и σ_{XY} – продольные и сдвиговые напряжения в слое, X – предел прочности слоя в продольном направлении, S_C – предел прочности на сдвиг.

В работах [4–6] при моделировании схожей задачи использовались различные критерии для определения вида разрушения композитного соединения; модели включали такие важные параметры расчёта как нелинейность, критерии накопления повреждений и деградации повреждённого материала для анализа перераспределений. Однако, несмотря на эти преимущества, в этих моделях сделано допущение о плосконапряжённом состоянии в ПКМ, таким образом, в работах [4–6] не учитывается влияние расслоений и повреждений в 3-м направлении, которые играют ключевую роль в разрушении ПКМ и должны быть приняты во внимание.

Выбор критерия разрушения. Критерий LaRC05 представляет собой трёхмерную модель [7, 8]. Данный критерий основан на концепции отдельного разрушения матрицы и волокон и использует принцип плоскостей разрушения для разрушения матрицы и волокна. При рассмотрении сжатия волокон возможно несколько вариантов разрушения от волнообразного перегиба волокон при локальной потере устойчивости в одном направлении – так называемый излом (kinking) при $\sigma_{11} \leq -X_C/2$ или расщепление (splitting) при $\sigma_{11} > -X_C/2$, где σ_{11} – напряжения, действующие в этом направлении; X_C – прочность волокна на сжатие.

Критерий рассматривает четыре разных механизма инициации повреждения: растяжение волокна, растрескивание матрицы, излом волокна и расщепление волокна.

Механизм разрушения волокна (F_f^{tens}) основан на критерии максимального напряжения ($\sigma_{11} \geq 0$):

$$F_f^{tens} = \frac{\sigma_{11}}{X_T}, \quad (4)$$

где X_T – прочность волокна на растяжение.

Механизм растрескивания матрицы (F_m^{crack}) является модифицированной версией критерия Мора – Кулона [9]:

$$F_m^{crack} = \sqrt{\left(\frac{\tau_T}{S_T - \eta_T \sigma_N}\right)^2 + \left(\frac{\tau_L}{S_L - \eta_L \sigma_N}\right)^2 + \left(\frac{\langle \sigma_N \rangle_+}{Y_T}\right)^2}, \quad (5)$$

где Y_T – прочность матрицы на растяжение, S_L и S_T – прочность при продольном сдвиге (плоскость 1-2, обозначена на рис 4, а) и прочность при межслоевом сдвиге (плоскость 2-3, рис 4, а), τ_T и τ_L – поперечные и продольные компоненты сдвига в плоскости разрушения матрицы, σ_N – напряжение по нормали плоскости разрушения матрицы (рис. 4, б), η_T и η_L – коэффициенты продольного и поперечного сдвига.

Обозначив индексами напряжения, действующие в направлениях соответствующих плоскостей (рис. 4, а), запишем

$$\left. \begin{aligned} \sigma_N &= \sigma_{22} \cos^2 \alpha + \sigma_{33} \sin^2 \alpha + \sin(2\alpha) \\ \tau_T &= \frac{1}{2}(\sigma_{33} - \sigma_{22}) \sin(2\alpha) + \sigma_{23} \cos(2\alpha) \\ \tau_L &= \sigma_{12} \cos \alpha + \sigma_{13} \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

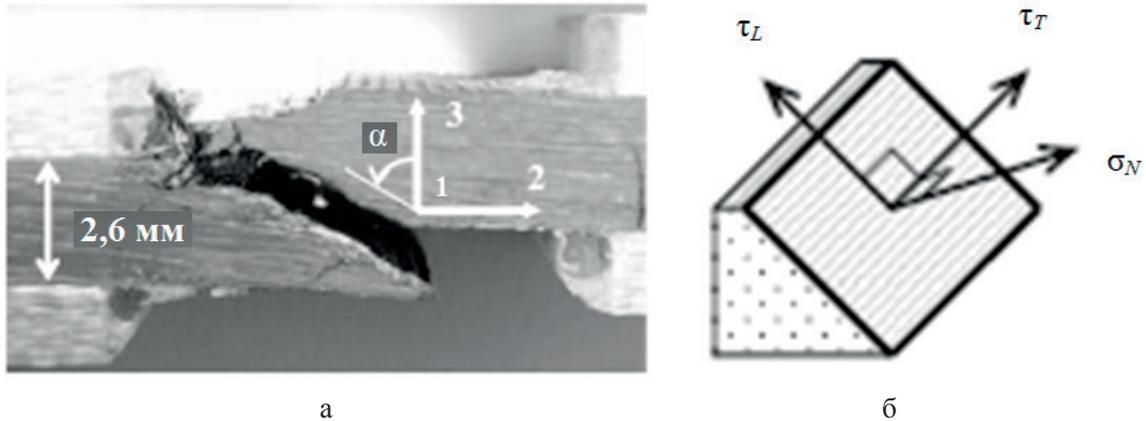


Рис. 4. Компоненты напряжений, действующих в плоскости разрушения матрицы

Угол α представляет собой угол плоскости разрушения матрицы, при котором значение F_m^{crack} является максимальным. Исследования [8–10] показали, что угол плоскости разрушения матрицы для композитов на основе стеклянных и углеволоконных ПКМ находится в пределах $51^\circ \leq \alpha \leq 55^\circ$.

Выполнение критерия LaRC05 влияет только на инициацию повреждения в ПКМ, следовательно, он может быть использован как для оценки склонности материала к повреждению, так и для моделирования прогрессивного повреждения при расширении этого критерия.

Описание модели и сравнение критериев разрушения

Для нелинейного анализа напряжённого состояния болтового соединения авторами настоящей статьи использовалось ПО ABAQUS совместно с моделью характеристической кривой Чанга и критерием LaRC05 для анализа инициализации разрушения вдоль характеристической кривой, а также критерий Хашина для сравнения результатов. В зоне между образцом и металлическим крепёжным элементом был задан контакт с коэффициентом трения. Для учёта влияния момента затяжки на крепёжный элемент добавлена осевая сила. Образец из ПКМ и крепёжный элемент были смоделированы элементами типа «solid» C3D8I. Сила прикладывалась к образцу как равномерно распределённая нагрузка. Схема конечно-элементной модели болтового соединения показана на рис. 5 и рис. 6.

Для расчётной модели был проведён анализ устойчивости решения путём варьирования размера элемента. Размер элемента изменялся в зоне характеристической кривой Чанга или в контактной зоне, общий размер элемента и плотность сетки оставались неизменными (рис. 7).

Размер элемента должен быть выбран так, чтобы модель показывала приемлемые результаты расчёта с меньшей затратой времени на вычисление (табл. 1). Данные табл. 1 показывают, что с изменением размера элемента сила реакции опоры также меняется. Это можно объяснить тем, что с уменьшением размера элемента увеличивается плотность конечно-элементных



Рис. 5. Схема конечно-элементной модели болтового соединения

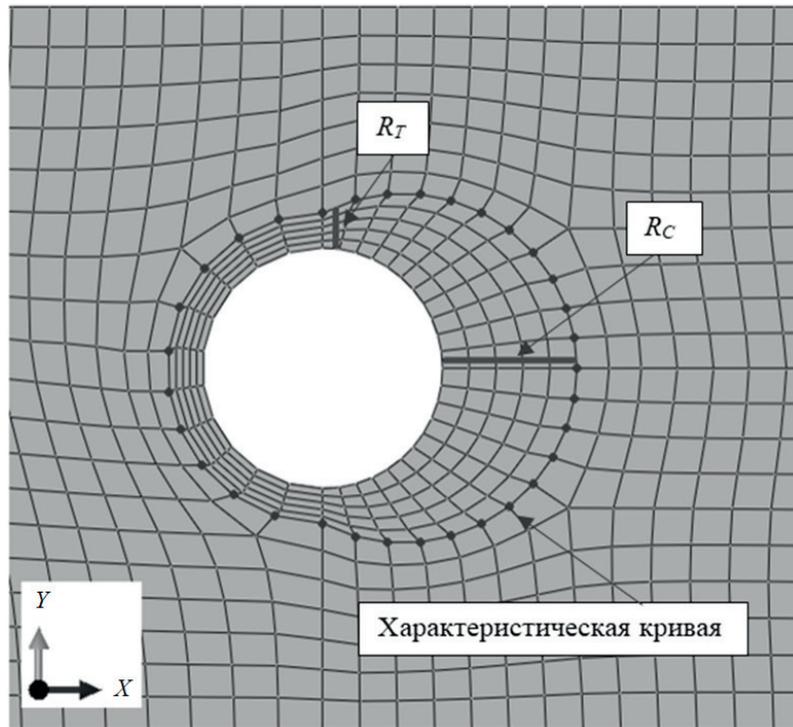


Рис. 6. Конечно-элементная сетка в контактной зоне с обозначением характеристических длин на характеристической кривой

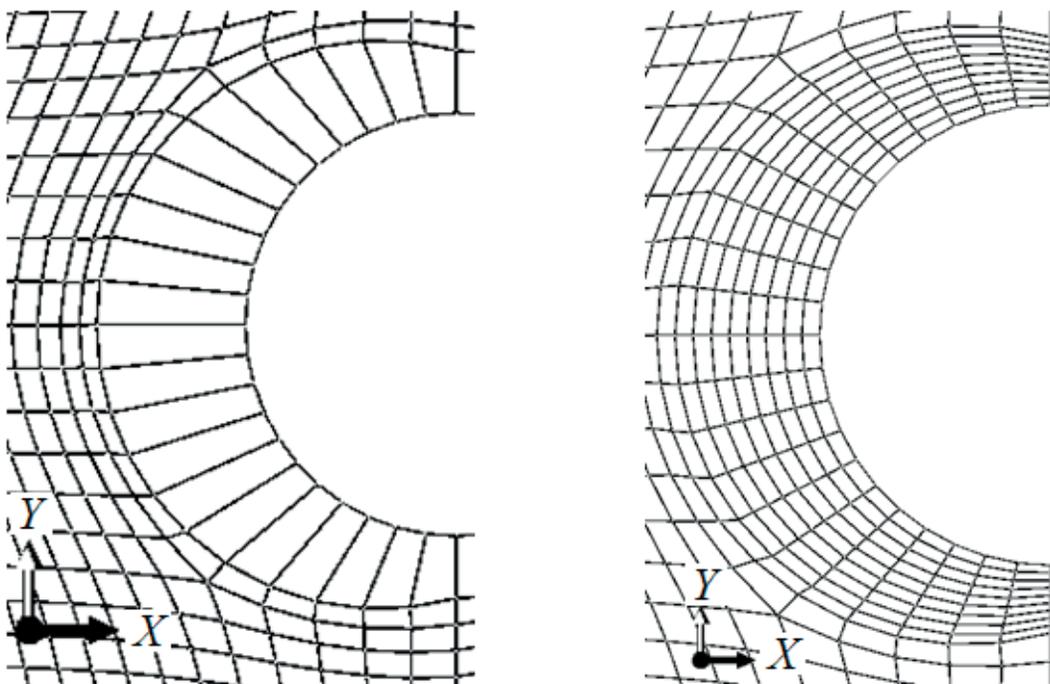


Рис. 7. Варьирование размера элемента внутри зоны характеристической кривой

узлов на единицу площади или на единицу объёма, что более точно отображает напряжения и деформации, однако вместе с этим также увеличивается и время расчёта. Результаты для крайних моделей можно отбросить, так как модель с самой крупной сеткой 1 показывает слишком малые значения реакции опоры, а модель 9 показывает одинаковые значения по напряжениям с моделью с 7-ю элементами.

Таблица 1

Варьирование размера элемента и устойчивость решения МКЭ

Количество элементов по размеру R_T	Размер элемента, мм	Сила реакции опоры, кгс	Перемещение, мм	Напряжения, кгс/мм ²	Время расчёта, с
1	0,938	921	0,434	123,1	520
3	0,312	940	0,451	139,4	600
5	0,187	954	0,457	145,6	620
7	0,134	954	0,456	153,9	720
9	0,104	965	0,462	153,8	860

Разброс оставшихся трёх моделей (3, 5 и 7 элементов) по силе реакции опоры составляет 1,47 %, по напряжениям около 9 % и 1,3 % по перемещениям. Эти значения представляют допустимую точность для расчётов. Исходя из этого, была выбрана модель 5 с размером элемента 0,187 мм, так как она представляет среднее значение по всем параметрам и имеет наименьший разброс по силе реакции опоры, что является важным фактором при проведении расчётов.

Помимо этого, был проведён анализ влияния размера элемента по окружности (рис. 8).

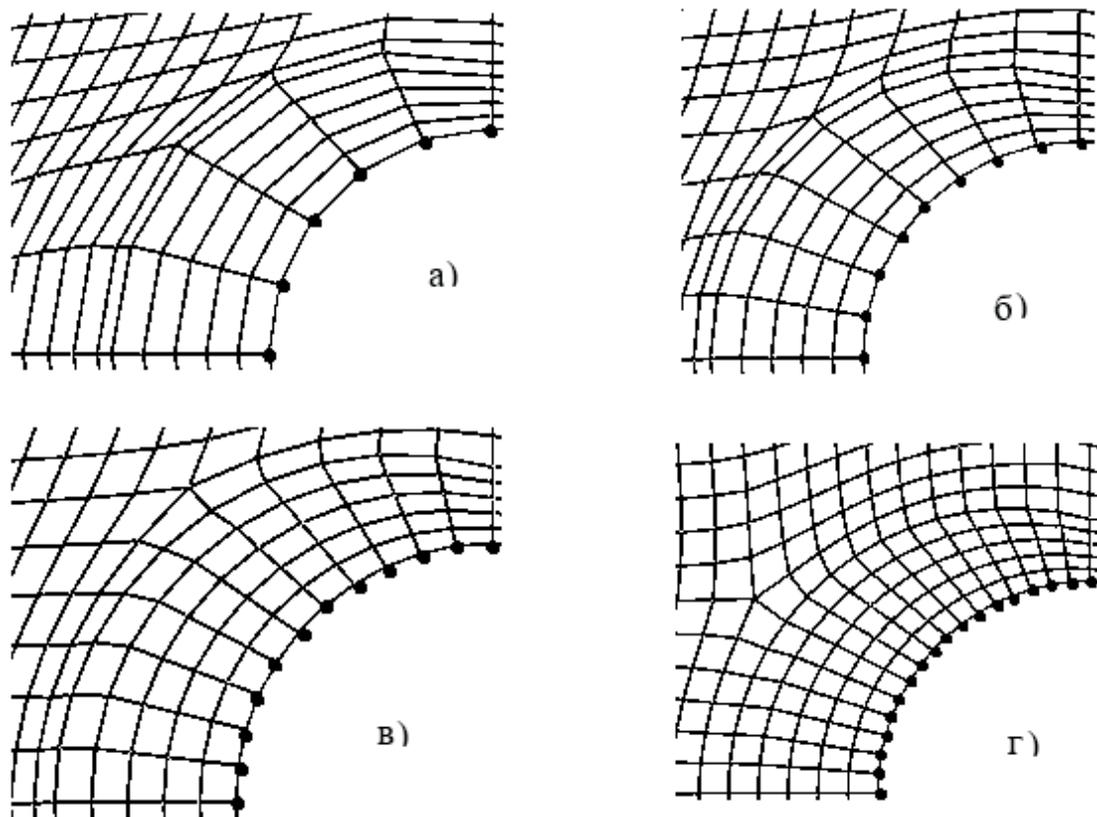


Рис. 8. Варьирование количества элементов по окружности в контактной области:
а) 12 элементов, б) 18 элементов, в) 24 элемента, г) 36 элементов

На рис. 9 представлено сравнение моделей рис. 8, а)–г) в виде графика. Разница по напряжениям на характеристической кривой между моделями не превышает 1,9 %, что можно объяснить тем, что характеристическая кривая находится на определённом расстоянии от отверстия (концентратора).

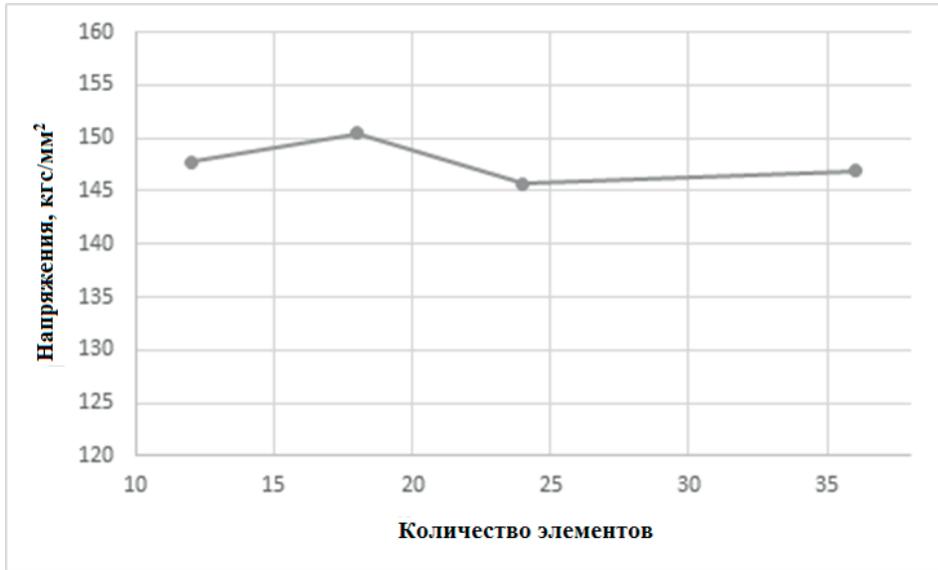


Рис. 9. Диаграмма зависимости напряжений от количества элементов

Механические свойства композиционного материала Т300/1034 соответствовали [4, табл. 2] механическим свойствам материала крепёжного элемента [4, табл. 3]. В табл. 4 представлены результаты эксперимента, полученные в [4]. Значения разрушающей нагрузки F^{EXP} указаны на рис. 10–12 при сравнении с результатами расчётов для критериев LaRC05 и Хашина.

Таблица 2

Механические свойства композиционного материала Т300/1034 [4]

E_{11} , [кгс/мм ²]	E_{22} , [кгс/мм ²]	G_{12} , [кгс/мм ²]	μ_{12}	$\pm\sigma_{11C}$, [кгс/мм ²]	$\pm\sigma_{22C}$, [кгс/мм ²]	τ_{12} , [кгс/мм ²]	t , [мм]
14975	1195	630	0,30	176	14,07	13,66	0,139

Таблица 3

Механические свойства материала крепёжного элемента [4]

Модуль Юнга, [кгс/мм ²]	Коэффициент Пуассона	Статический коэффициент трения
21414	0,29	0,25

Таблица 4

Значения разрушающих нагрузок F^{EXP} , полученных в ходе эксперимента [4]

№ расчётного случая	Укладка $[0/(\pm 45)_3/90_3]_S$							F^{EXP} , [кгс]	Вид разрушения*
	d , [мм]	e , [мм]	w , [мм]	L , [мм]	R_T , [мм]	R_C , [мм]			
1	3,175	9,525	9,525	46	0,457	1,778	578	N-T	
2	6,35	19,05	19,05	93	0,938	2,245	1054	N-T	
3	6,35	19,05	31,75	93	1,166	2,395	1336	B	

* (N-T) – разрыв по нетто-сечению, (B) – смятие

Авторами настоящей статьи проведено машинное сравнение выполнения критериев LaRC05 и Хашина на характеристической кривой для разных расчётных случаев (табл. 4).

На рис. 10–12 представлены изображения образцов и диаграммы зависимости нагрузка-перемещение для разных расчётных случаев. На диаграммах отмечены точки выполнения критериев (треугольник – критерий LaRC05, круг – критерий Хашина, прямоугольник – данные, полученные в эксперименте [4]).

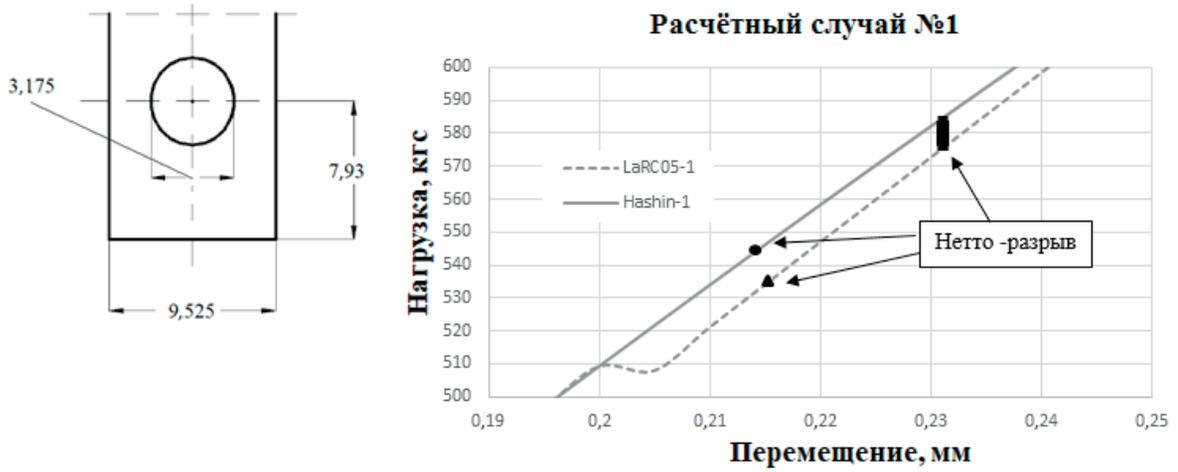


Рис. 10. Расчётный случай № 1

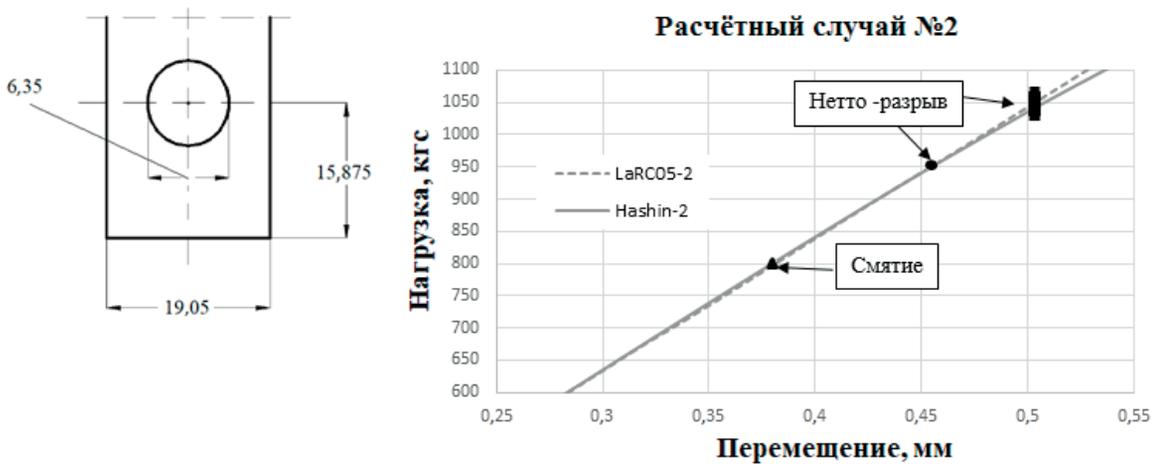


Рис. 11. Расчётный случай № 2

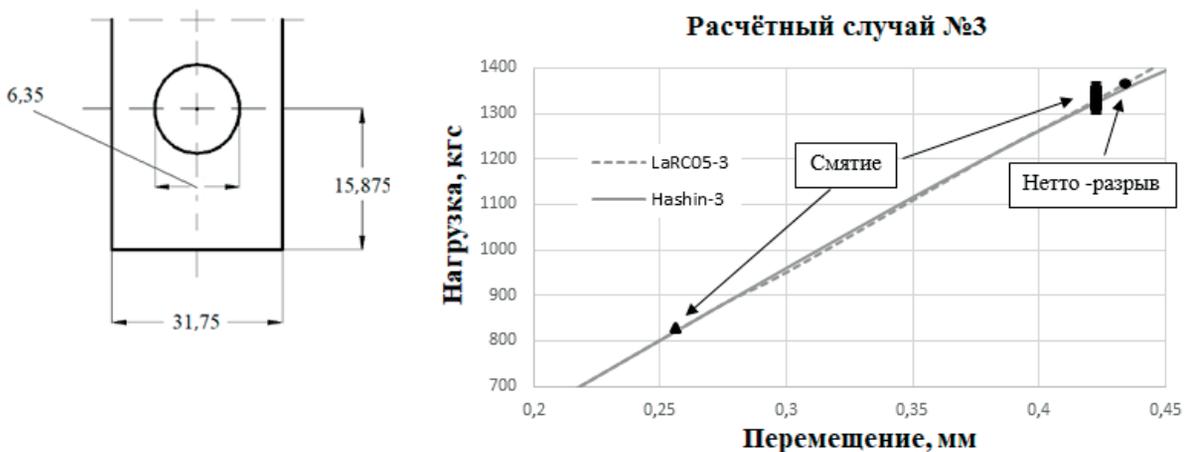


Рис. 12. Расчётный случай № 3

Изучив результаты расчёта и сопоставив их с результатами эксперимента [4], можно сделать следующие выводы:

при вводе одинаковых свойств материала в абсолютно одинаковые модели инициация повреждения по критерию LaRC05 происходит гораздо раньше, чем по критерию Хашина, при этом критерий LaRC05 показал разные виды разрушения болтового соединения для разных расчётных случаев;

критерий Хашина для всех расчётных случаев показал один и тот же вид разрушения, в расчётном случае № 3 инициация повреждения произошла позднее, чем в эксперименте, мода инициации не соответствует данным эксперимента.

Если сделать предположение, что экспериментальные данные [11, 12] приведены для эквивалентных максимальных напряжений, а не для первых главных, то критерий LaRC05 показал очень хорошие результаты сходимости: для первого расчётного случая расхождение в 7,5 %, для второго и третьего – раннюю инициацию повреждения и дальнейшее прогрессирующее разрушение ПКМ от смятия.

Заключение

Оценка статической прочности болтовых соединений композитных элементов является необходимым условием обеспечения прочности летательных аппаратов. В работе показано, что критерий LaRC05 по сравнению с критерием Хашина показал более раннее инициирование повреждения, а также позволил определить моды разрушения для разных расчётных случаев. В качестве верификации расчётов использовались экспериментальные данные, опубликованные в открытых источниках. Таким образом, способ оценки, основанный на критерии LaRC05, может применяться при проектировании ремонтов в рамках эксплуатации авиационной техники.

Дальнейшее развитие исследований в данном направлении заключается в разработке и добавлении модели прогрессивного разрушения композиционного материала и учёта расслоений. Помимо этого, следует провести полный цикл расчётно-экспериментального исследования с получением модели материала и экспериментальным определением характеристических длин R_T и R_C для конкретного материала.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников

1. Whitney J. M., Nuismer R. J. Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations. *Journal of Composite Materials*, 1974, no. 8, pp. 253–265.
2. Chang F. K., Scott R. A., Springer G. S. Strength of mechanically fastened composite joints. *Journal of Composite Materials*, 1982, no. 16, pp. 470–494.
3. Yamada S. E. and Sun C.T. Analysis of laminate strength and its distribution. *Journal of Composite Materials*, 1978, no. 12, pp. 275–284.
4. Ilić I., Petrović Z., Maksimović M. Computation Method in Failure Analysis of Mechanically Fastened Joints at Layered Composites. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, vol. 58, no. 9, pp. 553–559.
5. Xiao Yi, Ishikawa T. Bearing strength and failure behavior of bolted composite joints. *Composites Science and Technology*, 2005, no. 65, pp. 1032–1043.
6. Глебова М. А., Гришин В. И., Гусева Н. В. Исследование видов разрушения болтовых соединений слоистых композитов // Учёные записки ЦАГИ. 2022. Т. LIII. № 1. С. 66–74.
7. Pinho S. T., Iannucci L., Robinson P. Physically-based failure models and criteria for laminated fibre-reinforced composites with emphasis on fibre kinking: Part I: Development. *Composites Applied Science and Manufacturing*, 2006, vol. 37, no. 1, pp. 63–73.

8. Pinho S. T., Davila C. G., Camanho P. P., et al. *Failure models and criteria for frp under in-plane or three-dimensional stress states including shear non-linearity*. NASA Langley Research Center, Hampton, 2005, NASA/TM-2005-213530, VA 2368, 69 p.
9. Abaqus Users Manual, Version 6.12, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI.
10. Davila C. G., Camanho P. R. and Rose C. A. Failure criteria for FRP laminates. *Journal of Composite Materials*, 2005, vol. 39, no. 4, pp. 323–345.
11. Khudhayer J. Jadee, A. R. Orthman. The effect of defence hole system on the failure load and bearing strength of GFRP bolted joint. *American journal of mechanical engineering*, 2015, vol. 3, no. 4, pp. 135–141.
12. Maikuma H., Kobomura K. Bearing strength and damage progress for PAN-based and pitch-based carbon fiber composites. *Journal of Composite Materials*, 1993, vol. 27, no. 18, pp. 1739–1761. <https://doi.org/10.1177/002199839302701803>

References

1. Whitney J. M., Nuismer R. J. Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations. *Journal of Composite Materials*, 1974, no. 8, pp. 253–265.
2. Chang F. K., Scott R. A., Springer G. S. Strength of mechanically fastened composite joints. *Journal of Composite Materials*, 1982, no. 16, pp. 470–494.
3. Yamada S. E. and Sun CT. Analysis of laminate strength and its distribution. *Journal of Composite Materials*, 1978, no. 12, pp. 275–284.
4. Ilić I., Petrovic Z., Maksimović M. Computation Method in Failure Analysis of Mechanically Fastened Joints at Layered Composites. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, vol. 58, no. 9, pp. 553–559.
5. Xiao Yi, Ishikawa T. Bearing strength and failure behavior of bolted composite joints. *Composites Science and Technology*, 2005, no. 65, pp. 1032–1043.
6. Glebova M. A., Grishin V. I., Guseva N. V. Issledovanie vidov razrusheniya boltovykh soedinenii sloistykh kompozitov. *Uchenye zapiski TsAGI*, 2022, vol. LIII, no. 1, pp. 66–73. (In Russ.)
7. Pinho S. T., Iannucci L., Robinson P. Physically-based failure models and criteria for laminated fibre-reinforced composites with emphasis on fibre kinking: Part I: Development. *Composites Applied Science and Manufacturing*, 2006, vol. 37, no. 1, pp. 63–73.
8. Pinho S. T., Davila C. G., Camanho P. P., et al. *Failure models and criteria for frp under in-plane or three-dimensional stress states including shear non-linearity*. NASA Langley Research Center, Hampton, 2005, NASA/TM-2005-213530, VA 2368, 69 p.
9. Abaqus Users Manual, Version 6.12, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI.
10. Davila C. G., Camanho P. R. and Rose C. A. Failure criteria for FRP laminates. *Journal of Composite Materials*, 2005, vol. 39, no. 4, pp. 323–345.
11. Khudhayer J. Jadee, A. R. Orthman. The effect of defence hole system on the failure load and bearing strength of GFRP bolted joint. *American journal of mechanical engineering*, 2015, vol. 3, no. 4, pp. 135–141.
12. Maikuma H., Kobomura K. Bearing strength and damage progress for PAN-based and pitch-based carbon fiber composites. *Journal of Composite Materials*, 1993, vol. 27, no. 18, pp. 1739–1761, <https://doi.org/10.1177/002199839302701803>

Информация об авторах

Павлов Михаил Валерьевич, научный сотрудник центра прочности летательных аппаратов, Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского, Жуковский, Московская обл., Россия, nio18@tsagi.ru

Панков Андрей Вячеславович, кандидат технических наук, заместитель начальника научно-исследовательского отделения ресурса авиационных конструкций центра прочности летательных аппаратов,

Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского, Жуковский, Московская обл., Россия, nio18@tsagi.ru

Свиридов Андрей Александрович, научный сотрудник центра прочности летательных аппаратов, Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского, Жуковский, Московская обл., Россия, nio18@tsagi.ru

Authors information

Pavlov Mikhail V., Researcher at the Aircraft Strength Center, Central Aerohydrodynamic Institute named after N. E. Zhukovsky, Zhukovskiy, Moscow Region, Russia, nio18@tsagi.ru

Pankov Andrey V., Candidate of Sciences (Engineering), Deputy Head of the Research Department of the Aircraft Strength Center, Central Aerohydrodynamic Institute named after N. E. Zhukovsky, Zhukovskiy, Moscow Region, Russia, nio18@tsagi.ru

Sviridov Andrey A., Researcher at the Aircraft Strength Center, Central Aerohydrodynamic Institute named after N. E. Zhukovsky, Zhukovskiy, Moscow Region, Russia, nio18@tsagi.ru

Статья поступила в редакцию 06.04.2023; одобрена после рецензирования 20.07.2023; принята к публикации 28.07.2023.

The article was submitted 06.04.2023; approved after reviewing 20.07.2023; accepted for publication 28.07.2023.

Научная статья
УДК 620.171.34

РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТНЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ БОЛЬШОЙ ТОЛЩИНЫ

М. В. ПАВЛОВ, А. В. ПАНКОВ, А. А. СВИРИДОВ

*Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского,
Московская область, Жуковский, Россия*

Аннотация. Точность данных о характеристиках прочности для композитов большой толщины важна при эксплуатации авиационной техники, а именно при проектировании и обосновании прочности композитной авиаконструкции с нетиповыми ремонтами. Для решения задач проектирования, сертификации, а также обеспечения эксплуатации авиационной техники конструкторам необходимо иметь экспериментально обоснованные расчётные характеристики полимерных композиционных материалов (ПКМ), как на уровне монослоя, так и для типовых укладок. Толщины основных силовых элементов (ОСЭ) для самолётов транспортной категории находятся в диапазоне от 2,5 до 28,0 мм и более, что выходит за рамки рекомендаций отечественных и зарубежных методик. В работе представлены результаты расчётно-экспериментального исследования применимости различных форм образцов при испытаниях на сжатие и растяжение для образцов с толщинами, выходящими за рамки рекомендаций современных стандартов. На основе этих исследований разработаны рекомендации по проектированию таких образцов для испытаний на растяжение и сжатие. Определено, что искажения сдвиговых напряжений в зачётной зоне образца приводят к занижению экспериментальных значений и должны учитываться при утверждении геометрии образцов перед началом производства.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, механические свойства, элементарные образцы, программный комплекс ABAQUS, эксплуатация авиационной техники

Для цитирования: Павлов М. В., Панков А. В., Свиридов А. А. Расчётно-экспериментальное исследование механических свойств композитных полуфабрикатов большой толщины // Научный вестник ГосНИИ ГА, 2023. № 43. С. 81–92.

RESEARCH AND EXPERIMENTAL STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF PRE-PREG COMPOSITE WITH THICK THICKNESSES

M. V. PAVLOV, A. V. PANKOV, A. A. SVIRIDOV

Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovskiy, Moscow Region, Russia

Abstract. Data accuracy of strength characteristics for composites is important during the operation of aircrafts, namely, when designing and justifying the strength of atypical repairs for aircraft structures with composite elements. In order to solve the problems of design, certification, as well as the operation of aviation equipment, designers need experimentally substantiated design characteristics of polymer matrix composites, both at the layer level and for typical stacking. The thicknesses of the main structure elements for passenger aircrafts are in the range from 2.5 to 28 mm and above. The paper presents the results of a computational

and experimental analysis of the applicability of various sample shapes under compression and tensile tests for thicknesses of composite materials that go beyond the recommendations of standards. Based on these studies, recommendations have been developed for designing specimens for tensile and compression tests with large thickness. It has been determined that shear stress distortions in the test zone of the sample lead to an underestimation of the experimental values and must be taken into account when approving the geometry of the samples before starting production.

Keywords: composites, mechanical properties, samples, FEA, ABAQUS, operation of aircraft

For citation: Pavlov M. V., Pankov A. V., Sviridov A. A. Research and experimental study of mechanical properties of pre-preg composite with thick thicknesses, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2023, no. 43, pp. 81–92. (In Russ.)

Введение

В современной отечественной и зарубежной авиационной промышленности происходит активное внедрение полимерных композиционных материалов (ПКМ) в основные силовые элементы (ОСЭ) авиационных конструкций. Толщины ОСЭ для узкофюзеляжных самолётов транспортной категории находятся в диапазоне от 2,5 до 20,0 мм, а для широкофюзеляжных могут быть более 20 мм.

Современные отечественные и зарубежные стандарты по испытаниям элементарных образцов (ГОСТ 33519-2015¹; ASTM D3410/D3410M-03(2008)²; ГОСТ Р 56785-2015³; ASTM D3039/D3039M-08⁴), которые применяются для получения экспериментальным путём механических характеристик ПКМ, указывают для них предельную рекомендованную толщину на уровне (2,4–3,0) мм, что вносит неопределённость при выборе геометрии как образца, так и оснастки для проведения испытаний образцов с толщиной, превышающей рекомендованное значение. Процесс развития методик получения характеристик полимерных материалов представлен в работах [1–4].

В [5] представлено сравнение результатов испытаний по определению прочности при растяжении и сжатии для образцов толщиной (2,5; 5,0; 20,0) мм. Испытания проводились на сжатие (5,0; 20,0) мм и растяжение (2,5; 20,0) мм. Для проведения испытаний для толщины 20 мм авторами [5] разработана новая форма образцов. На рис. 1 представлены стандартная (по соответствующему стандарту) и вновь разработанная формы образцов.

Для проектирования формы образцов использовались представленные в [1] рекомендации по определению размеров захватной части:

– при растяжении:

$$L_T = \frac{\sigma_T w_g t_g}{2 w_T \sigma_S}, \quad (1)$$

где L_T – длина захватной части; σ_T – предел прочности на растяжение, для «старой геометрии»; w_g – ширина зачётной области разрушения; t_g – толщина элементарного образца, «новой геометрии»; w_T – длина зачётной области разрушения; σ_S – предел прочности на сдвиг;

¹ ГОСТ 33519-2015. Композиты полимерные. Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах.

² ASTM D3410/D3410M-03(2008). Standard Test Method for Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading.

³ ГОСТ Р 56785-2015. Композиты полимерные. Метод испытания на растяжение плоских образцов.

⁴ ASTM D3039/D3039M-08. Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.

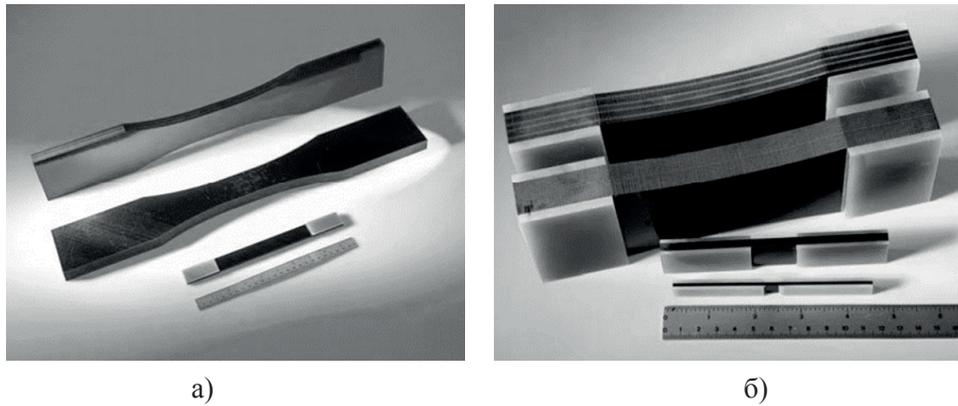


Рис. 1. Образцы стандартной и новой формы:
а) – растяжение; б) – сжатие

– при сжатии:

$$L_{\max} \leq 0,9069 t_g \sqrt{\left(1 - \frac{1,2\sigma_c}{G_{13}}\right) \frac{E_c}{\sigma_c}}, \quad (2)$$

где L_{\max} – максимальная длина зачётной области разрушения; σ_c – предел прочности на сжатие, для «старой геометрии»; G_{13} – модуль сдвига; t_g – толщина элементарного образца «новой геометрии»; E_c – модуль упругости при сжатии.

Авторами [5] использовались образцы с типовой (стандартной) укладкой, а также с восьмикратной типовой для растяжения и четырёхкратной – для сжатия. В табл. 1 и табл. 2 [5] приведены результаты испытаний.

Таблица 1

Результаты испытаний при сжатии

Укладка	Толщина (мм)	Модуль упругости (ГПа)	Предел прочности (МПа)
Стандартная	5,0	44,0	454
Стандартная×4	20,0	42,6	446

Таблица 2

Результаты испытаний при сжатии

Укладка	Толщина (мм)	Модуль упругости (ГПа)	Предел прочности (МПа)
Стандартная	2,5	44,2	551
Стандартная×8	20,0	45,6	540

Очевидно, что подход по масштабированию образцов, представленный в работе [5], даёт хороший результат – значения прочности и модуля упругости для образцов различной толщины практически совпадают. Однако авторы [5] не получили результатов испытаний образцов стандартной геометрии с толщиной 20 мм, а также не дали рекомендации по приспособлению, которое использовалось при сжатии. Возможно, стандартное противоизгибное приспособление не применялось из-за очень большой толщины образцов.

Целью настоящей статьи является представление результатов по аналогичным [5] исследованиям с учётом отечественного опыта проведения подобного рода испытаний.

Исследовалась применимость стандартной геометрии образцов и геометрии, разработанной по рекомендациям работы [5], для образцов с «переходной» толщиной 6,28 мм, которая уже значительно превышает рекомендованную соответствующими стандартами, но ещё должна оставлять возможность применять стандартную геометрию. Дополнительно были испытаны образцы стандартной геометрии с толщиной 3,2 мм и близким процентным содержанием слоёв.

Для более детального анализа полученных экспериментальных результатов использовалось моделирование процесса испытаний в программном комплексе ABAQUS [6].

Экспериментальное определение прочности образцов

Испытания проводились в лаборатории комплекса прочности летательных аппаратов ФАУ «ЦАГИ» с использованием испытательных электрогидравлических машин Instron с максимальным усилием 10 и 20 т в соответствии с методикой ФАУ «ЦАГИ» для получения механических свойств ПКМ при растяжении и сжатии. Основные положения методики представлены ниже. Методика ФАУ «ЦАГИ» отличается от предписанной в ГОСТ 33519-2015 в части рекомендуемой геометрии образца, а от изложенной в ГОСТ Р 56785-2015 – в части геометрии образца и противоизгибного приспособления.

Геометрия образцов. Геометрия образцов на сжатие и растяжение, выбранная в соответствии с рекомендациями [5], а также эскиз образца стандартной формы в соответствии с ГОСТ 32656-2017 представлены на рис. 2.

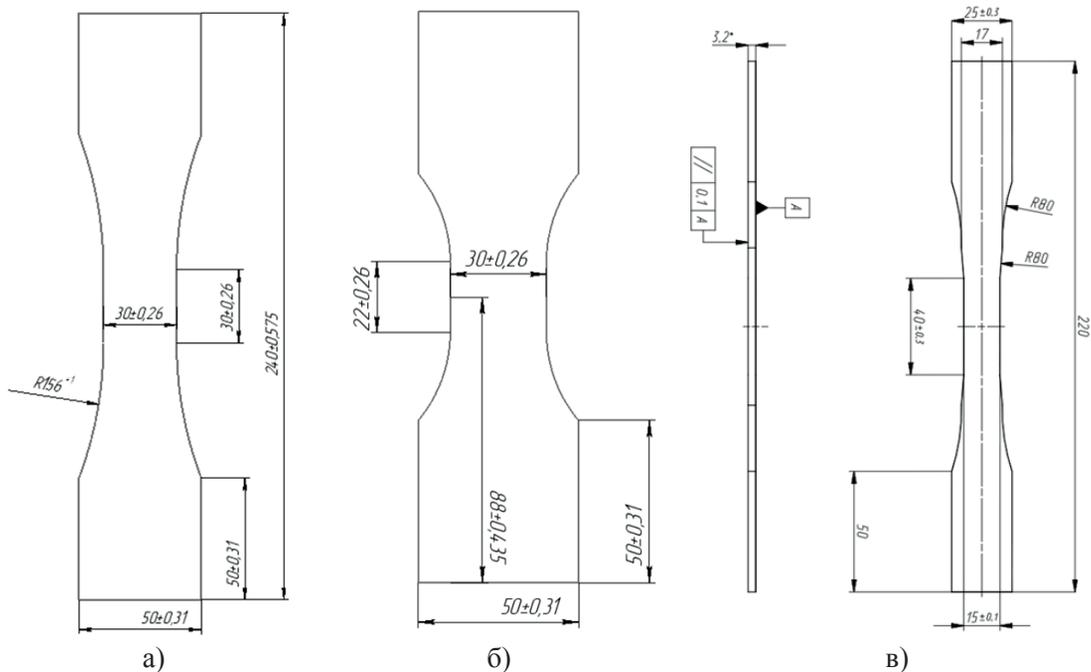


Рис. 2. Эскизы различных форм образцов для растяжения и сжатия: а) для растяжения [5]; б) для сжатия [5]; в) в соответствии с ГОСТ 32656-2017

Материал образцов. Для производства образцов использован углепластик, причём для образцов с толщиной 6,28 мм материал был произведён по инфузионной технологии, а для образцов с толщиной 3,2 мм – по автоклавной, поскольку образцов с соответствующими толщинами для одной технологии не нашлось. Толщина монослоя в обоих случаях равнялась 0,185 мм. В табл. 3 представлены способы укладки материала, в табл. 4 и табл. 5 – механические свойства монослоя, которые принимались одинаковыми для обеих технологий.

Таблица 3

Укладки материала

Толщина образца	Содержание слоёв (%)			
	0°	90°	+45°	-45°
6,28 мм	48,40	12,90	19,35	19,35
3,2 мм	37,5	12,5	25,0	25,0

Таблица 4

Модули упругости монослоя

Вид испытания	E_{11}	E_{22}	E_{33}	μ_{12}	μ_{13}	μ_{23}	G_{12}	G_{13}	G_{23}
Растяжение (кгс/мм ²)	17437	958	902	0,33	0,33	0,33	535	535	535
Сжатие (кгс/мм ²)	15000	902	958	0,33	0,33	0,33	535	535	535

В табл. 4 E_{11} , E_{22} , E_{33} – модули упругости вдоль волокна, поперёк волокна и поперёк по толщине соответственно; μ_{12} , μ_{13} , μ_{23} – соответствующие коэффициенты Пуассона; G_{12} , G_{13} , G_{23} – соответствующие модули сдвига.

Таблица 5

Пределы прочности монослоя (кгс/мм²)

σ_{11+}	σ_{22+}	σ_{11-}	σ_{22-}	τ_{12}
288,7	6,9	170,0	25,0	9,75
0,33	0,33	535	535	535

В табл. 5 σ_{11+} , σ_{11-} – предел прочности на растяжение и сжатие вдоль слоя; σ_{22+} , σ_{22-} – предел прочности на растяжение и сжатие поперёк слоя; τ_{12} – предел прочности на сдвиг в плоскости слоя.

Приспособление для проведения испытаний. Для проведения испытаний на сжатие в соответствии с методикой ФАУ «ЦАГИ» использовалось противоизгибное приспособление (рис. 3).

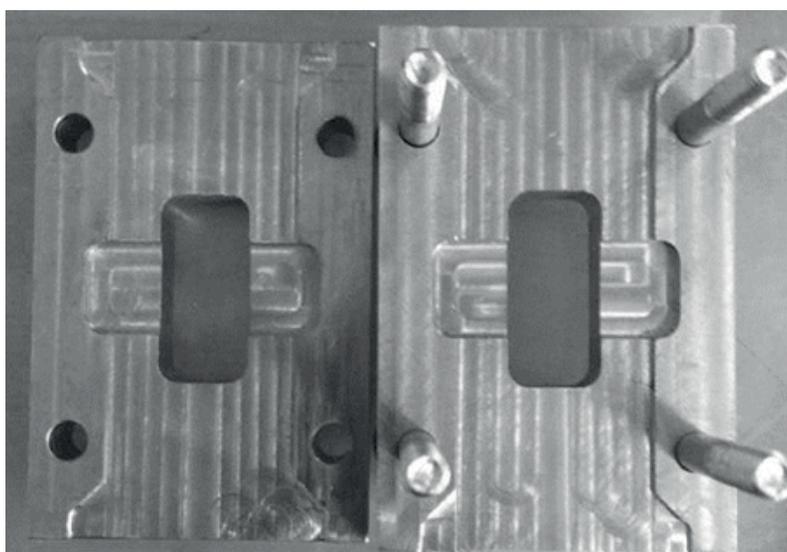


Рис. 3. Противоизгибное приспособление

Ширина выемки принималась равной четырём толщинам образца. На рис. 4 представлен образец на сжатие в испытательной машине.

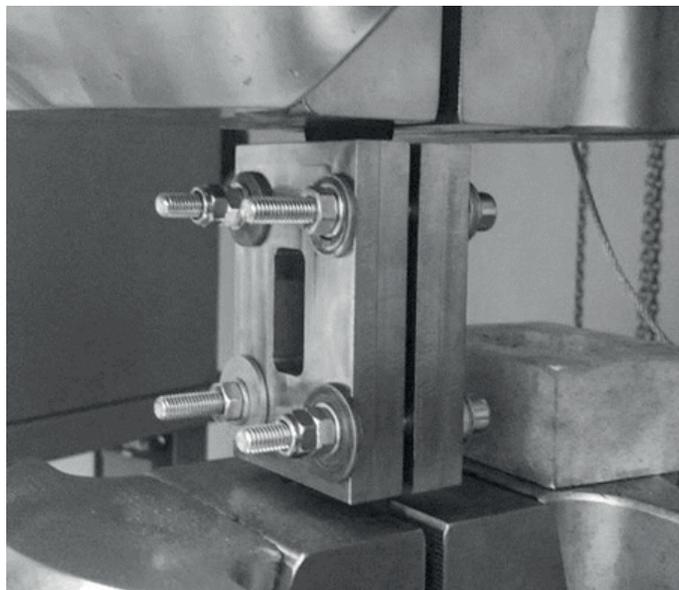


Рис. 4. Образец при проведении испытаний на сжатие

Результаты испытаний

Всего испытано по 6 образцов каждого типа (см. рис. 2). Испытания проходили в лаборатории прочности ЦАГИ (аттестована Росавиацией на данный вид испытаний) на электромеханической машине Instron мод. 5980 с максимальным усилием 25 т. Результаты (табл. 6) представлены в виде отношения в % к результатам образца с предложенной геометрией. В табл. 6 σ_B – предел прочности образца на растяжение и сжатие.

Таблица 6

Результаты испытаний

Тип образца	t , мм	Растяжение %		Сжатие %	
		σ_B	E	σ_B	E
Предложенный	6,28	100	100	100	100
Стандартной формы	6,28	109	99	108	113
	3,2	84	91	110	96

Из табл. 6 следует, что прочность образца стандартной геометрии как при растяжении, так и при сжатии примерно на 8 % выше, чем образцов с предложенной геометрией. Следовательно, по полученным данным для исследованного материала при определении прочности при растяжении и сжатии можно расширить диапазон применимости образцов со стандартной геометрией до толщин, не превышающих 6,28 мм, при условии не критичности снижения получаемой характеристики на 8 %. В противном случае следует использовать новую геометрию образца.

В качестве причины снижения получаемых характеристик авторами настоящей статьи были выдвинуты предположения о влиянии сдвиговых напряжений, особенно для образца с предложенной геометрией, а также о влиянии радиусных переходов на зачётную зону. Для их

подтверждения проведено моделирование напряжённо-деформированного состояния образцов с различной геометрией методом конечных элементов в среде программного комплекса ABAQUS.

Моделирование напряжённо-деформированного состояния образцов

Для построения конечно-элементной модели использовались специальные элементы Continuum Shell [2], которые рекомендованы разработчиком программного обеспечения для расчёта элементов из ПКМ.

В качестве критерия разрушения выбран критерий Хашина, поскольку для него в ABAQUS реализована процедура зарождения и роста разрушения с последовательной деградацией свойств разрушающихся элементов [6–8].

Для полного соответствия условий проведения эксперимента и расчёта моделировалось закрепление образца в «губках» захватов испытательной машины. На рис. 5 представлена модель образца в «губках».

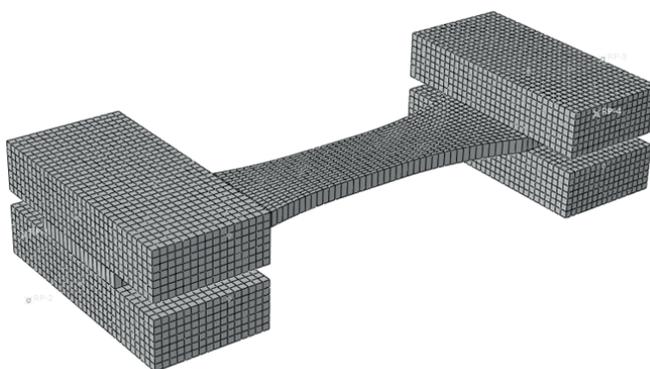


Рис. 5. Образец с имитацией захватов испытательной машины

Между «губками» и поверхностью образца моделировалось контактное взаимодействие с учётом трения. Коэффициент трения принимался на основании экспертной оценки авторов равным 0,6. Давление «губок» на поверхность образца рассчитывалось в соответствии с руководством к испытательной машине по формуле:

$$F_C = \frac{15,6 F_p}{A},$$

где F_C – давление в захватах; F_p – нагрузка на образец; A – площадь контакта захватного устройства.

Используя имеющиеся исходные данные, получаем $F_C = 62,4$ кгс/мм².

При моделировании испытаний на сжатие противоизгибное приспособление моделировалось выделением соответствующих поверхностей и наложением ограничения по перемещению из плоскости образца. Область с ограниченным перемещением представлена на рис. 6.

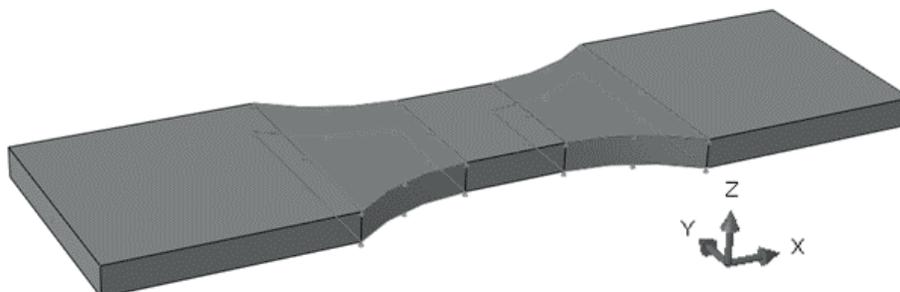


Рис. 6. Поверхности с ограничением на перемещение по оси OZ

По результатам моделирования получены пределы прочности при растяжении и сжатии для рассматриваемых образцов. В табл. 7 представлены результаты испытаний и моделирования.

Таблица 7

Результаты моделирования и испытаний

Тип образца	t , мм	Растяжение (кгс/мм ²) (1-Исп./Мод.)·100 %	Сжатие (кгс/мм ²) (1-Исп./Мод.)·100 %
Предложенный	6,28	11,0	30,3
Стандартный	6,28	7,2	21,3
	3,2	3,3	0,7

Полученные различия в эксперименте и расчёте можно объяснить идеальными условиями испытаний, которые реализовывались при моделировании. При испытаниях образцов 3,2 мм характерный вид зоны разрушения – сжатие, слои как бы входят друг в друга, а при испытаниях образцов с толщиной 6,28 мм происходит разрушение «фонариком» (рис. 7), т. е. зачётная зона расслаивается в продольном направлении на две части и происходит разрушение. Такое отличие в протекании процесса разрушения может приводить к повышенной разнице расчёта и эксперимента.

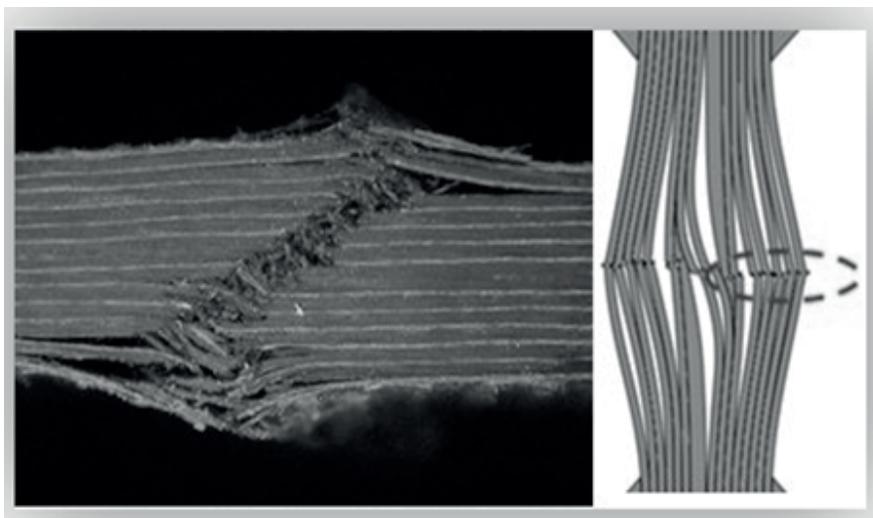


Рис. 7. Мода разрушения, характерная для толщин более 4 мм

Приведённые в табл. 7 результаты показывают, что, несмотря на различие процессов разрушения при сжатии в эксперименте и моделировании, образцы стандартной геометрии показывают более высокие результаты по сравнению с образцами с разработанной геометрией. Для более детального анализа построены графики зависимости сдвига в плоскости слоёв для всех исследуемых образцов при сжатии. Зависимости строились при уровне нагрузки, равном 40 % от разрушающей для слоёв +45° по центральному сечению. На рис. 8–10 приведены соответствующие зависимости.

Представленные на рис. 8 и рис. 9 зависимости напряжений сдвига в зачётной зоне образцов показывают, что для предложенного образца наблюдается значительная неравномерность напряжений сдвига по его ширине.

На рис. 10 представлена зависимость напряжений сжатия в каждом слое по толщине образца.

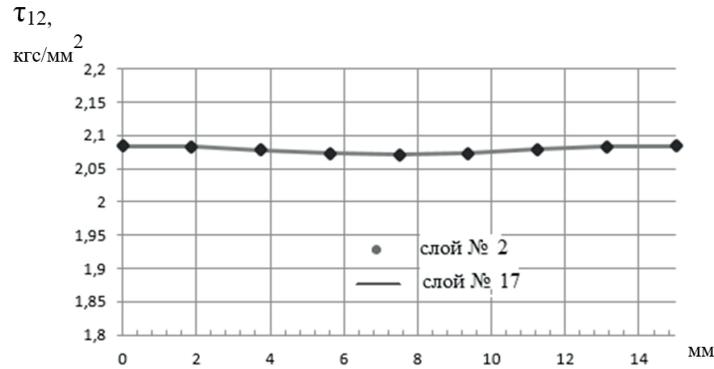


Рис. 8. Распределение напряжения сдвига по ширине центрального сечения образца стандартной формы с толщиной 3,2 мм

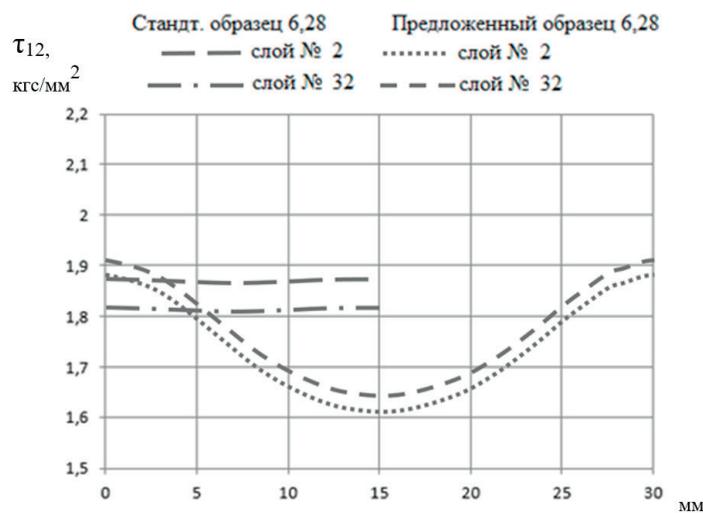


Рис. 9. Распределение напряжения сдвига по ширине центрального сечения образца стандартной формы и предложенного с толщиной 6,28 мм

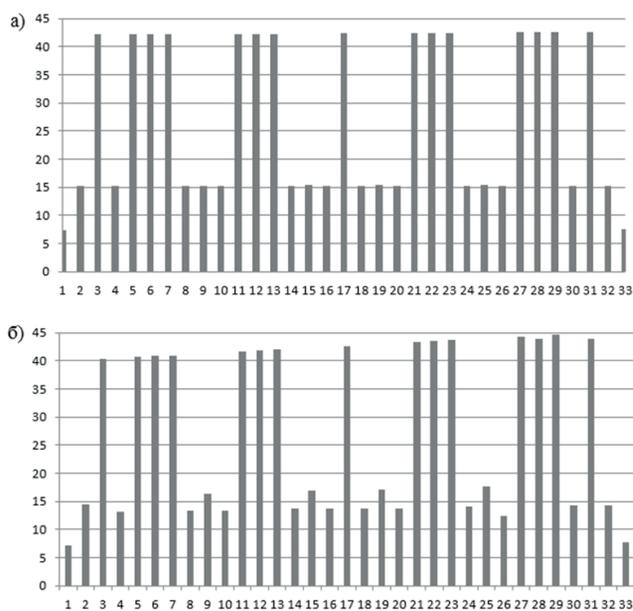


Рис. 10. Распределения по толщине напряжений сжатия: а) – предложенный образец 6,28 мм; б) – образец стандартной формы 6,28 мм

График распределения напряжения сжатия по толщине для предложенного образца имеет несимметричный вид, что свидетельствует о влиянии краевых эффектов на зачётную зону, а также показывает влияние изгиба зачётной зоны.

Для выяснения влияния краевых эффектов построена зависимость напряжения сдвига в плоскости слоя 45° по полудлине предложенного образца и образца стандартной формы при сжатии (рис. 11).

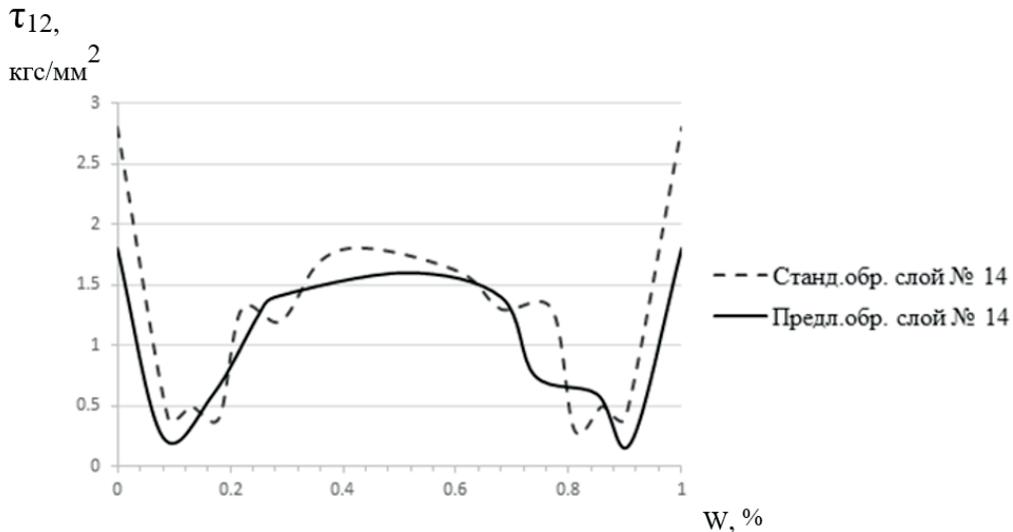


Рис. 11. Зависимость напряжений сдвига для образцов по ширине образцов

На рис. 11 показаны более высокие значения напряжений сдвига в зачётной зоне образца стандартной геометрии, что отразилось на получении меньшего значения предела прочности на сжатие (см. табл. 7).

Обобщая полученные результаты, можно рекомендовать следующую последовательность действий при выборе геометрии образца с толщиной, выходящей за рекомендуемую соответствующими методиками, для испытаний на растяжение и сжатие:

- Выбор геометрии захватной части образца в соответствии с формулами (1), (2). Рекомендуемая длина и ширина зачётной зоны не менее 4 толщин образца, а общая рабочая часть образца длиной не менее 8 толщин (с «запасом», в дальнейшем подлежит уточнению).
- Переход от рабочей зоны к захватной части образца выполняется с недопущением существенной концентрации в зоне радиусных переходов.
- Проведение виртуальных испытаний образца с разработанной геометрией с целью убедиться, что в зачётной зоне отсутствуют градиенты сдвига.
- Проверка равномерности напряжения по толщине образца в центральном сечении.

ФАУ «ЦАГИ» предполагается спроектировать и испытать образцы из углепластика толщиной более 10 мм на сжатие и растяжение в соответствии с представленными рекомендациями.

Заключение

В статье приведены результаты расчётно-экспериментальных исследований с целью формализации процедуры выбора геометрии образцов для исследования свойств ПКМ различных толщин.

На основе исследований авторами впервые разработаны рекомендации по проектированию образцов для испытаний на растяжение и сжатие с толщинами, выходящими за рамки рекомендаций соответствующих стандартов.

Определено, что искажения сдвиговых напряжений в зачётной зоне образца приводят к занижению экспериментальных значений и требуют учёта при утверждении геометрии образцов перед началом производства.

Установлено, что стандартные методы моделирования разрушения в программном комплексе ABAQUS не позволяют корректно получать моду разрушения для толщин более 4 мм, что приводит к занижению предельных напряжений примерно на 30 %.

Представленные рекомендации могут быть использованы при проектировании нетиповых ремонтов элементов конструкции в рамках обеспечения эксплуатации авиационной техники.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Park I. K. Tensile and Compressive Test Methods for High Modulus Graphite-Fibre Reinforced Composites, *Proceedings of the International Conference on Carbon Fibers, Their Composites and Applications*, The Plastics Institute, London, 1971, Paper no. 23.
2. Hofer J. R. and Rao P. N. A New Static Compression Fixture for Advanced Composite Materials, *Journal of Testing and Evaluation*, 1977, vol. 5, no. 4, pp. 278–283.
3. Chaterjee S., Adams D. F. and Oplinger D. W. *Test Methods for Composites a Status Report. Volume II: Compression Test Methods*, Report no. DOT/FAA/CT-93/17-II, U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Atlantic City, NJ, 1993.
4. Adams D. F., Lewis, E. Q. Influence of Specimen Gage Length and Loading Method on the Axial Compressive Strength of a Unidirectional Composite Material, *Experimental Mechanics*, 1991, vol. 31, no. 1, pp. 14–20.
5. Gower M. L., Shaw R. M. *Development of Test Methods for Measuring Thick Sections Tensile and Compression Properties of Polymer Matrix Composites*, NPL Report MN06, February 2011, issue 2.
6. Abaqus Users Manual, Version 6.12, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI.
7. Hashin Z. Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites. *Journal of Applied Mechanics*, 1980, vol. 47(2), pp. 329–334. <https://doi.org/10.1115/1.3153664>
8. Hashin Z. and Rotem A. A Fatigue Criterion for Fiber-Reinforced Materials, *Journal of Composite Materials*, 1973, vol. 7, pp. 448–464.

References

1. Park I. K. Tensile and Compressive Test Methods for High Modulus Graphite-Fibre Reinforced Composites, *Proceedings of the International Conference on Carbon Fibers, Their Composites and Applications*, The Plastics Institute, London, 1971, Paper no. 23.
2. Hofer J. R. and Rao P. N. A New Static Compression Fixture for Advanced Composite Materials, *Journal of Testing and Evaluation*, 1977, vol. 5, no. 4, pp. 278–283.
3. Chaterjee S., Adams D. F. and Oplinger D. W. *Test Methods for Composites a Status Report. Volume II: Compression Test Methods*, Report no. DOT/FAA/CT-93/17-II, U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Atlantic City, NJ, 1993.
4. Adams D. F., Lewis E. Q. Influence of Specimen Gage Length and Loading Method on the Axial Compressive Strength of a Unidirectional Composite Material, *Experimental Mechanics*, 1991, vol. 31, no. 1, pp. 14–20.
5. Gower M. L., Shaw R. M. *Development of Test Methods for Measuring Thick Sections Tensile and Compression Properties of Polymer Matrix Composites*, NPL Report MN06, February 2011, issue 2.
6. Abaqus Users Manual, Version 6.12, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI.

7. Hashin Z. Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites. *Journal of Applied Mechanics*, 1980, vol. 47(2), pp. 329–334. <https://doi.org/10.1115/1.3153664>

8. Hashin Z. and Rotem A. A. Fatigue Criterion for Fiber-Reinforced Materials, *Journal of Composite Materials*, 1973, vol. 7, pp. 448–464.

Информация об авторах

Павлов Михаил Валерьевич, научный сотрудник центра прочности летательных аппаратов, Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского, Жуковский, Московская обл., Россия, nio18@tsagi.ru

Панков Андрей Вячеславович, кандидат технических наук, заместитель начальника научно-исследовательского отделения ресурса авиационных конструкций центра прочности летательных аппаратов, Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского, Жуковский, Московская обл., Россия, nio18@tsagi.ru

Свиридов Андрей Александрович, научный сотрудник центра прочности летательных аппаратов, Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского, Жуковский, Московская обл., Россия, nio18@tsagi.ru.

Authors information

Pavlov Mikhail V., Researcher at the Aircraft Strength Center, Central Aerohydrodynamic Institute named after N. E. Zhukovsky, Zhukovskiy, Moscow Region, Russia, nio18@tsagi.ru

Pankov Andrey V., Candidate of Sciences (Engineering), Deputy Head of the Research Department of the Aircraft Strength Center, Central Aerohydrodynamic Institute named after N. E. Zhukovsky, Zhukovskiy, Moscow Region, Russia, nio18@tsagi.ru;

Sviridov Andrey A., Researcher at the Aircraft Strength Center, Central Aerohydrodynamic Institute named after N. E. Zhukovsky, Zhukovskiy, Moscow Region, Russia, nio18@tsagi.ru.

Статья поступила в редакцию 06.04.2023; одобрена после рецензирования 20.07.2023; принята к публикации 28.07.2023.

The article was submitted 06.04.2023; approved after reviewing 20.07.2023; accepted for publication 28.07.2023.

Обзорная статья
УДК 629.7.083

ВЛИЯНИЕ ТОЧКИ ОТБОРА НА ИНФОРМАЦИОННУЮ ПРЕДСТАВИТЕЛЬНОСТЬ ПРОБЫ МАСЛА ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

В. Г. ДРОКОВ¹, В. В. ДРОКОВ¹, В. В. МУРЫЩЕНКО¹, А. В. БЛИНОВ², Ф. И. МУХУТДИНОВ²

¹ НИИ прикладной физики Иркутского государственного университета, Иркутск, Россия

² ОДК-Авиадвигатель, Пермь, Россия

Аннотация. Основное предназначение трибодиагностических методов при эксплуатации авиационной техники – выявление повреждений на ранней стадии их развития и оценка остаточного ресурса двигателя. Длительный опыт применения данных методов показал достоверность диагностирования порядка 90 % только для единичных типов развития повреждений. Показано, что проба масла, отобранная из коробки приводов (маслобака) и поступающая на анализ, не отвечает условиям представительности по размерам частиц и информативности. При отборе частиц с магнитных сигнализаторов стружки, магнитных пробок, фильтров-сигнализаторов также нарушаются условия отбора. Проба с маслофильтра полностью решает вопрос с представительностью. В современных двигателях, использующих неразборные фильтроэлементы, может быть решён вопрос с периодичностью отбора пробы на анализ за счёт внедрения системы диагностического фильтра. Для получения достоверных результатов оценки технического состояния двигателя необходимо отбирать на анализ две пробы: масла и смыва с маслофильтра (фильтроэлемента).

Ключевые слова: частица изнашивания, фильтроэлемент, маслофильтр, газотурбинный двигатель, достоверность диагностирования, атомно-эмиссионный анализ, рентгенофлуоресцентный анализ, эксплуатация авиационной техники

Для цитирования: Дроков В. Г., Дроков В. В., Мурыщенко В. В., Блинов А. В., Мухутдинов Ф. И. Влияние точки отбора на информационную представительность пробы масла при диагностировании авиационных газотурбинных двигателей // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 43. С. 93–104.

INFLUENCE OF THE SAMPLING POINT ON THE INFORMATION REPRESENTATIVENESS OF THE OIL SAMPLES DURING DIAGNOSTICS OF AIRCRAFT GAS TURBINE ENGINES

V. G. DROKOV¹, V. V. DROKOV¹, V. V. MURYSHCENKO¹, A. V. BLINOV², F. I. MUKHUTDINOV²

¹ Research Institute of Applied Physics of Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

² UEC-Aviadvigatel', Perm', Russia

Abstract. The main purpose of tribodiagnostic methods during the operation of aircraft is to identify damage at an early stage of development and assess the residual life of the engine. Long experience in the operation of these methods has shown the reliability of diagnosing about 90% only for single types of damage development. It is shown that the oil sample taken from the gear box (oil tank) and received for analysis does

not meet the conditions of representativeness in terms of particle size and information content. When taking particles from magnetic chip detectors, magnetic plugs, filter detectors, sampling conditions are also violated. The sample from the oil filter completely solves the issue of representation. In modern engines using non-removable filter elements, the issue can be resolved with the frequency of sampling for analysis due to the introduction of a diagnostic filter system. To obtain reliable results of evaluation of engine technical condition, two samples must be taken for analysis: oil and flushing from oil filter (filter element).

Keywords: wear particle, filter element, oil filter, gas turbine engine, reliability of diagnostics, atomic emission analysis, X-ray fluorescence analysis, operation of aircraft

For citation: Drovok V. G., Drovok V. V., Muryshchenko V. V., Blinov A. V., Mukhutdinov F. I. Influence of the sampling point on the information representativeness of the oil samples during diagnostics of aircraft gas turbine engines, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2023, no. 43, pp. 93–104. (In Russ.)

Введение

Поддержание лётной годности узлов и деталей, омываемых смазочным маслом авиационного двигателя, обеспечивается за счёт своевременного контроля технического состояния двигателя методами бортовой и наземной диагностики, применяемыми, как правило, совместно. Бортовая диагностика трибологических систем выдаёт недостаточный объём информации, поэтому дополнительно используются наземные методы.

Для диагностики авиационных двигателей по параметрам частиц изнашивания в качестве наземных средств оценки технического состояния узлов трения, омываемых смазочным маслом, достаточно длительное время используются спектральные методы анализа. По измеренному значению массовой доли частиц изнашивания судят о техническом состоянии узлов двигателя [1–3]. Дополнительно для оценки технического состояния авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) могут быть использованы феррографические методы, учитывающие размер и форму частиц.

Однако наземные методы, хотя и более информативные, чем бортовые, также не всегда обеспечивают достоверность 90 % результатов диагностирования. Использование трибодиагностических методов для оценки технического состояния авиадвигателей в условиях эксплуатации показало, что зачастую заявленные возможности используемых методов по выявлению повреждения на ранней стадии развития не соответствуют действительности. Так, например, по сообщениям ПАО «ОДК-Сатурн», за период 2000–2004 гг. было зарегистрировано 110 отказов двигателей Д-30КП/КУ/КУ-154, связанных с неисправностями и разрушениями узлов и агрегатов, омываемых смазочным маслом. Двигатели досрочно были сняты с эксплуатации и направлены в ремонт.

Ранее в [4] проведён анализ влияния диагностических возможностей применяемой аппаратуры на эффективность оценки технического состояния смазываемых узлов авиационных ГТД. При этом не затрагивались вопросы влияния точки отбора на представительность пробы, влияния тонкости фильтрации масла на величину равновесного содержания примеси, а также обоснованности выбора диагностических признаков.

Цели представленной работы – анализ и обобщение сведений по точкам отбора и представительности пробы, поступающей на анализ, исследование влияния параметров основного маслофильтра на величину измеренной массовой доли для различных видов изнашивания, выбор и периодичность отбора пробы при использовании тонкоячеистых фильтроэлементов.

Способы отбора проб масла и их анализа

Наземные методы контроля технического состояния узлов и агрегатов ГТД, омываемых смазочным маслом, предполагают выполнение ряда операций: слить пробу масла с двигателя,

доставить в лабораторию, тщательно перемешать, отобрать аналитическую навеску на анализ и далее измерить параметры частиц изнашивания с помощью спектральной или (и) феррографической аппаратуры. Чаще всего в качестве диагностического признака используется величина массовой доли частиц изнашивания, измеряемая с помощью рентгеноспектральных анализаторов.

Измерение массовой доли частиц изнашивания может быть выполнено с помощью анализаторов типа БРА-18, Спектроскан МАКС-G, Спектроскан МАКС-GV и АДК «Призма». Проведённые сличительные испытания анализаторов показали, что они имеют высокую чувствительность, более низкие пороги обнаружения основных химических элементов в исследуемых пробах масла по сравнению с анализатором БАРС-3 и спектрометром МФС-8 и обеспечивают достоверность результатов измерения массовой доли при действующих нормах концентрации продуктов изнашивания [5, 6]. Вопросы достоверности выявления повреждаемых узлов ГТД в зависимости от вида износа, точки отбора пробы масла в данных публикациях не обсуждались. Однако, кроме аналитических характеристик измерительной аппаратуры, для эксплуатантов необходимы, главным образом, сведения по достоверности результатов диагностирования двигателя при анализе реальной пробы масла, зависящей от точки отбора и типа повреждения.

В двигателе имеется несколько точек, позволяющих отобрать пробу на анализ. К ним относятся коробка приводов (КП), маслобак (МБ), магнитные сигнализаторы стружки (МСС), магнитные пробки (МП) и различные типы фильтров-сигнализаторов (ФС).

При этом поступающая на анализ проба масла должна отвечать определённым требованиям, которые позволяют обеспечивать высокую достоверность результатов диагностирования. Информационная ценность результатов анализа зависит от:

- точки отбора пробы;
- распределения продуктов износа в точке отбора пробы (представительности пробы);
- конструкции заборного устройства;
- времени отбора пробы.

Рассмотрим выполнение сформулированных критериев при отборе пробы с указанных выше точек.

Отбор пробы масла из коробки приводов и маслобака

Известно [7, 8], что при отборе пробы масла из КП в исправном двигателе массовая доля частиц изнашивания с наработкой не меняется. При возникновении повреждения массовая доля начинает возрастать. Поэтому КП изначально являлась основной точкой отбора масла на анализ.

Технология отбора пробы из КП следующая. Проба сливается не позднее, чем через 30 мин после останова двигателя, при этом первые 50 мл сливаются на противень, после чего отбирается проба на анализ в объёме 200–250 мл [2, 3]. После озвучивания (перемешивания при помощи ультразвука) из объёма 250 мл отбирается и анализируется аналитическая навеска, и по результатам измерения массовой доли принимается диагностическое решение. Считается, что первые 50 мл не несут информации о процессах изнашивания в двигателе, поэтому эта часть пробы не подлежит анализу.

Система смазки авиадвигателя устроена таким образом, что в КП поступает очищенное масло после маслофильтра, и поэтому результаты анализа напрямую связаны только с состоянием валов, зубчатых колёс и подшипников коробки приводов. Опыт применения спектрального анализа показал, что его результаты по пробе масла позволяют выявить повреждения лишь в 5–7 % случаев от общего числа повреждённых двигателей [9].

Одной из причин отсутствия повышенного содержания металлической примеси при возникновении повреждения в пробе масла, слитой из КП, может являться тип изнашивания узла. При некоторых типах изнашивания, например, при питтинге, зачастую происходит нестационарное, импульсное поступление в маслосистему двигателя частиц, которые достаточно быстро

отфильтровываются (время полной прокачки маслобака объёмом 40 л – порядка 1 мин), и потому проба масла, слитая из КП, может показывать установившееся, равновесное значение массовой доли даже при возникшем повреждении [7].

Отбор пробы из МБ может осуществляться с помощью специального пробоотборника, либо путём слива пробы через краник МБ [7, 10]. Отбор пробы масла выполняется не позднее, чем через 30 мин после останова двигателя (ПС-90А, Д-30КП2). Пробоотборник представляет собой шприц с гибким рукавом. Конец рукава помещается на глубину середины МБ, после чего производится забор пробы в объёме 70–200 мл масла. При отборе пробы через краник МБ вначале стравливается 0,5 л масла, после чего отбирается проба в объёме 150–200 мл. Отобранная проба переливается в специальную маркированную ёмкость и отправляется в лабораторию на анализ.

При способе отбора пробы с помощью пробоотборника из МБ сразу возникают вопросы о величине погрешности, связанной с пробоотбором. В работе [10] показано, что при температуре масла в МБ 100–120 °С через 5 мин после останова двигателя частицы размером более 30 мкм окажутся на дне МБ и не будут захвачены пробоотборником. Таким образом, уже на первом этапе пробоотбора большая часть информативных частиц будет отсутствовать в ёмкости, направленной в лабораторию на анализ, что значительно искажает результат анализа и, соответственно, результат диагностирования.

На втором этапе из ёмкости с маслом отбирается аналитическая навеска для измерения массовой доли элементов на рентгенофлуоресцентном или атомно-эмиссионном анализаторе.

При определении массовой доли на рентгенофлуоресцентном анализаторе аналитическая навеска, используемая для осаждения частиц на мембранный фильтр, составляет от 2 до 15 мл. Необходимо отметить, что увеличение навески позволяет концентрировать пробу на поверхности мембранного фильтра (снизить предел обнаружения), но приводит к значительному увеличению времени осаждения частиц на мембрану. Как правило, объём аналитической навески 5 мл является достаточно представительным. Однако, как сказано выше, представительность пробы нарушается ещё на первом этапе пробоотбора.

При использовании атомно-эмиссионного метода с вращающимся электродом температура масла в ванночке с аналитической навеской составляет 120–150 °С и в формировании аналитического сигнала участие принимают частицы микронного размера, более крупные частицы (свыше 5 мкм) осаждаются на дно ванночки. Поскольку в атомно-эмиссионном анализе аналитический сигнал пропорционален испарившейся массе частиц, то при таком методе измерения всегда будет происходить занижение результатов измерения массовой доли относительно истинного значения, что является одной из причин пропуска повреждения [11].

Ещё одним препятствием, ограничивающим достоверность диагностирования по результатам анализа пробы масла, является время отбора пробы после останова двигателя. В самолётах, оснащённых четырьмя двигателями, время отбора пробы после останова часто не соблюдается, что связано с разным временем их выключения. При четырёхмоторной компоновке два двигателя выключаются сразу же после приземления самолёта, на оставшихся двух происходит руление на стоянку, и это время от начала руления до отбора пробы может составлять более 30 мин. Такая ситуация приводит к нарушению требования к условиям пробоотбора.

Приведённая информация свидетельствует также, что при отборе пробы масла из КП и МБ не предусматривается анализ пробы первого слива. Обоснованность такого подхода вызывает сомнения. Необходимо доказательство того, что при возникновении повреждения, независимо от его типа развития, вклад крупной фракции частиц изнашивания можно не учитывать при принятии диагностического решения. Таким доказательством могут являться исследования вида функций распределения частиц по размерам в исправных двигателях и в двигателях с повреждениями. Имеющиеся об этом сведения имеют ограниченный характер и требуют дополнительных исследований [4, 12].

Необходимость учёта крупной фракции при диагностировании двигателя продемонстрирована в работе [13]. Показано, что величина неоднородности, связанная с появлением в пробе крупных частиц, может служить одним из критериев оценки технического состояния двигателя.

Отбор пробы с контрольных элементов

Авиационные ГТД, независимо от компании-изготовителя, оснащены контрольными элементами, к которым относятся МСС, МП и ФС. Срабатывание ФС, как правило, приводит к выключению двигателя. Поэтому остановимся на рассмотрении информации о частицах изнашивания, снимаемых с МСС и МП, которая позволяет, в некоторых случаях, предупредить разрушение узла.

МСС и МП располагаются в магистрали откачки масла после наиболее ответственных и нагруженных опор. Поскольку скорость прокачки масла составляет примерно 30–40 л/мин, МСС и МП в маслопроводе устанавливаются в местах, позволяющих максимально концентрировать частицы на них.

Длительный опыт использования информации, накапливаемой на МСС и МП для выявления повреждения узлов и деталей, показал следующее.

АО «ОДК-Авиадвигатель» и Rolls-Royce сообщают, что при использовании информации о частицах с МСС и МП повреждение может быть обнаружено перед катастрофическим износом, во время повреждения, или вообще не обнаружено [9, 14–16]. При этом в данных работах показано, что при анализе частиц, снятых с МСС и МП, использование самых современных аналитических методов (электронно-растровый микроскоп, JetScan, ICP спектрометр) не всегда позволяет выявить повреждение. Имелись случаи, когда на МСС и МП частицы не обнаруживались, но двигатель отстранялся от эксплуатации, и при его исследовании обнаруживалось разрушение узла. Чаще всего это связано с тем, что МСС и МП не улавливали частицы на основе меди, магния, алюминия и титана. И наоборот, на МСС и МП фиксировались частицы различных размеров, после чего в дальнейшем двигатель продолжал успешно эксплуатироваться.

Так, в частности, для контроля технического состояния роликподшипника турбины высокого давления (ТВД) двигателя ПС-90А устанавливаются МСС. Анализ статистики показал, что в 40 % двигателей, отстранённых от эксплуатации по стружке на контрольных элементах, имелись разрушения подшипников. В 30 % снятых двигателей стружки на МП и МСС не было обнаружено, однако были выявлены очаги выкрашивания на роликах и кольцах подшипников. Стружка была обнаружена только на основном маслофильтре.

Таким образом, информация о частицах изнашивания, получаемая с контрольных элементов (МП, МСС, ФС), запаздывает для выявления повреждения на ранней стадии развития и служит в качестве первичных признаков проявления неисправности. Проблема выявления повреждения на ранней стадии развития при использовании информации на контрольных элементах связана с недостаточной эффективностью улавливания МСС и МП ферромагнитных частиц и пропуском ими парамагнитных частиц.

Иными словами, выборка уловленных контрольными элементами частиц не соответствует генеральной совокупности частиц, генерируемых в маслосистеме двигателя. Это означает, что и при сливе пробы из КП, МБ, и при отборе частиц с контрольных элементов нарушаются условия пробоотбора, что приводит к снижению достоверности диагностирования. Повышение достоверности диагностических результатов может быть достигнуто при учёте всего диапазона размеров и типов частиц изнашивания, находящихся в маслосистеме двигателя.

Отбор частиц изнашивания, накопленных на основном маслофильтре

В последние годы разработчики методического обеспечения [12, 14, 15, 17–19] и организации-эксплуатанты всё чаще обращают внимание при эксплуатации авиационной техники на

контроль состояния двигателя по параметрам стружки, накапливаемой на основном маслофилтре. Разработаны и внедрены технологии диагностирования, учитывающие размер частиц, их химический состав и морфологию [14–18].

Преимущества использования данных, полученных по параметрам частиц, накапливаемых на маслофилтре, заключаются в следующем:

- пропускная способность маслофилтра позволяет всей рабочей жидкости проходить через него;
- количество осевших на маслофилтре частиц значительно превышает количество частиц, находящихся в рабочей жидкости, и частиц, уловленных МСС, МП и ФС;
- маслофилтр накапливает стружку всех типов (ферромагнетики, парамагнетики, углеродистые отложения).

В настоящее время единая технология диагностирования двигателя по результатам измерения параметров частиц, уловленных маслофилтром, отсутствует. Поэтому различные фирмы для диагностики используют собственные разработки. Проблема заключается в поиске эффективных диагностических признаков, связывающих параметры частиц, накопленных на маслофилтре, с техническим состоянием двигателя.

Rolls-Royce производит анализ стружки с фильтроэлемента после того, как обнаружена стружка на МП [16]. После этого фильтроэлемент снимается, разбирается, выделяется часть диагностического слоя и направляется на анализ. По изменению количества и размеров частиц с наработкой судят о техническом состоянии двигателя. Для идентификации типа сплава стружка может быть направлена на микрорентгеноспектральный анализ.

Подход, при котором углублённое диагностирование производится после обнаружения стружки на магнитных пробках, не лишён недостатков. Например, по статистике АО «ОДК-Авиадвигатель» из 19 двигателей, где на МСС, МП и ФС была обнаружена стружка, 9 двигателей были отстранены от эксплуатации сразу же и, как оказалось впоследствии, эти двигатели имели серьёзные повреждения узлов.

Фирма Allied Signal для оценки технического состояния применяет спектрометрический анализ проб масла и анализ частиц, смытых с маслофилтра [17]. Здесь периодичность отбора проб регламентирована: 50 ч – для новых двигателей, 100 ч – для прошедших период приработки.

Технология фильтрационного анализа достаточно сложная, длительная и состоит из следующих этапов [17]:

- промывка филтра с двукратной ультразвуковой обработкой;
- взвешивание полученного осадка;
- разделение частиц на магнитные и немагнитные;
- исследование под микроскопом размеров и формы частиц;
- определение некоторых типов сплавов с привлечением «мокрой» химии и инструментальных методов.

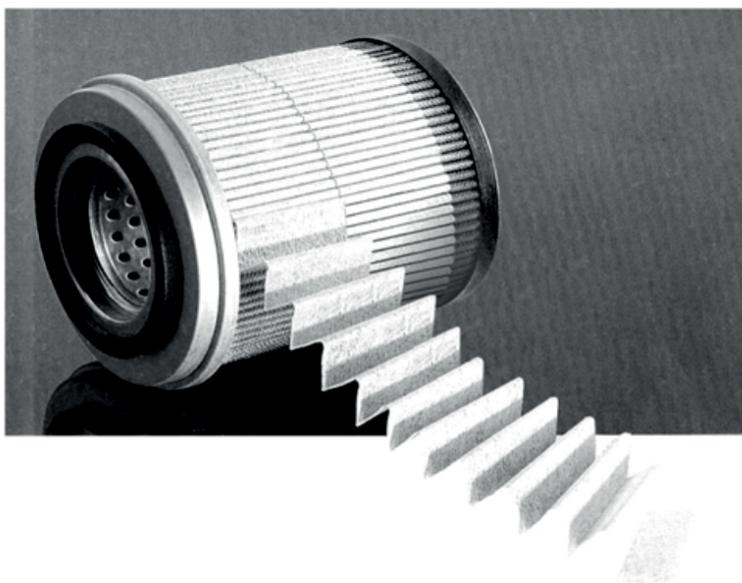
Достоверность оценки технического состояния двигателей при таком подходе разработчик Allied Signal не приводит.

Фирма GasTOPS проблему фильтрационного анализа решала следующим образом [15]. Была разработана автоматизированная система промывки фильтроэлемента (FilterCHECK). После промывки полученная проба пропускалась через счётчик металлических частиц MetalSCAN, который позволяет определять количество частиц размером более 200 мкм. Далее проба высаживалась на мембранный филтр и с помощью рентгеноспектрального метода анализа в ней определялась массовая доля элементов изнашивания.

Следует отметить, что данная работа проводилась для оценки проблемного подшипника 4½" двигателя J52P408. Были найдены диагностические признаки, позволяющие обнаружить повреждение узла на ранней стадии развития, за счёт чего предотвращено возникновение аварийных ситуаций с 58 самолётами. Достоверность результатов диагностирования по выявлению

повреждения подшипника 4½" составила 95 % [12, 18]. Сведения о выявлении повреждения других узлов двигателя отсутствуют.

Современные фильтроэлементы с тонкостью фильтрации 15–30 мкм являются одноразовыми и имеют ресурс 600 ч. По последним данным, срок службы фильтроэлементов увеличен до 1000 ч. Понятно, что при периодичности отбора пробы через 1000 ч начало и развитие повреждения могут быть пропущены. Вероятнее всего, в связи с повышенным интересом организаций-эксплуатантов к фильтрационному анализу, фирма Pall разработала специальное фильтрующее устройство, состоящее из диагностического фильтроэлемента со съёмным диагностическим слоем. Такой фильтроэлемент был установлен в двигателе ПС-90А. При этом диагностический слой разделён посередине на две части, которые могут быть последовательно извлечены и использованы для получения и анализа пробы смыва (рисунок).



Фильтроэлемент Pall QA07930-01 с диагностическим слоем Dirt Alert, разделённым на две части

После использования лент промывается непосредственно фильтроэлемент и анализируется смыв. Таким образом, периодичность отбора смыва на анализ сокращается до ~300 ч, тем самым уменьшается вероятность пропуска повреждения. В принципе диагностический слой может быть разделён не на две, а на большее число частей, и тогда периодичность отбора пробы на анализ без замены фильтроэлемента может быть ещё чаще.

Разработчиком системы диагностического фильтра проведено лабораторное моделирование процесса накопления частиц на диагностическом слое и фильтроэлементе [19]. С помощью технологической установки искусственно загрязнённое масло пропускать через фильтроэлемент. Величина массовой доли металлической примеси в каждой диагностической ленте оценивалось по результатам рентгеноспектральных измерений в её начале, середине и конце.

В целом полученные результаты показали целесообразность применения системы диагностического фильтра. Однако были выявлены и проблемы: сложность выбора стандартного образца, идентичного по параметрам частиц анализируемой пробе, а также неравномерность осаждения частиц по длине ленты. Оба названных фактора могут приводить к погрешностям при измерении массовой доли. В дальнейшем разработчиком системы диагностического фильтра планируется:

- повысить точность измерения массовой доли химических элементов (подобрать стандартные образцы идентичные по составу анализируемой пробе);
- снизить предел обнаружения химических элементов с низким атомным номером;

- ввести показатели степени загрязнённости фильтра с увеличением его наработки.

В приведённых примерах отбор частиц с фильтроэлемента осуществлялся через определённое время. При соблюдении условия идентичности стандартного образца осадку на мембране диагностическим признаком являлась величина массовой доли. Однако фильтр является накопителем частиц, и несоблюдение временного промежутка отбора проб на анализ может приводить к погрешностям при измерении массовой доли. Для воздушных судов, которые эксплуатируются в отрыве от базы, соблюдение условия временной периодичности отбора пробы практически невыполнимо.

Для получения пробы смыва с фильтроэлемента QA-07930-01 в [20] было разработано специальное устройство. Диагностическая лента с фильтроэлемента протягивается в ультразвуковой ванне, заполненной смазочным маслом МС-8П, где за счёт кавитации частицы изнашивания переходят с ленты в масло. Далее полученный осадок используется для приготовления аналитической навески и проведения анализа.

Очевидно, что при данном способе получения частиц изнашивания не должны возникать вопросы по представительности пробы. Через 200 ч наработки двигателя готовится проба со второй ленты, при обнаружении внешних признаков проявления повреждения смыв может быть проанализирован досрочно. Ещё через 200 ч, если отсутствуют замечания по двигателю, в лабораторию поступает фильтроэлемент, вынимается фильтрующая лента, помещается в лентопротяжное устройство и готовится очередная проба смыва. Таким образом, задача представительности и периодичности отбора пробы смыва при использовании фильтроэлемента QA-07930-01 до выработки его ресурса может быть успешно решена.

Заключение

Отбор пробы масла из КП и МБ не предусматривает анализ пробы первого слива. Отсутствует доказательство того, что при возникновении повреждения, независимо от его вида развития, вклад крупной фракции (размер частиц более 10 мкм) можно не учитывать при принятии диагностического решения. Тем более, имеются сведения о том, что величина неоднородности распределения частиц по размерам может служить одним из критериев оценки технического состояния двигателя.

Конструктивно система смазки авиационного ГТД выполнена таким образом, что выявить повреждение трансмиссионной части двигателя при эксплуатации авиационной техники по результатам спектрального анализа пробы масла, слитой с КП, представляется маловероятным. Не решает вопрос оценки состояния трансмиссионной части и слив пробы с МБ, поскольку объёмные мелкоячеистые фильтроэлементы снижают величину массовой доли частиц в пробе масла до уровня «холостых» значений.

Фильтроэлемент (маслофильтр) является устройством, накапливающим стружку всех типов от омываемых маслом узлов трения ГТД. Количество осевших частиц на фильтроэлементе значительно превышает количество частиц, находящихся в рабочей жидкости и уловленных МСС, МП и ФС. При анализе пробы смыва необходимо решить задачу по выявлению эффективных диагностических признаков, связывающих параметры частиц, накопленных на фильтроэлементе, с техническим состоянием двигателя. Вопрос периодичности отбора проб смыва может быть решён при использовании фильтроэлемента QA-07930-01 с диагностическим слоем.

Контрольные элементы, установленные на двигателе (МП, МСС, ФС), запаздывают с выявлением повреждения на ранней стадии развития и служат в качестве первичных признаков проявления неисправности. Проблема выявления повреждений на ранней стадии развития при использовании информации, накопленной на контрольных элементах, связана, прежде всего, с недостаточной эффективностью улавливания МСС и МП ферромагнитных частиц и пропуском пара- и диамагнитных частиц.

Сличительные испытания, проведённые для различных типов рентгенофлуоресцентных анализаторов на стандартных образцах и пробах масел, отобранных с испытательных стендов, касались только вопросов сходимости результатов, пересчёта предельных норм и аналитических возможностей используемых анализаторов при измерении массовой доли частиц изнашивания. Вопросы достоверности выявления повреждений узлов ГТД, омываемых смазочным маслом, в зависимости от вида износа, точки отбора не обсуждались. Необходимо продолжить данные работы в направлении диагностических возможностей новой аппаратуры, предлагаемой для оценки состояния узлов маслосистемы ГТД.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников

1. Пайкин А. Г., Сиротин Н. Н., Новиков А. С. Контроль и диагностирование технического состояния газотурбинных двигателей. Москва: Наука, 2007. 469 с.
2. Ямпольский В. И., Белоконь Н. И., Пилипосян Б. Н. Контроль и диагностирование гражданской авиационной техники. Москва: Транспорт, 1990. 182 с.
3. Практическая диагностика авиационных газотурбинных двигателей / Под ред. В. П. Степаненко. Москва: Транспорт, 1985. 102 с.
4. Дроков В. Г., Дроков В. В., Мухутдинов Ф. И. Оценка технического состояния маслосистемы авиационных газотурбинных двигателей с помощью трибодиагностических методов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 1(1). С. 36–46. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-1-I-36-46>
5. Богоявленский А. А. Вопросы обеспечения единства измерений при межведомственных испытаниях спектрометров для трибодиагностики ГТД // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 219, С. 77–84.
6. Чирков Ю. А., Дасковский М. И. Проведение межведомственных испытаний рентгеноспектральных анализаторов «Спектроскан», «Призма», «Х-Арт М» и «БРА-18» // Известия Самарского науч. центра РАН. 2011. Т. 13. № 4(3). С. 900–904.
7. Степанов В. А. Диагностика технического состояния узлов трения трансмиссии газотурбинных двигателей по параметрам продуктов износа в масле. Рыбинск, 2002. 230 с.
8. Кеба И. В. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей. Москва: Транспорт, 1980. 245 с.
9. Дасковский М. И. Обобщение опыта трибодиагностики авиационных ГТД и разработка мер по повышению её эффективности: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. технич. наук. Москва. 2012. 23 с.
10. Коняев В. А., Грядунов К. И., Ардешири Ш., Джафари П. Влияние метода отбора проб масла на диагностирование узла трения // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 206. С. 28–36.
11. Alchimov A. B., Drobot S. I., Drovov V. G., Zarubin V. P., Kazmirov A. P., Skudaev Y. D. The comparative metrological estimation of methods of emission spectral analysis for wear product in aviation oils. *10th International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, COMADEM'97*, Helsinki, Finland, 9–11 Jun 1997, VTT Technical Research Centre of Finland, 1997, vol. 2, pp. 312–321.
12. Wei Hong, Wenjian Cai, Shaoping Wang, Mileta M. Tomovic. Mechanical wear debris, detection, and diagnosis: a review, *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 31, iss. 5, 2018, pp. 867–882. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2017.11.016>
13. Павлинский Г. В., Владимировна Л. И., Дроков В. Г., Степук Т. Д. Рентгенофлуоресцентный контроль неоднородности осадков отработанного масла авиационных двигателей // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. Т. 82. № 2. 2016. С. 40–42.

14. Toms A., Barret M. *Using Filter Debris Analysis To Identify Component Wear In Industrial Applications* [Электронный ресурс]. URL: <https://forms.testoil.com/acton/attachment/4748/f-013d/1/-/-/-/-/ FDA%20White%20paper.pdf> (дата обращения: 01.06.2023).
15. Humphrey G., Rojas I., Churehill D., Cross D. Prototype Instruments Built for PRAM, *Proc. 2002 JOAP International Condition Monitoring Conference*, ed. Humphrey G., JOAP-TSC, Pensacola, FL, Apr 2002.
16. Harrop N., Montagu D. *Early detection of transmission failures through oil system debris assessment*. MCD Booklet, Rolls-Royce, VCOM 4838, 2001 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.scribd.com/document/219160522/MCD-Booklet> (дата обращения: 14.07.2023).
17. TRE-331 Turboprop engine. Woodward fuel control. Study guide, Garrett general aviation services company, 424 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://pdfcoffee.com/tpe-331-pdf-free.html> (дата обращения: 14.07.2023).
18. Gary R. Humphrey. Filter debris analysis by energy dispersive x-ray fluorescence applied to J52P408 engines, 10 p. [Electronic source], available at: http://www.gastopsusa.com/knowledge_center_documents/2/FDA_J52P408_2007_X-Ray.pdf (дата обращения: 25.07.2023).
19. Schindler J., Steves M., Rosenberg G. Lubricant Condition Monitoring Using Filter Debris Analysis. *International Condition Monitoring Conference*, Pensacola, Apr. 18–22, 2004 [Электронный ресурс]. URL: <https://www.machinerylubrication.com/Read/630/filter-debris-analysis> (дата обращения: 25.07.2023).
20. Дроков В. Г., Дроков В. В., Мурыщенко В. В. Мухутдинов Ф. И., Скудаев Ю. Д., Халиуллин В. Ф. Диагностика узлов авиационных газотурбинных двигателей, омываемых смазочным маслом, по результатам анализа пробы смыва с диагностического слоя фильтроэлемента // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2018. Т. 84. № 8. С. 39–43. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-8-39-43>

References

1. Paikin A. G., Sirotin N. N., Novikov A. S. *Kontrol' i diagnostirovanie tekhnicheskogo sostoyaniya gazoturbinnnykh dvigatelei [Monitoring and diagnostics of the technical condition of gas turbine engines]*. Moscow, Nauka Publ., 2007, 469 p. (In Russ.)
2. Yampol'skii V. I., Belokon' N. I., Piliposyan B. N. *Kontrol' i diagnostirovanie grazhdanskoi aviatsionnoi tekhniki [Control and diagnosis of civil aviation equipment]*. Moscow, Transport Publ., 1990, 182 p. (In Russ.)
3. *Prakticheskaya diagnostika aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelei*. Pod red. V. P. Stepanenko [Practical diagnostics of aircraft gas turbine engines. Ed. V. P. Stepanenko]. Moscow, Transport, 1985, 102 p. (In Russ.)
4. Drovov V. G., Drovov V. V., Mukhutdinov F. I. Current state and prospects of increasing the reliability of tribodiagnosics in assessing technical conditions of the oil lubrication systems of gas-turbine aircraft engines, *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 2018, vol. 84, no. 1(I), pp. 36-46. (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-1-I-36-46>
5. Bogoyavlenskiy A. A. The issues of ensuring the uniformity of measurements when conducting the interagency testing spectrometers for tribodiagnosics GTE, *Civil Aviation High Technologies*, 2015, no. 219, pp. 77–84. (In Russ.)
6. Chirkov Yu. A., Daskovskii M. I. Results of inter-departmental tests of X-ray analyzers “Spectroscan”, “Prisma”, “X-art M” and “BRA-18”, *Izvestia of Samara scientific. Center of the Russian Academy of Sciences*, 2011, vol. 13, no. 4(3), pp. 900–904. (In Russ.)
7. Stepanov V. A. *Diagnostika tekhnicheskogo sostoyaniya uzlov treniya transmissii gazoturbinnnykh dvigatelei po parametram produktov iznosa v masle [Diagnostics of the technical condition of the friction units of the transmission of gas turbine engines by the parameters of wear products in oil]*. Rybinsk, 2002, 230 p. (In Russ.)
8. Keba I. V. *Diagnostika aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigatelei [Diagnostics of aircraft gas turbine engines]*. Moscow, Transport Publ., 1980, 245 p. (In Russ.)
9. Daskovskiy M. I. Obobshchenie opyta tribodiagnostiki aviatsionnykh GTD i razrabotka mer po povysheniyu ee effektivnosti [Generalization of the experience of tribodiagnosis of aviation gas turbine engines

and the development of measures to increase its effectiveness]. Autoref. dis. on the nipple. studied. step. cand. technich. sciences. Moscow, 2012, 23 p. (In Russ.)

10. Konyaev E. A., Gryadunov K. I., Ardeshiri Sh., Djafari P. Effect of sampling method on friction unit diagnostics, *Civil Aviation High Technologies*, 2014, no. 206, pp. 28–36. (In Russ.)

11. Alchimov A. B., Drobot S. I., Drovov V. G., Zarubin V. P., Kazmirov A. P., Skudaev Y. D. The comparative metrological estimation of methods of emission spectral analysis for wear product in aviation oils. *10th International Congress and Exhibition on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, COMADEM'97*, Helsinki, Finland, 9–11 Jun 1997, VTT Technical Research Centre of Finland, 1997, vol. 2, pp. 312–321.

12. Wei Hong, Wenjian Cai, Shaoping Wang, Mileta M. Tomovic. Mechanical wear debris, detection, and diagnosis: a review, *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 31, iss. 5, 2018, pp. 867–882.
<https://doi.org/10.1016/j.cja.2017.11.016>

13. Pavlinskii G. V., Vladimirova L. I., Drovov V. G., Stepuk T. D. X-Ray fluorescent control of the inhomogeneity of used oil sludge of aviation engine, *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 2016, vol. 82, no. 2, pp. 40–42. (In Russ.)

14. Toms A., Barret M. *Using Filter Debris Analysis To Identify Component Wear In Industrial Applications* [Electronic source], available at: <https://forms.testoil.com/acton/attachment/4748/f-013d/1/-/-/-/FDA%20White%20paper.pdf> (accessed: 01.06.2023).

15. Humphrey G., Rojas I., Churehill D., Cross D. Prototype Instruments Built for PRAM *Proc. 2002 JOAP International Condition Monitoring Conference*, ed. Humphrey G., JOAP-TSC, Pensacola, FL, Apr 2002.

16. Harrop N., Montagu D. *Early detection of transmission failures through oil system debris assessment*. MCD Booklet, Rolls-Royce, VCOM 4838, 2001 [Electronic source], available at: <https://www.scribd.com/document/219160522/MCD-Booklet> ((accessed: 14.07.2023).

17. TRE-331 Turboprop engine. Woodward fuel control. Study guide, Garrett general aviation services company, 424 p. [Electronic source], available at: <https://pdfcoffee.com/tpe-331-pdf-free.html> (accessed: 14.07.2023).

18. Gary R. Humphrey. Filter debris analysis by energy dispersive x-ray fluorescence applied to J52P408 engines, 10 p. [Electronic source], available at: http://www.gastopsusa.com/knowledge_center_documents/2/FDA_J52P408_2007_X-Ray.pdf (accessed: 25.07.2023).

19. Schindler J., Steves M., Rosenberg G. Lubricant Condition Monitoring Using Filter Debris Analysis. *International Condition Monitoring Conference*, Pensacola, Apr. 18–22, 2004 [Electronic source], available at: <https://www.machinerylubrication.com/Read/630/filter-debris-analysis> (accessed: 25.07.2023).

20. Drovov V. G., Drovov V. V., Muryshchenko V. V., Mukhutdinov F. I., Skudaev Yu. D., Khalioullin V. F. Diagnostics of the units of aviation gas turbine engines washed with lube lubricant according to the results of the flush sample analysis of the diagnostic layer of filter elements, *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 2018, vol. 84, no. 8, pp. 39–43. (In Russ.) <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2018-84-8-39-43>

Информация об авторах

Дроков Виктор Григорьевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, НИИ прикладной физики Иркутского Государственного университета, Иркутск, Россия, spectrosib@gmail.com

Дроков Виктор Владиславович, инженер, НИИ прикладной физики Иркутского Государственного университета, Иркутск, Россия, spectrosib@gmail.com

Мурыщенко Владимир Валерьевич, инженер, НИИ прикладной физики Иркутского Государственного университета, Иркутск, Россия, spectrosib@gmail.com

Блинов Андрей Владимирович, заместитель начальника отдела по специальным видам диагностики, АО «ОДК-Авиадвигатель», Пермь, Россия, blinov-av@avid.ru

Мухутдинов Фарит Ибраевич, начальник бригады специальных видов диагностики, АО «ОДК-Авиадвигатель», Пермь, Россия, muhutdinov@avid.ru

Authors information

Drokov Viktor G., Doctor of Sciences (Engineering), Leading Researcher, Research Institute of Applied Physics, Irkutsk State University, Irkutsk, Russia, spectrosib@gmail.com

Drokov Viktor V., Engineer, Research Institute of Applied Physics, Irkutsk State University, Irkutsk, Russia, spectrosib@gmail.com

Muryshchenko Vladimir V., Engineer, Research Institute of Applied Physics, Irkutsk State University, Irkutsk, Russia, spectrosib@gmail.com

Blinov Andrej V., Deputy Head of the Department for Special Diagnostics, JSC “UEC-Aviadvigatel”, Perm', Russia, blinov-av@avid.ru

Mukhutdinov Farit I., Head of the Team of Special Diagnostics, JSC “UEC-Aviadvigatel”, Perm', Russia, muhutdinov@avid.ru

Статья поступила в редакцию 17.11.22; одобрена после рецензирования 17.07.2023; принята к публикации 25.07.2023.

The article was submitted 17.11.22; approved after reviewing 17.07.2023; accepted for publication 25.07.2023.

Научная статья
УДК 656.7.081

МОДЕЛИРОВАНИЕ СБОЙНОЙ СИТУАЦИИ ОПЕРАТОРА АЭРОДРОМА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА НЕЧЁТКОГО МНОЖЕСТВА ДАННЫХ И СОБЫТИЙ

В. М. РУХЛИНСКИЙ¹, Е. А. КУКЛЕВ², Д. М. МЕЛЬНИК³

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

² *Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации
имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия*

³ *Авиакомпания «РусДжет», Москва, Россия*

Аннотация. Рассматриваются вопросы моделирования сбойной ситуации оператора аэродрома в соответствии со стандартами Международной организации гражданской авиации (ИКАО) по координации планирования мероприятий на случай аварийной обстановки оператора аэродрома. Такое моделирование основывается на применении методов теории нечётких множеств (Fuzzy Sets) при выявлении критических сочетаний элементов в интегрированной производственной системе управления качеством и безопасностью полётов оператора аэродрома. Исследованы вопросы, охватывающие свойства сбоев и способов компенсации их последствий, путём моделирования сбойной ситуации оператора аэродрома на основе построения уравнения катастрофы. Представлены схема решения задачи по моделированию сбойной ситуации в аэропорту и её конкретный пример.

Ключевые слова: гражданская авиация, воздушный транспорт, воздушное судно, моделирование, оператор аэродрома, риск, нечёткое множество, катастрофа, сбойная ситуация, транспортные системы страны

Для цитирования: Рухлинский В. М., Куклев Е. А., Мельник Д. М. Моделирование сбойной ситуации оператора аэродрома на основе анализа нечёткого множества данных и событий // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 43. С. 105–116.

SIMULATION OF A FAILURE SITUATION OF AN AIRDROME OPERATOR BASED ON THE ANALYSIS OF A FUZZY SET OF DATA AND EVENTS

V. M. RUKHLINSKIY¹, E. A. KUKLEV², D. M. MELNIK³

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

² *Saint Petersburg State University of Civil Aviation named in honor of Air Chief Marshal A. A. Novikov,
Saint Petersburg, Russia*

³ *Airline "RusJet", Moscow, Russia*

Abstract. This article considers the simulation issues of an aerodrome operator's failure situation in accordance with the international standards of the International Civil Aviation Organization for coordinating the measures planning in case of an emergency situation for an aerodrome operator. The simulation is based on the application of fuzzy set theory methods in identifying critical combinations of elements in an integrated management system for quality management and flight safety of an aerodrome operator. In this article are

discussed issues the of failures indicators and ways to compensate of their consequences, by modeling the failure situation of the aerodrome operator based on the drafting of the c accident equation. The article presents a scheme of solving the problem of simulation a failed situation at an airport and a specific example.

Keywords: simulation, operator, aerodrome, risk, a fuzzy set, indicators, equation, accident, failure situation, transport systems of the country

For citation: Rukhlinskiy V. M., Kuklev E. A., Melnik D. M. Simulation of a failure situation of an aerodrome operator based on the analysis of a fuzzy set of data and events, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2023, no. 43, pp. 105–116. (In Russ.)

Введение

В транспортной стратегии России¹ уделено особое внимание системам обработки больших объёмов данных и искусственному интеллекту. В частности, сказано: «Прогнозируется, что к 2025 году до 30 процентов данных будут собираться и анализироваться в реальном времени, а в транспорте – применяться для моделирования и оптимизации транспортных потоков, планирования развития транспортной и логистической инфраструктуры, оптимизации ремонтов и технического обслуживания за счёт прогнозирования на основе интеллектуального анализа данных и событий». Интеллектуальный анализ может проводиться на основе двух множеств разного рода показателей, между которыми имеется взаимосвязь. В гражданской авиации (ГА) для этого можно использовать множества показателей систем управления качеством и систем управления безопасностью полётов.

Рассмотрим производственную деятельность оператора аэродрома. Нарушение штатного функционирования процессов оператора аэродрома под действием незапланированных воздействий (возмущений) в рамках системы управления безопасностью полётов (СУБП) следует характеризовать как сбойные ситуации; в этих ситуациях могут возникать риски для безопасности полётов.

В [1] указано, что в ходе развития авиационного происшествия, как правило, возникают дополнительные сложности, связанные с его последствиями. Эти последствия можно прогнозировать путём моделирования сценариев рисков с различными исходами.

В ходе такого моделирования принимающие решения лица могут оценить свои действия, предпринимаемые в условиях различных неизвестных обстоятельств (недостаточной информации), и выбрать из них решения, позволяющие наиболее эффективно распределить ограниченные ресурсы по областям с наибольшими факторами риска.

В статье рассматриваются вопросы, охватывающие свойства сбоев и способов компенсации их последствий путём моделирования сбойной ситуации оператора аэродрома на основе построения «уравнения катастрофы» с использованием анализа большого объёма данных и событий по результатам внутреннего аудита оператора аэродрома в рамках интегрированной системы управления качеством и безопасностью полётов. Данная парадигма соответствует концепции ИКАО по «интегрированному управлению факторами риска» (IRM) [1], которая предлагает производить оценку и интеграцию потребностей и взаимозависимостей функциональных систем. IRM направлено на снижение общего риска на самом высоком уровне соответствующей структуры (в данном случае – поставщика обслуживания ГА), включая все её функциональные системы.

Так как ИКАО конкретных методов IRM не предлагает, цель данной статьи заключается в предложении нового подхода по совершенствованию типовых процедур аудита деятельности

¹ Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года: утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 27.11.2021 № 3363-р.

оператора аэродрома, основанных на международных стандартах ИСО серии 9000², путём анализа результатов мониторинга параметров производственной деятельности оператора аэродрома с применением теории Fuzzy Sets для двух множеств показателей интегрированной системы управления качеством (СУК) и СУБП [2]. Анализ взаимосвязей между показателями позволяет провести моделирование сбойной ситуации, которая может произойти у конкретного оператора аэродрома.

Постановка задачи по моделированию сбойной ситуации на основе теории Fuzzy Sets

В соответствии со стандартами ИКАО [1] управление безопасностью полётов основывается на оценке риска, что предусматривает применение прогностических методов анализа данных о безопасности полётов. При этом вошедшее в практику отечественной ГА понятие риска трактуется как предполагаемые вероятность и тяжесть последствий проявления факторов опасности³. Буквальное понимание термина «вероятность» в определении риска, которое в настоящий момент принято в отечественной ГА, вносит дополнительную неопределённость в рассмотрение вопросов управления безопасностью полётов. В англоязычном варианте стандарта ИКАО [3] понятие «вероятность» принято обозначать английским словом «probability», при этом в английском языке слово «probability» часто понимают в узком математическом смысле.

В то же время в соответствии со стандартом⁴ «вероятность» и «возможность» имеют одинаковый смысл, что означает шанс того, что что-то может произойти, независимо от того, установлено ли это, оценено или определено объективно или субъективно, качественно или количественно, и описывается ли с помощью общих понятий или математически. Это объясняется тем, что английское слово «likelihood», означающее «возможность», не имеет прямого перевода на некоторые языки. Поскольку официальными языками ИКАО являются: английский, русский, французский, арабский, испанский, китайский, значение термина «probability» в английской версии [3] имеет более широкий смысл, чем просто «вероятность» именно потому, что английский термин «likelihood» не имеет прямого перевода на языки ИКАО. Более того, при буквальном восприятии слова «probability» попытки определить вероятность события в сложных и надёжных системах поставщиков услуг ГА не имеют практического смысла, поскольку отсутствие достоверной статистики по прогнозируемому событию сводит все риски к нулю, что порой явно указывает на ошибочный расчёт риска и усложняет мероприятия по управлению безопасностью полётов ВС.

Таким образом, риск сбойной ситуации поставщика услуг ГА представляет собой прогнозируемую комбинацию последствий и их возможности проявления.

У поставщика услуг ГА существует множество показателей, связанных так или иначе с безопасностью полётов ВС, мощность [4] (количество) этих показателей велика: $M_{\Sigma} \gg 100$. Оценка большого множества показателей в сложной интегрированной системе поставщика услуг ГА ограничивается недостаточной статистикой, которая формируется при эпизодических сеансах аудита и мониторинга производственной системы. В этом случае интегральные уровни показателей из множества M_{Σ} являются *нечёткими* и их анализ возможен при применении методов многокритериальных оценок разного рода показателей с целью определения условий, при которых возможна сбойная ситуация в производственной системе [4].

² ГОСТ Р ИСО 9001-2015. Системы менеджмента качества. Требования.

³ Об утверждении Правил разработки и применения систем управления безопасностью полётов воздушных судов, а также сбора и анализа данных о факторах опасности и риска, создающих угрозу безопасности полётов гражданских воздушных судов, хранения этих данных и обмена ими в соответствии с международными стандартами Международной организации гражданской авиации и признании утратившими силу некоторых актов Правительства Российской Федерации: Постановление Правительства Российской Федерации от 12.04.2022 № 642.

⁴ ГОСТ Р ИСО 31000-2019. Менеджмент риска. Принципы и руководство.

Рассматривая величину риска сбойной ситуации как комбинацию возможности и последствия, можно использовать для обозначений элементы булевой алгебры 0 (сбой не наступил) и 1 (наступление сбоя). Логическая сумма факторов опасности, которая может привести к сбойной ситуации, окажется равной 1 [5]. В этом случае вполне корректно может решаться задача по определению риска в интегрированной системе управления качеством и безопасностью полётов поставщика услуг ГА, включая оператора аэродрома.



Рис. 1. Модель сбойной ситуации

На рис. 1 представлена модель сбойной ситуации, характеризующая её свойства, где $\hat{R}(IRM)$ – интегрированный уровень риска, в соответствии с концепцией IRM ИКАО, L_R – структура цепи сценария, U_R – условие сбойной ситуации. Условие $U_R = 0$ соответствует приемлемому уровню риска (или допустимому), условие $U_R = 1$ соответствует неприемлемому уровню риска.

Схема решения задачи по моделированию сбойной ситуации оператора аэродрома

Задача по анализу нечёткого множества показателей оператора аэродрома, связанных с безопасностью полётов, может быть успешно решена в интегрированной производственной системе управления качеством и безопасностью полётов с использованием теории нечётких множеств Fuzzy Sets.

На рис. 2 представлена схема интеграции СУК и СУБП на типовом предприятии ВТ [6], которая легла в основу разработки метода выявления критических элементов производственной системы оператора аэродрома. Поскольку сценарий сбойной ситуации представляет собой некоторую цепь возможных отклонений (незапланированных воздействий), максимальный вред по итогу такого сценария может привести к катастрофе [7]. Поэтому в основе моделирования сбойной ситуации с целью анализа её условий будет лежать «уравнение катастрофы».

Указанное уравнение является конечной формой моделирования сбойной ситуации, что позволяет заранее, до возникновения условий катастрофы, производить упреждающие мероприятия для исключения сбойной ситуации в производственной деятельности оператора аэродрома.

Физический смысл сбойной ситуации представляет собой бифуркацию (разрыв) процесса (см. рис. 1), при которой получение намеченного результата становится невозможным. В эксплуатационном контексте производственная система имеет определённый уровень риска. В ГА принято разделять уровень риска на три вида: приемлемый, допустимый и неприемлемый. Бифуркация процесса возможна в условиях неприемлемого риска производственной системы. Границу неприемлемого уровня риска можно представить в виде набора значений критических элементов производственной системы \hat{K}_{Σ^*} в интегрированной системе (СУК и СУБП). При этом,

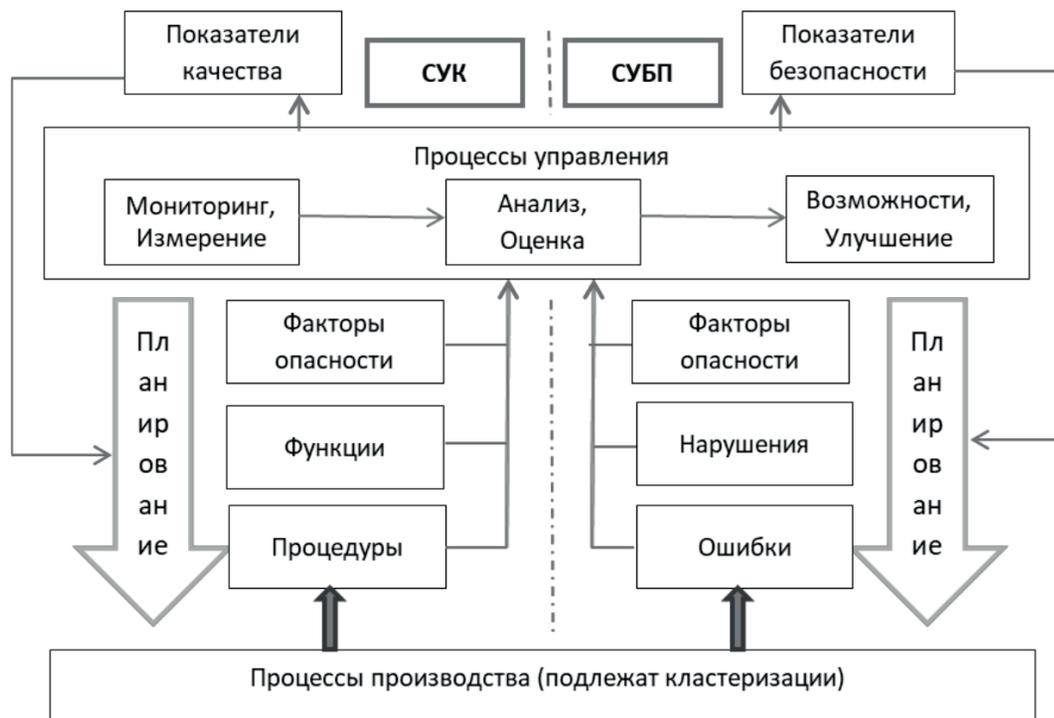


Рис. 2. Схема интеграции СУК и СУБП на типовом предприятии ВТ

с точки зрения обеспечения безопасности полётов, указанный набор значений критических элементов необходимо определять до возникновения условий сбойной ситуации для своевременного принятия необходимых корректирующих мероприятий. Таким образом, задача по выявлению критических элементов производственной системы оператора аэродрома должна решаться в условиях неопределённости (недостаточности информации), что в современных, сложных производственных системах возможно только при применении теории Fuzzy Sets.

При такой постановке задачи обеспечение безопасности полётов осуществляется на основе риск-ориентированного подхода, при котором в интегрированной системе СУК и СУБП на производстве оператора аэродрома следует сначала найти множество комплексных показателей интегрированной системы (\tilde{K}_Σ), а затем среди них выделить критические значения \tilde{K}_{Σ^*} :

$$\tilde{K}_\Sigma = \tilde{f}_{01}(\{I_Q\}, \{I_S\} | \Sigma_0, \Phi_0, \Phi_1, \hat{R}) \rightarrow \tilde{K}_{\Sigma^*},$$

где $\{I_Q\}, \{I_S\}$ – множество индикаторов качества и безопасности полётов, \hat{R} – интегрированный уровень риска в интегрированной системе СУК и СУБП, Φ_0 – множество факторов опасности, связанных с качеством, Φ_1 – множество факторов опасности, связанных с безопасностью полётов, Σ_0 – условия производственной системы.

Таким образом, в качестве основы моделирования сбойной ситуации на предприятии ВТ применена интеграция двух систем управления оператора аэродрома, а именно СУК и СУБП. В ходе указанной интеграции можно определить критические элементы производственной системы ($\tilde{K}_\Sigma \rightarrow \tilde{K}_{\Sigma^*}$). При этом наличие СУК (Q) и СУБП (S) у оператора аэродрома обуславливается необходимостью соблюдения обязательных требований в области отечественной ГА в отношении оператора аэродрома⁵. В этом случае показатели качества устанавливаются в виде

⁵ Федеральные авиационные правила. Требования к операторам аэродромов гражданской авиации. Форма и порядок выдачи документа, подтверждающего соответствие операторов аэродромов гражданской авиации требованиям федеральных авиационных правил, утверждённые приказом Минтранса России, от 25 сентября 2015 г. № 286.

степени выполняемости процедур (функций), показатели безопасности полётов устанавливаются в форме незапланированных «выходных данных» процессов (ошибки, нарушения, отказы, аварии, травмы).

Составление уравнения катастрофы оператора аэродрома

Уравнение катастрофы оператора аэродрома конструируется по методу минимального сечения – в виде конъюнкций критических элементов производственной системы, приводящих к отклонениям от установленных процедур либо к уязвимости системы под воздействием внешних факторов:

$$\hat{R} \rightarrow L_R \Rightarrow U_R = (\beta_1 \wedge \beta_2 \wedge \beta_3 \wedge \dots \wedge \beta_i) = 1,$$

где \hat{R} – нечёткий уровень риска производственной системы, β_i – критический элемент производственной системы с порядковым номером i .

Условие $U_R = 1$ означает возникновение катастрофы.

Критические элементы – это такие элементы производственной системы, цепочка из которых может привести к неблагоприятному событию. Критические элементы определяются путём вычисления комплексных показателей интегрированной системы управления качеством и безопасностью полётов, включающей в себя показатели качества Q и показатели безопасности полётов S . Единый комплексный показатель интегрированной системы $\tilde{K}_{Q,S}$ получил название нечёткого многокритериального показателя эффективности, поскольку степень достоверности значения показателя является нечёткой и оценивается в пределах: $0 \leq \tilde{K}_{Q,S} \leq 1$.

Набор нечётких многокритериальных показателей эффективности (НМПЭ) интегрированной системы будет представлять собой уровень риска. Набор максимальных значений НМПЭ представляет собой фактический риск производственной системы. Критичность НМПЭ определяется в соответствии с матрицей оценки нечёткого уровня риска в условиях неопределённости [6] (табл. 1). Данная матрица разрабатывается экспертным методом, применимым к условиям оператора аэродрома.

Таблица 1

Матрица оценки нечёткого уровня риска возникновения опасных событий

Оценка нечёткого уровня риска (\hat{R}) возникновения опасных событий		Категория ущерба				
		A	B	C	D	E
Степень опасности	Множитель	1	0,8	0,6	0,4	0,2
1-я	1	1	0,8	0,6	0,4	0,2
2-я	0,8	0,8	0,64	0,48	0,32	0,16
3-я	0,6	0,6	0,48	0,36	0,24	0,12
4-я	0,4	0,4	0,32	0,24	0,16	0,08
5-я	0,2	0,2	0,16	0,16	0,08	0,04

В данном примере значение приемлемых нечётких уровней рисков варьируется в пределах 0,01–0,24 (бледно-серый цвет), допустимые уровни рисков – от 0,32 до 0,64 (серый) и неприемлемые (катастрофические) уровни – от 0,8 до 1 (тёмно-серый).

Критичность элементов определяется соотношением:

$$\tilde{K}_{Q,S}^* \geq 0,8.$$

Математический аппарат (метод) по поиску критических элементов неопределённости интегрированной системы управления качеством и безопасностью полётов поставщика обслуживания ГА включает следующие этапы:

- разделение (расщепление) показателей поставщика обслуживания ГА на показатели качества и показатели безопасности полётов $M_{\Sigma} \sim (M_Q, M_S)$;
- кластеризация интегрированной системы $M_{\Sigma} = \{M_1, M_2, M_3, \dots, M_n\}$ оператора аэродрома по функциональным признакам;
- установление порядка непрерывного мониторинга процессов оператора аэродрома, предусматривающего периодический (через определенный период) срез показателей;
- включение показателей качества и показателей безопасности полётов в единую строку матрицы для непрерывного мониторинга;
- нормирование показателей качества и показателей безопасности полётов в топологическое пространство данных факторов опасности $\{I_Q, I_S\} \Rightarrow \{\varphi_Q, \varphi_S\} \rightarrow [0, 1]$;
- определение корреляционных связей значений парных показателей опасности в форме нечёткого многокритериального показателя эффективности $\hat{K}_{Q,S} \sim \tilde{K}_{Q,S} = (I_Q, I_S | M_Q, M_S, \hat{R})$;
- определение степени последствий обнаруженных критических элементов производственной системы оператора аэродрома с использованием матрицы оценки рисков;
- проверка результатов вычислений с использованием «адаптивного скольжения» и (или) «сравнения» по принципу «корреляция строк одинаковой размерности»;
- составление уравнения катастрофы в виде конъюнкций критических элементов, соответствующих цепи сценария сбойной ситуации;
- проведение корректирующих мероприятий на основе риск-ориентированного подхода;
- проверка эффективности корректирующих мероприятий путём повторного аудита и вычисления многокритериальных показателей эффективности элементов системы поставщика обслуживания ГА.

Ценность моделирования сбойной ситуации для оператора аэродрома

Сбойная ситуация оператора аэродрома представляет собой внезапно возникшую, незапланированную ситуацию или событие, требующее незамедлительных действий. Координация планирования мероприятий на случай аварийной обстановки является неотъемлемой частью концептуальных рамок СУБП, установленных в [3], и предполагает планирование действий, которые будут предприняты в ограниченный период времени в ходе незапланированной авиационной аварийной эксплуатационной ситуации. При этом сценарии, при которых возможна бифуркация процессов оператора аэродрома, должны быть неотъемлемой частью плана мероприятий на случай аварийной обстановки [3]. Моделирование плана развития сбойной ситуации целесообразно проводить на основе «уравнения катастрофы» конкретного оператора аэродрома. В этом случае практически будет произведён переход от штатных к аварийным ситуациям и наоборот, что позволит провести анализ возможностей персонала по своим действиям и взаимодействию между собой и подразделениями по функционированию при сбойной ситуации. Указанный анализ может выявить риски, способствующие возникновению сбойной, аварийной ситуации. Таким образом, крайне важно разрабатывать сценарий (легенду события), который может действительно произойти в производственной системе оператора аэродрома.

В соответствии с обязательными требованиями по аварийно-спасательному обеспечению, оператор аэродрома разрабатывает План мероприятий на случай аварийной обстановки на аэродроме и в районе аэродрома. В рамках данного Плана оператор аэродрома проводит учения: полномасштабные (один раз в год), ограниченного масштаба (один раз в полгода) и штабные (один раз в полгода), с целью обучения сотрудников, оценки эффективности новых технологий и выявления проблем оперативного характера, таких, как недостаточное количество оборудования,

неверное взаимодействие или распределение полномочий и ответственности⁶. Эти учения предполагают и оценку показателей качества оператора аэродрома в форме определения степени выполняемости функций персонала и подразделений. Следовательно, эффективным способом оценки будет являться отработка сценария наиболее возможной сбойной ситуации в рамках реализации Плана мероприятий на случай аварийной обстановки на аэродроме и в районе аэродрома. Это, в свою очередь, можно реализовать, используя моделирование на основе метода выявления критических элементов, путём анализа нечёткого множества показателей качества и безопасности полётов оператора аэродрома.

Пример моделирования сбойной ситуации оператора аэродрома

Критические элементы производственной системы следует искать во множестве показателей качества, поскольку формирование совокупности взаимосвязанных процессов, процедур и функций оператора аэродрома, приводящих к сбоям в системе, происходит до возникновения условий сбойных ситуаций. Таким образом, реализуется проактивная модель обеспечения безопасности полётов ВС на основе оценки приемлемого уровня риска производственной системы:

$$\hat{R} \rightarrow (\beta_1^* \wedge \beta_2^* \dots \beta_i^*) \subset \sum_{i=1}^n \beta_i \subset M_Q.$$

Практическое применение метода, описанного в данной статье, основано на результатах внутреннего аудита. В настоящее время в отечественной ГА правила типового аудита производственной деятельности предприятия ВТ не предусматривают определение критичности выявленных несоответствий. Анализ нечёткого множества двух разного рода показателей при проведении аудита производственной деятельности с использованием метода, описанного в данной статье, позволяет определять критичность элементов производственной системы предприятия ВТ [8].

Рассмотрим условный вариант выявления критических элементов производственной системы оператора аэродрома. К примеру, производственная система оператора аэродрома имеет 165 показателей качества ($M_Q = 165$) и 92 показателя безопасности полётов ($M_S = 92$) [9]. Принимается, что $\beta \Leftrightarrow Q$. В ходе проведённого аудита оператора аэродрома было выявлено 20 несоответствий, которые можно представить в виде:

$$M_Q \subset M_{Q^*} = \{Q_9, Q_{15}, Q_{17}, Q_{19}, Q_{29}, Q_{36}, Q_{44}, Q_{51}, Q_{52}, Q_{54}, Q_{61}, Q_{74}, Q_{94}, Q_{107}, Q_{111}, Q_{141}, Q_{155}, Q_{156}, Q_{157}, Q_{158}\}.$$

С использованием изложенного метода и на основе матрицы оценки нечёткого уровня рисков возникновения опасных событий (табл. 1) ранжированы выявленные в ходе аудита элементы производственной системы M_{Q^*} по уровню опасности, где $M_{Q^*}^{**}$ – критические элементы (табл. 2).

Таблица 2

Уровни риска оператора аэродрома

Критичность	Нечёткий многокритериальный показатель эффективности	Производственные элементы	Уровень риска
$M_{Q^*} \subset M_{Q^*}^{**}$	$\tilde{K}_{Q,S} = \{0,81-1\}$	$\{Q_{19}, Q_{54}, Q_{61}, Q_{107}, Q_{157}\}$	Неприемлемый $\hat{R} \rightarrow L_R \Rightarrow U_R = 1$

⁶ Федеральные авиационные правила. Аварийно-спасательное обеспечение полётов воздушных судов, утверждённые приказом Минтранса России от 26.11.2020 № 517.

Окончание таблицы 2

Критичность	Нечёткий многокритериальный показатель эффективности	Производственные элементы	Уровень риска
$M_{Q^*} \subset M_{Q^*}^*$	$\tilde{K}_{Q,S} = \{0,21-0,8\}$	$\{Q_9, Q_{51}, Q_{94}, Q_{111}, Q_{156}, Q_{158}\}$	Допустимый $\hat{R} \rightarrow L_R \Rightarrow U_R = 0$
$M_{Q^*} \subset M_{Q^*}^*$	$\tilde{K}_{Q,S} = \{0-0,2\}$	$\{Q_{15}, Q_{17}, Q_{29}, Q_{36}, Q_{44}, Q_{52}, Q_{74}, Q_{141}, Q_{155}\}$	Приемлемый $\hat{R} \rightarrow L_R \Rightarrow U_R = 0$

Таким образом, уравнение катастрофы оператора аэродрома можно записать в виде:

$$\hat{R} \rightarrow L_R \Rightarrow U_R = (Q_{19} \wedge Q_{54} \wedge Q_{61} \wedge Q_{107} \wedge Q_{157}) = 1.$$

В соответствии со структурой цепи сценария была составлена легенда возможного события оператора аэродрома.

08.07.2022 в процессе выполнения руления на аэродроме N в 12.30 ВС RA-XXXXX, принадлежность ООО АК «N», выполнявшее рейс XXX по перевозке груза, из-за плохой видимости разметки руления не смогло самостоятельно развернуться для продолжения руления с MC X по РД X на TWY X (*критический элемент* Q_{61}). Экипаж ВС запросил буксир. Буксир прибыл через 40 мин в 13.10 (*критические элементы* Q_{107} и Q_{157}). Еще через 10 мин в 13.20 ВС смогло продолжить руление и заняло исполнительный старт ВПП XX в 13.33. Через 2 мин после взлёта экипаж ВС доложил о наличии сильной турбулентности, после чего связь с ВС пропала (*критический элемент* Q_{54}). Была объявлена готовность службы СПАСОП. В 13.50 поступила информация от МЧС о том, что в 2 км севернее аэродрома местный житель видел жёсткое приземление ВС на поле. Спасательные службы прибыли на место посадки в 14.35. Экипаж 2 чел. имеют травмы средней тяжести. На земле пострадавших нет. Имеется разлив топлива из правого полукрыла, возгорания нет. На борту находится опасный груз категории А4 (легковоспламеняющиеся твёрдые вещества). Экипаж ВС был направлен на машине скорой медицинской помощи в городскую больницу. ВС имеет значительные повреждения (имеются большие разрывы в хвостовой части фюзеляжа).

Метеорологические условия аэродрома на момент взлёта: ветер у земли $330^\circ - 3$ м/с, облачность сплошная 7 баллов, местами кучево-дождевая, нижняя граница 750 м, температура у земли 18°C , атмосферное давление в районе аэродрома 753 мм рт. ст., в облаках умеренная турбулентность.

В 14.50 дежурный расчёт СПАСОП (служба противопожарного аварийно-спасательного обеспечения полётов) организовал оцепление места посадки ВС. Были предприняты мероприятия согласно ПРАПИ-98⁷.

В ходе осмотра грузовой кабины ВС было установлено смещение грузового контейнера массой 5 т к хвостовой части самолёта (*критический элемент* Q_{19}).

Авиационное событие классифицировано как авария ВС, согласно ПРАПИ-98 назначено расследование.

В ходе предварительного расследования установлено, что причиной аварии явилось смещение грузового контейнера в грузовом салоне к хвостовой части фюзеляжа из-за неправильной швартовки груза в момент попадания ВС в условия сильной турбулентности после взлёта.

⁷ Правила расследования авиационных происшествий и инцидентов с гражданскими воздушными судами в Российской Федерации, утверждённые Постановлением Правительства Российской Федерации от 18 июня 1998 г. № 609.

Заключение

Предложенный авторами вариант моделирования сбойной ситуации, основанный на определении критических сочетаний элементов систем управления качеством и безопасностью полётов оператора аэродрома, позволяет применить риск-ориентированный подход и разработать эффективные мероприятия по управлению риском по результатам тренировки сбойной ситуации [10]. Моделирование с использованием уравнения катастрофы носит научный характер и предполагает топологический анализ связанности показателей из множества M_{Σ} , что в свою очередь представляет собой интеллектуальный анализ данных и может использоваться как основа для реализации искусственного интеллекта при решении вопросов безопасности полётов.

Топологический анализ связанности нечёткого множества показателей интегрированной системы управления качеством и безопасностью полётов исключает вероятностный подход при оценке риска, что в свою очередь указывает на необходимость внесения изменений в Постановление Правительства Российской Федерации от 12.04.2022 № 642 в части изменения определения термина «риск» на более широкий термин, заменив в нём понятие «вероятность» на «возможность», с целью гармонизации терминологии по управлению риском в отечественной гражданской авиации.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников

1. Doc 9859 ИКАО. Руководство по управлению безопасностью полётов. 4-е изд. ИКАО. 2018. 216 с.
2. Мельник Д. М. Принципы интеграции системы управления качеством и системы управления безопасностью полётов в авиационном предприятии // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2015. № 6. С. 47–50.
3. Приложение 19 к Конвенции о международной организации гражданской авиации. Управление безопасностью полётов. ИКАО. Изд. 2. 2016. 47 с.
4. Kuklev E. et al. Flight Safety & Aviation Risk, Singapore, Springer, 2019, 258 p.
5. Рябинин И. А., Черкесов Г. Н. Логико-вероятностные методы исследования надёжности структурно-сложных систем. Москва: Радио и связь, 1981. 264 с.
6. Мельник Д. М. Метод выявления критических сочетаний элементов систем качества и безопасности полётов при аудите и мониторинге деятельности авиационного предприятия на основе нечёткого многокритериального показателя эффективности: дис. канд. техн. наук. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, 2022. 142 с.
7. Рожнов В. В., Мельник Д. М. Оценка состояния безопасности полётов при развитии производственной системы оператора аэродрома Абакан // Качество и жизнь, 2022. № 3. С. 53–58. <https://doi.org/10.34214/2312-5209>
8. Куклев Е. А., Мельник Д. М., Коникова Е. В. Поиск критических элементов авиационных систем на примере оператора аэродрома // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2020. № 3. С. 5–15. <https://elibrary.ru/xigcid>
9. Малинецкий Г. Г., Кульба В. В., Косяченко С. А., Шнирман М. Г. и др. Управление риском. Риск. Устойчивое развитие. Синергетика. Москва: «Наука», 2000. 431 с.
10. Рухлинский В. М., Куклев Е. А., Мельник Д. М. Применение теории нечётких множеств при обеспечении безопасности полётов поставщиков обслуживания гражданской авиации в условиях неопределённости состояний авиационной системы: Информационный документ Межгосударственного

авиационного комитета на 41 ассамблею Международной гражданской авиации (ИКАО) A41-WP/72, 2022. URL: https://www.icao.int/Meetings/a41/Documents/WP/wp_072_ru.pdf (дата обращения: 31.07.2023).

References

1. DOC 9859 ICAO. *Safety Management Manual*, 4th ed., 2018, 180 p.
2. Melnik D. M. Principles of integration of the quality management system and the flight safety management system in an aviation enterprise. *Transport of the Russian Federation. Journal of science, practice, economics*, 2015, no. 6, pp. 47–50. (In Russ.)
3. Annex 19 to the Convention on International Civil Aviation. Safety Management, ICAO, Second edition, 2016, 44 p.
4. Kuklev E. et al. *Flight Safety & Aviation Risk*, Singapore, Springer, 2019, 258 p.
5. Ryabinin I. A. Cherkosov G. N. *Logiko-veroyatnostnye metody issledovaniya nadyozhnosti strukturno-slozhnyh sistem*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1981, 264 p. (In Russ.)
6. Melnik D. M. *Metod vyavleniya kriticheskikh sochetanij ehlementov sistem kachestva i bezopasnosti polyotov pri audite i monitoringe deyatelnosti aviatsionnogo predpriyatiya na osnove nechyotkogo mnogokriterial'nogo pokazatelya ehffektivnosti*: Diss. kand. tekhn. nauk [A method for identifying critical combinations of elements of quality and safety systems in the audit and monitoring of the activities of an aviation enterprise based on a fuzzy multi-criteria performance indicator. Cand. techn. sci. diss.], St. Petersburg State University of Civil Aviation, 2022, 142 p. (In Russ.)
7. Rozhnov V. V., Melnik D. M. Flight safety assessment in the development of Abakan Airfield operator production system, *Quality and Life*, 2022, no. 3, pp. 53–58. (In Russ.) <https://doi.org/10.34214/2312-5209>
8. Kuklev E. A., Melnik D. M., Konikova E. V. Search for critical elements of aviation systems using the example of an aerodrome operator, *Vestnik of the St. Petersburg State University of Civil Aviation*, 2020, no. 3, pp. 5–15. (In Russ.)
9. Malinetsky G. G., Kulba V. V., Kosyachenko S. A., Shnirman M. G. etc. *Upravlenie riskom. Risk. Ustojchivoe razvitie. Sinergetika [Risk management. Risk. Sustainable development. Synergetics]*. Moscow, Nauka Publ., 2000, 431 p. (In Russ.)
10. Rukhlinskiy V., Kuklev E., Melnik D. Application of the fuzzy sets theory for ensuring flight safety of the civil aviation service providers in the conditions of the uncertainty statuses of the aviation system. Information paper, A41-WP/72, 2022, available at: https://www.icao.int/Meetings/a41/Documents/WP/wp_072_en.pdf (accessed: 31.07.2023).

Информация об авторах

Рухлинский Виктор Михайлович, доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия, icaoiac@mail.ru

Куклев Евгений Алексеевич, доктор технических наук, профессор, директор центра экспертиз проектов, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия, ekuklev@mail.ru

Мельник Дмитрий Михайлович, кандидат технических наук, заместитель генерального директора по безопасности полётов – начальник инспекции по безопасности полётов, Авиакомпания «РусДжет», Москва, Россия, melnikdm@mail.ru

Authors information

Rukhlinskiy Victor M., Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia, icaoiac@mail.ru

Kuklev Evgeny A., Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Director of the Center for Expertise of Projects, Saint Petersburg State University of Civil Aviation named in honor of Air Chief Marshal A. A. Novikov, Saint Petersburg, Russia, ekuklev@mail.ru

Melnik Dmitry M., Candidate of Sciences (Engineering), Deputy General Director for Flight Safety – Head of the Flight Safety Inspection, Airline “RusJet”, Moscow, Russia, melnikdm@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13.02.2023; одобрена после рецензирования 28.07.2023; принята к публикации 04.08.2023.

The article was submitted 13.02.2023; approved after reviewing 28.07.2023; accepted for publication 04.08.2023.

Научная статья
УДК 656.078.12

СЛОЖНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ: СФОРМИРОВАВШИЕСЯ ПОНЯТИЯ И СОВРЕМЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ

М. И. МАЛЫШЕВ

*Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия*

Аннотация. Технические и технологические новшества оказывают влияние на развитие транспортных систем страны. В результате формируются комплексные структуры, отличные от существовавших ранее. Для правильного понимания формирующихся в результате глубокой цифровой трансформации и интеллектуализации современных транспортных систем, учитывая изменение целей транспорта, необходимо систематизировать существующие понятия и сформулировать актуальное определение транспортной системы. Отсутствие возможности обработки всего объема информации, связанной с выполнением задач управления транспортным производством, исключительно с помощью человеческого интеллекта вызывает необходимость задействовать интеллектуальные экспертные компьютерно-программные комплексные структуры. Это относит формирующиеся транспортные системы к более сложным по сравнению с существующими. В процессе исследования рассмотрены существующие понятия, определены объективные признаки, сформулировано и логически выверено современное определение сложной транспортной системы. Выявлено, что в сложных транспортных системах над естественными задачами транспортировки доминируют национальные, стратегические, социальные и другие цели высших систем, а выполнение некоторых операций возможно только с помощью интеллектуальных инструментов. Представлена графическая интерпретация и обозначено место сложных транспортных систем в экономике государства. Результаты исследования могут быть использованы при формировании транспортных коридоров, совершенствовании процессов транспортировки грузов и перевозки пассажиров.

Ключевые слова: определение транспортных структур, фундаментальные понятия транспорта, интеллектуальные транспортные системы, транспортные системы страны, развитие транспортной отрасли, модель сложной транспортной системы

Для цитирования: Малышев М. И. Сложные транспортные системы: сформировавшиеся понятия и современное определение // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 43. С. 117–126.

COMPLEX TRANSPORT SYSTEMS: FORMED CONCEPTS AND MODERN DEFINITION

M. I. MALYSHEV

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

Abstract. Technical and technological innovations have an impact on the development of the country's transport systems. As a result, complex structures are formed that differ from those that existed before. In order to properly understand the modern transport systems formed as a result of deep digital transformation and intellectualization, taking into account the changing goals of transport, it is necessary to systematize existing

concepts and formulate an up-to-date definition of the transport system. The lack of the ability to process the entire volume of information related to the performance of transport production management tasks exclusively with the help of human intelligence makes it necessary to use intelligent expert computer-software complex structures. This makes the emerging transport systems more complex than the existing ones. In the course of the research, existing concepts are considered, objective features are determined, the modern definition of a complex transport system is formulated and logically verified. It has been revealed that in complex transport systems, national, strategic, social and other goals of higher systems dominate over natural transportation tasks, and some operations can only be performed with the help of intelligent tools. A graphical interpretation is presented and the place of complex transport systems in the economy of the state is indicated. The results of the study can be used in the formation of transport corridors, improving the processes of cargo transportation and passenger transportation.

Keywords: definition of transport structures, fundamental concepts of transport, intelligent transport systems, transport systems of the country, development of the transport industry, model of a complex transport system

For citation: Malyshev M. I. Complex transport systems: formed concepts and modern definition, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2023, no. 43, pp. 117–126. (In Russ.)

Введение

Транспортная инфраструктура, включая пути сообщения и коммуникации, предприятия, участвующие в процессах обеспечения транспортировки пассажиров и грузов и обслуживания инфраструктуры, транспортные средства и оборудование, обеспечивающие транспортный процесс, правовые нормы функционирования, технологии и средства управления, непрерывно совершенствуются. Этим обеспечивается соответствие транспортных систем актуальным задачам отрасли, представляющей собой сочетание всех субъектов, задействованных в производстве продукции и оказании услуг транспорта для удовлетворения запросов заинтересованных потребителей, и мировым тенденциям научно-технического прогресса.

Формирование транспортных систем осуществляется в процессе их развития, уровень которого в определённый период сопоставим с технологическим укладом. В разное время на транспортные системы значительное влияние оказали технические и технологические новшества, социально-экономические и политические процессы, распространявшиеся последовательно, параллельно или взаимосвязано, например, глобализация экономики, объединение государств в экономические союзы, логистическая деятельность, мультимодальные перевозки с использованием интермодальных технологий, развитие средств транспорта и прочее. Вследствие эволюционного развития транспортные системы претерпели глобальные изменения, пройдя путь от элементарных процессов перевозки, задействовавших в основном гужевой и водный транспорт, до современных, объединяющих все виды магистрального транспорта, упорядоченных взаимосвязанных структур.

Процесс функционирования и совершенствования транспортных систем неизменно направлен на обеспечение связи между экономическими и социальными субъектами путём выполнения перевозки пассажиров и грузов [1].

Переход к глубокой цифровой трансформации сопутствующих транспортировке процессов, непосредственно связанных с перевозкой, и построение интеллектуальных транспортных сетей, уплотнение взаимосвязи со смежными отраслями экономики через управленческие, технологические и информационные процессы, ориентация на принципы стратегического развития национального транспортного комплекса, включающие развитие опорной сети каждого вида транспорта и интеграцию в единую опорную сеть, многонаправленное развитие транспортных услуг, технологическое и кадровое развитие, применение интегрированных сервисов создают предпосылки формирования транспортных систем, значительно отличающихся от существующих на данный момент.

Для правильного понимания архитектуры формирующейся транспортной системы, осознания новых процессов, проистекающих внутри системы, и подтверждения корректного направления вектора развития необходимо систематизировать и определить основу уже имеющихся знаний, очертить границы области влияния и понять её суть, как объекта управления.

В научной сфере также нельзя ограничиваться существующими понятиями. Такие понятия устаревают, перестают быть актуальными, но являются фундаментом для формирования современных определений, которые формулируются путем трансформации существующих понятий с учётом новых глобальных изменений.

В соответствии со структурой научных революций каждые двадцать пять лет происходит смена парадигмы. Распространённые понятия транспортных систем формировались в процессе перехода страны к рыночной экономике. В настоящее время экономическая модель государства меняется. Неотвратимое влияние на все отрасли экономики, в том числе транспортную, оказывают процессы цифровизации информации и интеллектуализации управления. Транспорт переходит на новую ступень развития, что требует пересмотра устаревших понятий сложных транспортных систем.

Современное определение отражает реальные важнейшие свойства, закономерные связи и отбрасывает несущественное, не относящееся к рассматриваемому объекту. В результате складывается связанная логическая система, передается уточнённый смысл, что приводит к полноценному научному знанию.

Для науки имеют значения и неточные, переходные понятия и определения. Формирующиеся на первых порах преобразования или становления предмета исследования, предварительные формулировки способствуют научному продвижению.

Сформировавшиеся понятия и современное определение наделяет специалистов и учёных фундаментальным пониманием современных сложных транспортных систем и позволяет совершенствовать текущие транспортные процессы.

Для обеспечения опережающего развития важно инициировать процесс образования новых понятий, особенно в высокотехнологических областях с высоким инновационным потенциалом, к которым относится и транспорт.

Целью исследования является оценка существующих понятий и формулирование современного понимания сложных транспортных систем.

Для достижения поставленной цели необходимо выяснить, чем в настоящее время являются сложные транспортные системы, что их определяет и какие первоначальные их типы существуют.

Для выполнения поставленных задач аккумулированы результаты ранее выполненных исследований и накопленных знаний в области транспортных систем. Сбор информации осуществлялся методом поиска в отечественных и зарубежных источниках, наиболее близких к теме исследования.

Обзор литературы

Субъективно любая система может представляться сложной, и такое представление может быть результатом недостаточности имеющихся знаний. Параметры отнесения системы к сложной условны из-за субъективной составляющей. Это вызывает определённую трудность понимания и формулирования определения сложной транспортной системы.

Объективно момент отнесения системы к сложной может быть обозначен в зависимости от числа разнообразных переменных элементов, входящих в систему, и связей между элементами. При этом переменные, прямые и обратные связи между ними должны быть разнотипными. Взаимосвязанные элементы образуют автономные подсистемы, являющиеся обязательной составляющей сложных систем [2].

Зависимость от числа элементов и связей выявляет относительность понятия сложной системы. Система, сложная по отношению к входящей в неё подсистеме, может сама быть частью сложной системы.

Транспортный комплекс принято рассматривать, как совокупность сложных систем, включающих воздушный, железнодорожный и другие виды транспорта, или, например, транспортные кибер-физические системы. В состав современной сложной транспортной системы входят специализированные системы, например, интеллектуальные транспортные системы. Транспортная система также является частью сложной системы, например, пространственной организационно-технической системы мегаполиса [3, 4].

Отличительными особенностями сложных систем являются целенаправленность и нелинейность, зависимость от постоянно воздействующей на систему окружающей среды, наличие сложной иерархии и организации [5].

Сложные технические системы вариативны, имеют частично стохастический характер, а вследствие сложности затруднено их описание с помощью математического моделирования [6, 7].

Саморазвивающиеся транспортные системы рассматриваются как сложные при формулировании мировоззренческой основы и аккумулировании фундаментальных знаний [8].

Сложные транспортные системы могут быть обозначены, как комплексные (complex transport systems), характеризующиеся многокомпонентностью, образующие масштабные сети и нуждающиеся в разветвлённой и разнообразной транспортной инфраструктуре [9].

Однако в целом понятие сложной транспортной системы недостаточно изучено и широко не распространено при описании процессов управления перевозками пассажиров и грузов.

Результаты исследования

В процессе развития транспортной системы возрастает диапазон предоставляемых услуг, растёт парк подвижного состава и многообразие используемых средств и устройств, происходит наращивание объёмов выполняемой транспортной работы и вовлечение в транспортную сеть граждан, т. е. растёт их непосредственное влияние на процесс перевозок и участие в решении задач транспортного обеспечения.

Одной из форм гражданского участия является разрабатываемый единый стандарт вовлечённости граждан в решение задач по повышению качества дорожно-транспортной инфраструктуры. Примером вовлечения, участия и влияния граждан на процесс перевозок, перераспределения нагрузок на общественный транспорт в часы пик в условиях новой мобильности является концепция отказа от личного транспорта в пользу поставщика услуг перевозок (Mobility-as-a-Service – мобильность, как сервис или мобильность, как услуга). Концепция подразумевает задействование всех типов транспорта, от автомобилей, в том числе краткосрочно арендованных и управляемых гражданами, до автобусов или, например, велосипедов и других средств индивидуальной мобильности. Сюда же относится сервис персонализированных перевозок по требованию, который позволяет пассажиру направлять автобус через приложение на ближайшую остановку или ближе к его местонахождению. Управление движением может осуществляться с использованием информации, поступающей от участников дорожного движения через их мобильные устройства.

В результате наблюдается существенное расширение круга участников транспортных операций и их интересов, значительное увеличение количества связей между элементами системы и их разнообразия.

Технологические изменения и процессы интеллектуализации, ускоряющиеся распространением инноваций, способствовали расширению функциональных целей современных транспортных систем, включая обеспечение связанности отдалённых территорий, доступности услуг перевозки и необходимой гражданам мобильности.

Возрастающие требования безопасности и необходимости минимизации влияния транспорта на окружающую среду стали важными социальными целями, усложнившими при этом транспортные системы в эксплуатации. В стратегических планах обозначены такие цели, как

экономическое развитие, повышение национальной конкурентоспособности и технологическое превосходство. Новые цели нашли отражение в транспортной политике, представляющей собой комплекс приоритетных действий и документов регулирующего органа государственной власти, направленных на формирование и распространение стандартов и практик в области транспорта. Доминирование новых целей над инвестиционными решениями и эксплуатационными задачами привело к корректировке традиционной институциональной транспортной структуры (рис. 1).



Рис. 1. Графическая интерпретация сложной транспортной системы

Для человека такие системы стали сложны из-за невозможности обработки больших объемов сопутствующей информации, осознания и понимания всех протекающих процессов в комплексе. Для достижения поставленных целей транспортной системе необходимо решать задачи, в которых состояние управления, ситуация управления и принятия решений трудно объяснимы с помощью естественного интеллекта, и необходимо задействовать интеллектуальные экспертные компьютерно-программные комплексные структуры [10].

Сложная транспортная система является частью более крупных структур (сложных систем высшего порядка), например, системы международного разделения труда, мировой или региональной экономики, или городского хозяйства мегаполиса. При этом её отличительными особенностями остаются выполняемые задачи по обеспечению потребности общества в непрерывном сообщении, перевозке пассажиров и грузов (процессные признаки) и используемые для этого средства, пути сообщения, транспортные сооружения и устройства (объектные признаки). Отличительные особенности позволяют обозначить границы действия и применения сложной транспортной системы. Например, в транспортно-логистических системах непосредственное перемещение пассажиров и грузов обеспечивается транспортом, а управление потоками относится к логистике [11, 12].

Количество элементов и связей и в классических, и в сложных транспортных системах настолько велико, что выявлять пороговое число переменных, обозначающее момент перехода от классической к сложной системе, нет необходимости. Основные отличия сложных транспортных систем от классических заключаются в том, что над фундаментальными изначальными целями транспорта доминируют цели сложных систем высшего порядка. Множество выполняемых при управлении и транспортировке действий, необходимых для решения задач сложной транспортной системы, находятся за пределами возможностей естественного интеллекта, и их выполнение возможно исключительно с помощью интеллектуальных компьютерно-программных инструментов. Из этого следует, что чем больше изначально несвойственных транспорту

целей будет возложено на транспортную отрасль, чем больше задач будет решаться с помощью интеллектуальных компьютерно-программных инструментов и чем меньше в выполнении операций, связанных с транспортировкой, будет участвовать человек, тем сложнее будет транспортная система, стремясь к сверхсложному состоянию (рис. 2).



Рис. 2. Эволюция транспортных систем

С учётом выявленных отличительных особенностей, поставленных целей, решаемых задач и установленных функциональных границ возможно сформулировать современное определение сложной транспортной системы на основе классической дефиниции.

Исходя из определения системы и научных теорий закономерностей функционирования и развития систем, а также понятия транспорта, транспортные системы представляют собой совокупность взаимосвязанных и образующих целостность элементов, обеспечивающих эффективное управление перемещением людей и материальных потоков посредством использования технических устройств и технологий [13].

Автором настоящей статьи предложено следующее современное определение термина «сложная транспортная система»:

Сложная транспортная система – это функционирующая с применением интеллектуальных инструментов структура взаимосвязанных средств и устройств, обеспечивающая выполнение в соответствии с целями систем высшего порядка необходимых операций в интересах участников транспортного процесса.

Транспортную систему нельзя отнести к сложной, если преследуются исключительно цели перемещения пассажиров и грузов и решаются задачи транспортировки, а управление системой и все операции могут быть выполнены человеком.

Сложные транспортные системы формируются в результате конвергенции обязательных элементов транспортного производства, электроники и интеллектуальных информационных технологий для достижения настоящих и будущих экономических, социальных и политических целей и запросов общества. В будущем транспортная наука продолжит работать для обеспечения нужд граждан, предприятий и государства, увеличивая свою роль в развитии общества, экономики и транспортных систем страны. Выявление и адекватное применение тенденций науки и технологий в транспортной отрасли позволяет своевременно предусмотреть изменения в социально-экономических процессах, смоделировать вероятные варианты и скорректировать направления развития. Общегосударственное прогнозирование научно-технического развития в соответствии с Транспортной стратегией Российской Федерации предусматривает пятнадцатилетний интервал. Интервалы макроэкономических и научно-технических прогнозов составляют

5–10 лет. Влияние высших целей и цифровой интеллектуализации будет достаточно значимо для сложных транспортных систем в ближайшей и стратегической перспективе.

При проектировании сложных транспортных систем происходит смешение и утверждение стандартов транспортировки и используемых средств, способов обмена данными и открытых шаблонов, в том числе предъявляемых требований к работе различных видов магистрального транспорта и правил безопасности, указанных в соответствующих нормативных актах, а также совместимости и гармонизации программного обеспечения. Осуществляется интеграция транспорта в глобальную производственно-экономическую систему интеллектуальных и связанных между собой продуктов, услуг, их производителей (поставщиков) и потребителей, а также других элементов.

Сложные транспортные системы с такими технологиями, как интернет вещей, цифровое управление, облачные сервисы, большие данные, беспилотный транспорт, полностью роботизированные склады и др. необходимы для реализации концепций, обеспечивающих ожидаемые в будущем требования к качеству жизни и бизнес-процессам, например таких, как умные города или абсолютно автоматизированные производства 3D, промышленность и индустрия 4.0. К подлежащим решению задачам для сложных транспортных систем можно отнести обеспечение минимального влияния на транспортную отрасль изменчивой внешней конъюнктуры при обеспечении транспортировки и выполнении огромного объема разнообразных услуг.

Заключение

Автором настоящей статьи предложено современное определение термина «сложная транспортная система». Сформулированное определение выражает уровень знания о сложных транспортных системах, обозначает их позицию и положение в экономике страны, на которых на данный момент они находятся, способствует познанию и дальнейшему пониманию исследуемой области.

В процессе исследования выполнен анализ наиболее авторитетных согласно индексу научного цитирования трудов, посвящённых транспортно-технологическим системам и производству на транспорте. Проанализированы опубликованные в зарубежных и национальных библиографических и реферативных базах данных рецензируемой научной литературы результаты ранее выполненных исследований, научные положения о транспортных системах будущего и существующие толкования понятия сложных транспортных систем. Из процесса эволюции транспортных систем выделен момент кардинального изменения масштаба решаемых задач и требований к транспортному процессу, обозначены особенности современных концепций управления на транспорте и вектор основных ожидаемых технологических новшеств. Кроме того, учтены особенности стратегических планов в области транспорта и перспективные возможности цифровизации и инновационного развития транспортной отрасли экономики.

Проработаны существующие понятия и определено, что представляют собой и чем являются функционирующие и перспективные транспортные системы. С учётом направлений и уровня развития экономики и технологий сформулировано и обосновано современное определение.

В сложной транспортной системе над естественными целями преобладают цели и задачи, продиктованные текущими экономическими процессами и формируемыми потребностями [14].

Связь понятий системы и информации предопределило изменение понимания транспортной системы в процессе эволюции информационных процессов, перешедших в настоящее время от цифровизации к стадии интеллектуализации и объективно усложнивших процессы обработки информации. Сложные транспортные системы отличает выполнение действий за пределами возможностей человека с помощью интеллектуальных инструментов. Например:

– выявление в грузопотоке и фиксация повреждённых грузов по внешнему виду упаковки с помощью машинного зрения и свёрточной нейронной сети, осуществляющей непрерывную обработку изображений, получаемых со складских видеокамер;

– обеспечение омниканального обмена информацией между участниками транспортно-логистических процессов при помощи виртуального интеллектуального помощника, функционирующего в режиме реального времени и мгновенно предоставляющего требуемую информацию;

– формирование цифрового двойника транспортной системы мегаполиса и автоматизация процессов управления дорожным движением [9, 15, 16].

Сложные транспортные системы продолжают развитие по всем изложенным направлениям, которое необходимо, пока есть потребность в перемещении пассажиров и грузов. Управление сложными транспортными системами, как область деятельности, позволяет применить результаты настоящего исследования при осуществлении комплексного развития сетей страны, регионов и городов, и формировании их инфраструктуры. Результаты исследования могут быть использованы в технологиях организации и цифровизации транспортной работы, перевозок и оптимизации структуры подвижного состава различных видов транспорта, в том числе принципиально новых видов городского транспорта и технологиях обеспечения городской мобильности.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников

1. Беляев В. М. Характеристики транспортных инфраструктур международных компаний // Интегрированная логистика. 2010. № 2. С. 17–19.
2. Макаров И. М. и др. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. 2006. Москва: Наука, 334 с.
3. Лебедева М. М., Сергеев В. М. Мегаполис как фактор мировой политики // Космополис. 2004. № 4. С. 193–200.
4. Лёвин Б. А., Цветков В. Я. Развитие интеллектуальных транспортных систем // Наука и технологии железных дорог. 2020. Т. 4. № 1. С. 15–25.
5. Афанасенко И. Д. Теория устойчивости хозяйственных систем // Известия Санкт-Петербургского государственного экономического университета. 2012. № 4. С. 7–17.
6. Авдийский В. И., Безденежных В. М. Неопределённость, изменчивость и противоречивость в задачах анализа рисков поведения экономических систем // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2011. № 3. С. 46–61.
7. Bar-Yam Yaneer. General Features of Complex Systems. In *Knowledge Management, Organizational Intelligence and Learning, and Complexity*, vol. 1, UNESCO-EOLSS Publishers, Oxford, UK, 2002, pp. 43–95.
8. Корчагин В. А. и др. Сложные саморазвивающиеся транспортные системы // Мир транспорта и технологических машин. 2016. № 2. С. 110–116.
9. Малышев М. И. Инновационные инструменты обеспечения омниканальности в управлении цепями поставок // Технологии информационного общества: Сборник трудов XVI Международной отраслевой научно-технической конференции, Москва, 02–03 марта 2022 года. Москва: ООО «Издательский дом Медиа публишер», 2022. С. 256–258.
10. Buzási A., Csete M. Sustainability indicators in assessing urban transport systems, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 2015, vol. 43, no. 3, pp. 138–145.
11. Cats O., Koppenol G. J., Warnier M. Robustness assessment of link capacity reduction for complex networks: Application for public transport systems, *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, vol. 167, pp. 544–553.
12. Малышев М. И. Обзор исследований в области повышения эффективности мультимодальных перевозок на основе технологических решений // Научный вестник МГТУ ГА. 2020. Т. 23. № 4. С. 58–71. <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2020-23-4-58-71>

13. Stough R. R., Rietveld P. Institutional issues in transport systems, *Journal of Transport geography*, 1997, vol. 5, no. 3, pp. 207–214.
14. Беляев В. М., Малышев М. И. Типизация и классификация предприятий, осуществляющих доставку товаров по предварительным заказам // Риск: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. 2009. № 2. С. 35–38.
15. Малышев, М. И. Интеллектуальный инструмент обеспечения контроля сохранности грузов в процессе управления цепями поставок // Политранспортные системы: материалы XII Международной научно-технической конференции. Новосибирск, 21–22 сентября 2022 года. В 3 ч. Ч. 2. Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2022. С. 74–77.
16. Xiong Z. et al. Intelligent transportation systems for smart cities: a progress review, *Science China Information Sciences*, 2012, vol. 55, pp. 2908–2914.

References

1. Belyaev V. M., Kharakteristiki transportnykh infrastruktur mezhdunarodnykh kompanij, *Integrirovannaya logistika*, 2010, no. 2, pp. 17–19. (In Russ.)
2. Makarov I. M. et al. *Iskusstvennyj intellekt i intellektual'nye sistemy upravleniya [Artificial intelligence and intelligent control systems]*, 2006, Nauka Publ., 334 p. (In Russ.)
3. Lebedeva M. M., Sergeev V. M. Megapolis kak aktor mirovoj politiki, *Kosmopolis*, 2004, no. 4, pp. 193–200. (In Russ.)
4. Levin B. A., Tsvetkov V. Ya. Razvitie intellektual'nykh transportnykh system, *Nauka i tekhnologii zheleznykh dorog*, 2020, vol. 4, no. 1, pp. 15–25. (In Russ.)
5. Afanasenko I. D. Teoriya ustojchivosti khozyajstvennykh system, *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo ehkonomicheskogo universiteta*, 2012, no. 4, pp. 7–17. (In Russ.)
6. Avdijskij V. I., Bezdenezhnykh V. M. Neopredelennost', izmenchivost' i protivorechivost' v zadachakh analiza riskov povedeniya ehkonomicheskikh system, *Strategicheskie resheniya i risk-menedzhment*, 2011, no. 3, pp. 46–61. (In Russ.)
7. Bar-Yam Yaneer. General Features of Complex Systems. In *Knowledge Management, Organizational Intelligence and Learning, and Complexity*, vol. 1, UNESCO-EOLSS Publishers, Oxford, UK, 2002, pp. 43–95.
8. Korchagin V. A. et al. Complex self-developing transport systems, *World transport and technological machinery*, 2016, no. 2, pp. 110–116. (In Russ.)
9. Malyshev M. I. Innovatsionnye instrumenty obespecheniya omnikanal'nosti v upravlenii tsepyami postavok, Tehnologii informatsionnogo obshchestva, *Sbornik trudov XVI Mezhdunarodnoj otraslevoj nauchno-tekhnicheskoy konferentsii [Innovative Omnichannel Supply Chain Management Tools, Technologies of the information society, A collection of works of the XVI International industry scientific and technical conference]*, Moscow, Media Publisher, 2022, pp. 256–258. (In Russ.)
10. Buzási A., Csete M. Sustainability indicators in assessing urban transport systems, *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 2015, vol. 43, no. 3, pp. 138–145.
11. Cats O., Koppenol G. J., Warnier M. Robustness assessment of link capacity reduction for complex networks: Application for public transport systems, *Reliability Engineering & System Safety*, 2017, vol. 167, pp. 544–553.
12. Malyshev M. I. Research review on improving the efficiency of multimodal transportation based on technological solutions, *Civil Aviation High Technologies*, 2020, vol. 23, no. 4, pp. 58–71. (In Russ.)
13. Stough R. R., Rietveld P. Institutional issues in transport systems, *Journal of Transport geography*, 1997, vol. 5, no. 3, pp. 207–214.
14. Belyaev V. M., Malyshev M. I. Tipizatsiya i klassifikatsiya predpriyatij osushchestvlyayushchikh dostavku tovarov po predvaritel'nym zakazam, *RISK: Resursy, Informatsiya, Snabzhenie, Konkurentsya*, 2009, no. 2, pp. 35–38. (In Russ.)

15. Malyshev M. I. Intelligent tool for cargo safety control in the process of supply chain management, *Politransportnye sistemy [Polytransport systems]*, *Materials of XII International scientific and technical conference*, in 3 parts, part 2, Siberian Transport University Publ., 2022, pp. 74–77. (In Russ.)

16. Xiong Z. et al. Intelligent transportation systems for smart cities: a progress review, *Science China Information Sciences*, 2012, vol. 55, pp. 2908–2914.

Информация об авторе

Малышев Максим Игорьевич, кандидат технических наук, доцент, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, dicorus@mail.ru

Author information

Malyshev Maksim I., Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia, dicorus@mail.ru

Статья поступила в редакцию 06.03.2023; одобрена после рецензирования 08.06.2023; принята к публикации 16.06.2023.

The article was submitted 06.03.2023; approved after reviewing 08.06.2023; accepted for publication 16.06.2023.

Научная статья
УДК 338:629.735.083

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ВОЗДУШНЫХ СУДОВ В УСЛОВИЯХ САНКЦИЙ

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

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. Объектом проведённого исследования являются перспективные направления совершенствования системы технического обслуживания и ремонта (ТОиР) авиатехники российских авиакомпаний в текущих условиях нестабильного рынка и ресурсных ограничений, а также моделирование соответствующих затрат. Сформулированы основные проблемы, задачи и рекомендации по обеспечению эффективного ТОиР воздушных судов (ВС) бывшего СССР и ВС иностранного производства в условиях рестрикций, а также новых ВС российского производства. Представлена разработанная авторами модель оценки затрат на ТОиР самолётов российских коммерческих авиакомпаний. Результаты исследования могут быть использованы для совершенствования информационно-методической базы и принятия решений в области организации обеспечения ТОиР самолётов, качественной и количественной оценок влияния новых научно-технических решений в области авиастроения на эффективность эксплуатации самолётов и авиационной инфраструктуры транспортной системы страны.

Ключевые слова: воздушное судно, эксплуатация авиационной техники, эффективное ТОиР самолётов, техническое совершенство авиатехники, авиакомпания, транспортные системы страны

Для цитирования: Фридлянд А. А., Чубуков А. П., Низаметдинов Р. Р. Экономические аспекты совершенствования системы технического обслуживания и ремонта воздушных судов в условиях санкций // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 43. С. 127–135.

ECONOMIC ASPECTS OF IMPROVING THE AIRCRAFT MAINTENANCE AND REPAIR SYSTEM UNDER SANCTIONS

A. A. FRIDLAND, A. P. CHUBUKOV, R. R. NIZAMETDINOV

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

Abstract. The object of the study is promising areas for improving the system of maintenance and repair (MRO) of aircraft of Russian airlines in the current conditions of an unstable market and resource constraints, as well as modeling the corresponding costs. The purpose of the study is to improve the organization and information support of decision-making when planning the development of a fleet of civil aircraft. The main problems, tasks and recommendations for ensuring effective MRO of foreign-made aircraft in the conditions of restrictions and the new Russian-made aircraft. A model developed by the authors for estimating the cost of maintenance and repair of aircraft of Russian commercial airlines is presented. The results of the study can be used to improve the information and methodological base and decision-making in the organization of maintenance of aircraft, qualitative and quantitative assessments of the impact of new scientific and technical solutions in the field of aircraft engineering on the efficiency of aircraft operation and aviation infrastructure of the country's transport system.

Keywords: aircraft, operation of aviation equipment, effective MRO aircraft, technical perfection of aircraft, airline, transport systems of the country

For citation: Fridlyand A. A., Chubukov A. P., Nizametdinov R. R. Economic aspects of improving the aircraft maintenance and repair system under sanctions, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2023, no. 43, pp. 127–135. (In Russ.)

Введение

Практически с начала 2022 года отечественная гражданская авиация (ГА) работает в условиях ресурсных ограничений (рестрикций). Реакцией на ресурсные ограничения стало принятие в июне 2022 года Комплексной программы развития авиатранспортной отрасли Российской Федерации до 2030 года¹. Документ предусматривает ускорение темпов создания собственной авиатехники, независимой от поставок импортных материалов и комплектующих, а также увеличение её выпуска.

В 2022 году велись работы по сертификации ВС SSJ-NEW (импортозамещённая версия), Ил-114-300, ТВРС-44 «Ладога», ЛМС-901 «Байкал» с двигателями и воздушными винтами отечественной разработки, а также модификаций вертолётов Ансат, Ми-171А2, Ка-32А11М и Ка-226Т «Альпинист». Данные работы продолжаются и в настоящее время.

Для защиты национальных интересов, обеспечения лётной годности и безопасной эксплуатации иностранных воздушных судов Росавиацией в 2022 году одобрено 16 отечественных предприятий в качестве разработчиков модификаций иностранных ВС и их компонентов в соответствии с федеральными авиационными правилами. Данные организации получили право проводить модификации иностранных ВС, направленные на продолжение эксплуатации в соответствии с установленной международной практикой. Ожидается дальнейшее увеличение количества отечественных разработчиков модификаций, а также наращивание компетенций уже одобренных организаций – для этого ведётся совместная с Минпромторгом России работа [1].

В соответствии с Комплексной программой парк иностранных ВС до 2030 года сократится более чем в два раза относительно апреля 2022 года.

Цель исследования – совершенствование организации и информационного обеспечения принятия решений при планировании развития парка гражданских ВС.

Основные проблемы и задачи обеспечения эффективного ТОиР ВС бывшего СССР и ВС иностранного производства в условиях рестрикций

Основные проблемы и задачи обеспечения эффективного ТОиР ВС иностранного производства в текущих условиях:

- в условиях санкционных ограничений эксплуатанты ВС и организации по ТОиР ВС и их компонентов испытывают трудности в поставках оригинальных комплектующих изделий, произведённых организациями-изготовителями, одобренными авиационными властями стран-разработчиков ВС, эксплуатируемых в Российской Федерации;

- необходим процесс запуска собственного производства иностранных комплектующих в Российской Федерации, что с учётом проведения сертификационных процедур может занять значительное время. Временной разрыв в поставках может повлиять на безопасность и объёмы перевозок в Российской Федерации;

- возможна организация закупки комплектующих изделий в третьих странах, где авиапромышленностью налажено производство неоригинальных компонентов в соответствии

¹ Распоряжение Правительства Российской Федерации от 25.06.2022 № 1693-р.

с процедурами, предусмотренными Part Manufacturer Approval (PMA), European Part Approval (EPA), Technical Standard Orders Authorization (TSOA);

- с целью устранения вышеперечисленных трудностей целесообразно допустить использование компонентов, изготовленных по процедурам стран, получивших на указанное изготовление разрешение от производителей оригинальных компонентов ВС для обеспечения эксплуатации парка ВС в Российской Федерации;

- эксплуатанты ВС и организации по ТОиР ВС сталкиваются с трудностями в получении технической документации от производителей ВС и компонентов, а также от иных одобренных производителями организаций при выполнении текущих ремонтов конструкции ВС. Возможности российских организаций по данным видам деятельности ограничены в связи с отсутствием одобрения от производителей ВС и недостатком опыта, отсутствием доступа к конструкторской документации и специализированному программному обеспечению разработчиков и изготовителей ВС. В связи с вышеперечисленным целесообразно допустить внедрение модификаций и выполнение ремонтов конструкций ВС на основании документации, разработанной организациями, ранее уже одобренными организациями-изготовителями оригинальных конструкций ВС.

Вышеизложенное целесообразно реализовывать в установленном порядке через изменения Воздушного кодекса, правительственные и отраслевые нормативные акты.

Основные проблемы и задачи обеспечения эффективного ТОиР ВС бывшего СССР:

- критическая проблема – дефицит производства комплектующих изделий, как устаревших и снятых с производства в Российской Федерации, так и тех, которые ранее производились на предприятиях СССР, ныне находящихся за рубежом;

- при выполнении работ по продлению ресурсов и сроков службы устаревающих российских гражданских ВС в условиях ограниченного финансирования и дефицита комплектующих изделий часть ВС начинает использоваться эксплуатантами в качестве «доноров» для других ВС, располагающих остатком назначенного срока службы;

- по мере дальнейшего устаревания парка гражданских ВС, выпуск которых прекращён, происходит ежегодный рост потребностей в комплектующих изделиях для замены или ремонта выходящих из строя. Для надёжной поставки комплектов запчастей и материалов и обеспечения ТОиР ВС российских эксплуатантов необходимо формирование единого обменного фонда, который позволит формировать неснижаемый запас покупных комплектующих изделий, для чего на российских предприятиях, занимающихся капитальным ремонтом ВС производства бывшего СССР, требуется наладить изготовление аналогов комплектующих изделий и обеспечить правовую поддержку при их установке на ВС.

С учётом реализации программ импортозамещения до 2030 года предусматриваются поставки 949 самолётов для нужд ГА, из них 142 единицы (ед.) SSJ-NEW, 270 ед. MC-21-310, 70 ед. Ил-114-300, 70 ед. Ту-214, 12 ед. Ил-96-300, 140 ед. ТВРС-44 «Ладога», 100 ед. Л-410 и 145 ед. «Байкал» (ЛМС-901).

В связи с планируемым ростом парка новых типов ВС российского производства выделим основные задачи и рекомендации по обеспечению эффективного ТОиР ВС:

- необходимо поэтапно отказываться от использования на российских ВС зарубежных комплектующих. Требуется организация в производстве российских ВС процессов замкнутого цикла, т. е. использования технологий и комплектующих, разработанных и выпускаемых внутри страны;

- при разработке российских ВС необходимо отслеживать тенденции мировых производителей гражданской авиационной техники и ориентироваться на них;

- при создании гражданских ВС необходимо тесное взаимодействие и учёт обоснованных и необходимых требований будущих эксплуатантов и рынка коммерческих авиационных услуг.

Развитие систем послепродажного обслуживания (ППО) гражданских ВС

На современном этапе ППО гражданских ВС находится в переходном периоде: идёт смена подходов в ТОиР – с регламентов, которые использовались на устаревших российских ВС, на современные регламенты, действующие на новых гражданских российских ВС.

Для современных гражданских ВС система ППО строится на базе подходов, цели внедрения которых – высокие эксплуатационные показатели и низкая стоимость эксплуатации (рис. 1).

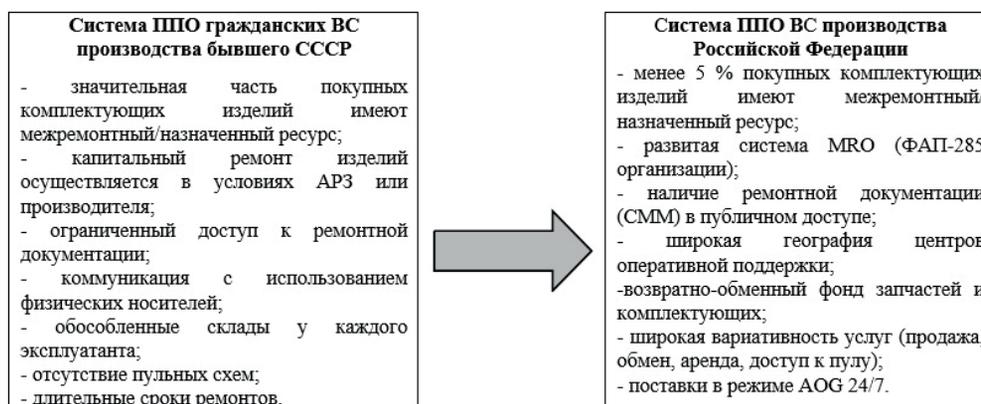


Рис. 1. Рекомендации по развитию системы ППО гражданских ВС в России

При реализации системы ППО для новых российских ВС должны учитываться прежде всего требования эксплуатантов (авиакомпаний). В таблице представлены основные требования заказчиков (авиакомпаний) к системе ППО.

Основные требования авиакомпаний к системе ППО

Основные направления	Ожидания Заказчика (Авиакомпаний)
ТОиР ВС	<ul style="list-style-type: none"> • Наличие доступных временных интервалов для обслуживания ВС в ангарах в крупных аэропортах для выполнения тяжёлых форм ТОиР ВС • Наличие сети линейных станций технического обслуживания (ЛСТО) по маршрутам авиакомпании • Наличие конкурентной среды (предпочтительно несколько коммерческих предложений при выборе организации по ТОиР) • Конкурентная ставка в человеко-часах
Материально-техническое обеспечение (МТО)	<ul style="list-style-type: none"> • Максимальное покрытие потребностей компонентов, предоставляемых по услуге доступа к Пулу компонентов и комплектующих • Наличие консигнационных складов расходных частей и материалов по маршрутной сети авиакомпаний (а/к) • Оперативное предоставление комплектующих изделий (КИ) • Гарантия уровня сервиса
Администрирование гарантий	<ul style="list-style-type: none"> • Оперативная обработка рекламационных актов • Удобная информационная среда • Качественное исследование дефектов компонентов
Инженерно-техническая поддержка	<ul style="list-style-type: none"> • Наличие центра поддержки 24/7 • Желательны периодические визиты технического представителя в регионы базирования а/к • Разработка корректирующих мероприятий по увеличению надёжности ВС и КИ • Удобная информационная среда

Окончание таблицы

Основные направления	Ожидания Заказчика (Авиакомпания)
Сопровождение лётной эксплуатации и переподготовка авиаперсонала	<ul style="list-style-type: none">• Современные инструменты для поддержки лётной эксплуатации заказчиков• Доступное количество тренажёрного времени• Доступность учебного центра, желательно в регионе базирования а/к• Конкурентная цена на переподготовку авиационного персонала

Для снижения рисков недостаточной эффективности систем ТОиР ВС в текущих условиях необходимы активные целенаправленные действия в целях:

- создания, развития, обеспечения систем своевременных поставок и эффективной эксплуатации новых и модифицированных российских ВС;
- обеспечения эффективной эксплуатации ранее приобретённых российскими а/к иностранных ВС, без чего невозможно обойтись, пока новые российские ВС не будут произведены в достаточных для авиатранспортной отрасли количествах.

Наиболее эффективным способом избежать существенного спада в авиаперевозках российской ГА является реализация стратегии синхронного развития обоих указанных направлений силами частного и частно-государственного российского авиационного бизнеса (компании авиационной промышленности и воздушного транспорта) и государственных отраслевых корпораций (ОАК, ОДК и др., финансируемых в т. ч. из государственного бюджета) в их творческом и организационном взаимодействии, на единых, выработанных мировой гражданской авиацией принципах.

Важная роль должна отводиться созданию научно обоснованной и высокотехнологичной системы ППО ВС, с учётом мирового опыта, а также ранее реализованного советского опыта (взаимодействие Министерства авиационной промышленности СССР и Министерства гражданской авиации СССР с развитой системой ремонтных предприятий ВГПО «Авиаремонт»), накопленного опыта российской авиационной промышленности (например, в части совершенствования системы ППО SSJ-100) и российских а/к (развитие высокотехнологичных структур ТОиР в группах Аэрофлот и S7, опыт а/к «Азимут», добившейся наиболее интенсивной эксплуатации SSJ-100 за счёт активного формирования ремонтного фонда запчастей и агрегатов).

Перспективные системы ППО ВС (российских и иностранных) должны соответствовать следующим требованиям:

- в обязательном порядке предусматривать в необходимых объёмах создание, пополнение и ремонты резервных запчастей и агрегатов (в том числе путём их производства на создаваемой самостоятельно и при поддержке государственных структур производственно-технической базе);
- быть обеспеченными необходимой проектной технической и технологической документацией;
- производители запчастей и агрегатов ВС, а также работ и услуг в ГА должны иметь соответствующие допуски в соответствии с действующими в авиационной промышленности и ГА нормативными требованиями и правилами.

Практика ведения государственного статистического наблюдения за наличием и ресурсным состоянием ВС и авиационных двигателей (АД)

В гражданской авиации СССР с мая 1988 года регулярно велись и использовались для инженерно-технического обеспечения полётов ВС статистические формы, включающие в том числе данные о дате последнего ремонта, остатке ресурса и другую важную информацию о ресурсном состоянии ВС и АД, необходимые для принятия эффективных решений в области ТОиР ВС как

на уровне а/к, так и в органах государственного регулирования в сфере ТОиР и привлекаемых к подготовке и обоснованию необходимых решений в сфере ТОиР ВС научно-исследовательских и научно-технических организаций:

- форма 36-ГА (СВ) «Отчёт о наличии и ресурсном состоянии самолётов и вертолётов». Основные показатели формы: назначенный ресурс ВС, остаток ресурса ВС, наработка с начала эксплуатации ВС, дата выхода ВС с завода-изготовителя, количество произведённых ремонтов ВС;

- форма 37-ГА «Список авиационных двигателей и их ресурсное состояние». Основные показатели формы: тип и серия АД, дата выхода из/с завода-изготовителя, количество ремонтов, остаток межремонтного ресурса.

В настоящее время эти формы на отраслевом уровне не ведутся (ими располагают только технические службы а/к), так как отменены в рамках мер, связанных с регуляторной гильотиной. Отсутствие в отрасли (в органах государственного регулирования и научно-исследовательских организациях ГА) информации и аналитики, основанных на анализе данных указанных форм, осложняет проведение эффективной научно-технической политики государства в отрасли ГА, снижает надёжность прогнозирования динамики парка ВС и его технического состояния, необходимых для объективного прогнозирования воздушных перевозок на уровне отрасли, авиационных предприятий и в научно-исследовательских организациях ГА.

В связи с изложенным целесообразно восстановить практику ведения в отрасли государственного статистического наблюдения за наличием и ресурсным состоянием ВС и АД с периодичностью два раза в год, с которой оно велось ранее на регулярной основе. В соответствии с Положением о Министерстве транспорта Российской Федерации (в редакции от 24.11.2022), пп. 5.2.53.8, указанное решение находится в компетенции Минтранса России [2].

Для обеспечения выполнения рекомендаций, изложенных на рис. 1 и в таблице, в отношении развития систем ППО гражданских ВС, требуется реализация результатов исследований и разработок российских учёных [3–7], основные положения и рекомендации которых остаются справедливыми и в условиях действующих рестрикций, хотя и требуют осуществления предложенных выше дополнений и корректировок. В сложившихся условиях особую важность приобретает контроль затрат и эффективности ТОиР ВС, который в настоящее время осложняется введёнными на международном уровне рестрикциями и санкциями и обуславливает актуальность совершенствования соответствующего аналитического и методического аппарата.

Модель оценки затрат на ТОиР самолётов коммерческих авиакомпаний ГА Российской Федерации

Для исследования статистики расходов а/к на ТОиР самолётов при обслуживании транспортных полётов авторы настоящей статьи рассмотрели данные за 2021 год, представленные в форме 67-ГА «Отчет о финансовой деятельности авиапредприятий и организаций воздушного транспорта»², строка 160 «Затраты на ТОиР СВАД, всего» (столбцы «Транспортная работа всего (МВЛ+ВВЛ)»), при этом расходы на ТОиР СВАД при обслуживании работ специального назначения в исследовании не учитывались) и в форме 32-ГА «Сведения о парке воздушных судов»³ по отобраным авиакомпаниям ГА Российской Федерации.

Были отобраны а/к, которые преимущественно осуществляют авиаперевозку пассажиров на самолётах.

² Статистические данные отраслевой формы госстатотчётности 67-ГА (фин) за 2021 г. «Отчёт о финансовой деятельности авиапредприятий и организаций воздушного транспорта», утверждённой Приказом Федеральной Авиационной службы России от 26 мая 1997 г. № 99.

³ Статистические данные отраслевой формы госстатотчётности 32-ГА за 2021 г. «Сведения о парке воздушных судов», утверждённой постановлением Росстата от 18.07.2007 № 57.

При этом использовались в первую очередь данные а/к, располагающих самолётами либо одного класса (местных линий, региональные, ближне-среднемагистральные, дальнемагистральные) либо не более двух классов с доминированием одного из них, обеспечивающие месячный налёт на среднесписочные ВС, сопоставимый со средними (или выше) значениями по рынку для соответствующих типов ВС.

В итоге для исследования были отобраны 29 а/к: Смартавиа, 2-ой Архангельский ОАО, Аэросервис, ИрАэро, Амур, Хабаровские авиалинии, Сибирь, Икар, НордСтар, АЗУР эйр, Иж-авиа, СиЛА, Вологодское авиапредприятие, Северсталь, Россия, Роял Флайт, Ред Вингс, Костромское авиапредприятие, Северный Ветер, РусЛайн, АЙ Флай, Авиастар-ТУ, Атран, Уральские Авиалинии, Азимут, Якутия, Алроса, Победа и Скай Гейтс Эйрлайнс.

Далее по каждой из а/к определены (расчётно) следующие показатели:

- $G_{п.сн.}$ – масса пустого снаряжённого самолёта рассматриваемого типа, эксплуатируемого а/к, т. Под массой пустого снаряжённого самолёта понимается масса самолёта в состоянии готовности к вылету за вычетом из неё массы экипажа, топлива и оборудования, при этом из массы пустого снаряжённого самолёта не исключается масса постоянно установленного оборудования;

- НМПС – годовое количество обслуженного транспортного налёта часов ВС рассматриваемого типа в парке а/к, ч;

- $T_{\text{час общий а/к}}$ – общее годовое количество обслуженного транспортного налёта часов ВС всех типов самолётов в парке а/к, ч;

- $G_{п.сн.ср}$ – средняя масса пустых снаряжённых самолётов всех типов, эксплуатируемых а/к, т:

$$G_{п.сн.ср} = \sum_{i=1}^n [G_{п.сн.i} \text{НМПС}_i] / T_{\text{час общий а/к}};$$

- $S_{\text{ТОиР}}$ – годовые затраты на ТОиР, всего по парку ВС а/к (тыс. руб.), по данным формы 67-ГА (столбец «Транспортная работа всего (МВЛ+ВВЛ)»).

Удельные затраты на ТОиР (средние за год) на один т·ч обслуженного налёта средней массы пустых снаряжённых самолётов а/к (тыс. руб./ т·ч), определяются по формуле:

$$S_{\text{уд}} = \frac{S_{\text{ТОиР}}}{G_{п.сн.ср} T_{\text{час общий а/к}}}.$$

По расчётным данным показателей $G_{п.сн.ср}$ и $S_{\text{уд}}$ на рис. 2 выделена статистическая взаимосвязь (тренд) $S_{\text{уд}}$ и $G_{п.сн.ср}$. Как видно из графика, связь между рассматриваемыми показателями статистически значима и может быть использована при проектных оценочных (прогнозных) расчётах по самолётам, ещё не использовавшимся в серийном производстве и эксплуатации, по формуле:

$$S_{\text{уд}} = 3,6435 \exp(-0,024 G_{п.сн.ср}). \quad (1)$$

Также в процессе исследования авторами выявлено, что модель показывает более точные результаты при повышенной относительно среднерыночной интенсивности налёта часов самолётов; при низкой интенсивности налёта часов разброс результатов относительно выявленного тренда (см. рис. 2) несколько увеличивается, так как растёт роль и значение иных факторов, например, возраста ВС и квалификации персонала. Поэтому в целом для всего диапазона массы пустого снаряжённого самолёта при переходе от однофакторной к двухфакторной модели не достигается значимого увеличения точности моделирования, и авторы для дальнейшего применения модели считают целесообразным использовать специалистам и аналитикам авиатранспортных предприятий однофакторную модель (1), которая обеспечивает приемлемый уровень точности статистического моделирования ($R^2 = 0,84$).

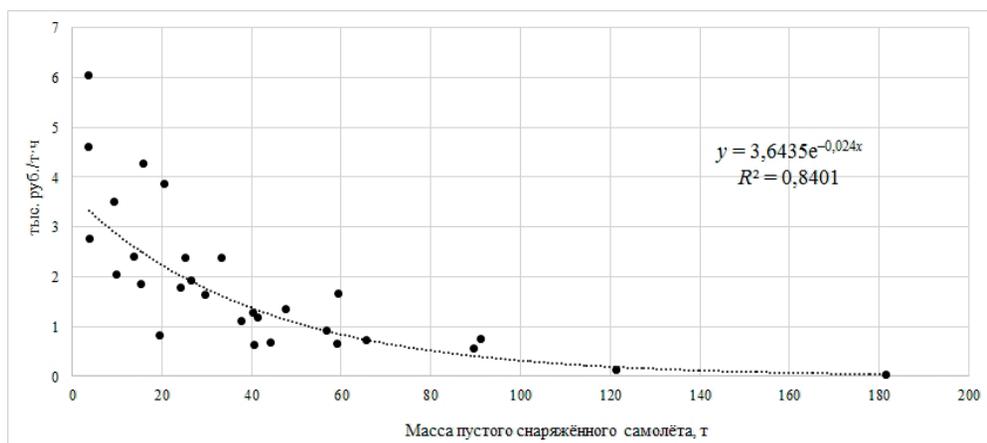


Рис. 2. Взаимосвязь удельного показателя затрат на ТОиР (средние за год) на один т·ч пустого снаряжённого самолёта (тыс. руб./т·ч) от его средней массы, т

Количественная оценка влияния санкций на стоимость ТОиР самолётов подлежит в дальнейшем исследованию по итогам формирования статистики 2022–2023 гг. и может несколько «сместить» полученную зависимость, уточнив отдельные коэффициенты, однако по мнению авторов не изменит общую структуру выявленной модели и отражаемые моделью тенденции.

Заключение

В статье рассмотрены экономические аспекты, основные проблемы, задачи и предложены рекомендации по обеспечению эффективного ТОиР ВС производства бывшего СССР и ВС иностранного производства в условиях рестрикций, а также новых ВС российского производства.

Разработана технико-экономическая модель оценки удельных затрат на ТОиР (на один т·ч пустого снаряжённого самолёта) коммерческих авиакомпаний ГА Российской Федерации в зависимости от величины средней массы пустого снаряжённого самолёта а/к, которая может быть использована специалистами подразделений авиационных предприятий и отраслевыми аналитиками при оценке и планировании затрат а/к, в том числе в отношении внедряемых в эксплуатацию самолётов, по которым ещё не накоплено статистической информации.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников

1. Материалы расширенного заседания коллегии Федерального агентства воздушного транспорта от 10 марта 2023 г. URL: <https://favt.gov.ru/novosti-novosti/?id=9991> (дата обращения: 07.07.2023).
2. Об утверждении Положения о Министерстве транспорта Российской Федерации: Постановление Правительства Российской Федерации от 30 июля 2004 № 395 (ред. от 25.05.2023 № 811). URL: <http://government.ru/docs/all/49555/> (дата обращения: 07.07.2023).
3. Погосян М. А. Проектирование самолётов / Под ред. М. А. Погосяна. 5-е изд., перераб. и доп. Москва: Машиностроение, 2018. 864 с.
4. Чинючин Ю. М., Ойдов Н. Мониторинг ресурсного состояния парка магистральных самолётов в задачах поддержания их лётной годности в условиях российских и монгольских авиакомпаний. Москва: МГТУ ГА, 2020, 124 с.
5. Арепьев А. Н., Арепьев К. А., Громов М. С. Риск конструкционной безопасности самолётов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2020. № 31. С. 99–107.

6. Писаренко В. Н. Техническое обслуживание воздушных судов как система поддержания лётной годности гражданской авиационной техники. Издательство СамНЦ РАН, 2017, 170 с.

7. Дутов А. В., Шапкин В. С., Гальперин С. Б., Ключков В. В., Фридлянд А. А. О мерах по повышению конкурентоспособности авиационной техники российского производства // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2017. № 16. С. 7–14.

References

1. Materialy rasshirenogo zasedaniya kollegii Federal'nogo agentstva vozdušnogo transporta, March 10, 2023, available at: <https://favt.gov.ru/novosti-novosti/?id=9991> (accessed: 07.07.2023). (In Russ.)

2. Ob utverzhdenii Polozheniya o Ministerstve transporta Rossijskoj Federatsii, Resolution of the Government of the Russian Federation no. 395 of July 30, 2004 (ed. no. 811 of 25/05/2023), available at: <http://government.ru/docs/all/49555/> (accessed: 07.07.2023). (In Russ.)

3. Pogosyan M. A. *Proektirovanie samoletov [Aircraft design]*, 5th ed., reprint. and add., Moscow, Mashinostroenie Publ., 2018, 864 p. (In Russ.)

4. Chinyuchin Yu. M., Oidov N. *Monitoring of the resource status of the fleet of mainline aircraft in the tasks of maintaining their airworthiness in the conditions of Russian and Mongolian airlines*, Moscow, MSTU CA Publ., 2020, 124 p. (In Russ.)

5. Arefyev A. N., Arefyev K. A., Gromov M. S. Aircraft structural safety risk, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2017, no. 31, pp. 99–107. (In Russ.)

6. Pisarenko V. N. *Aircraft maintenance as a system for maintaining the airworthiness of civil aviation equipment*, SamSC RAS, 2017, 170 p. (In Russ.)

7. Dutov A. V., Shapkin V. S., Galperin S. B., Klochkov V. V., Fridlyand A. A. On measures to improve the competitiveness of Russian-made aviation equipment, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2017, no. 16, pp. 7–14. (In Russ.)

Информация об авторах

Фридлянд Александр Абрамович, доктор экономических наук, директор Научного центра, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, info@aeroprogress.ru

Чубуков Александр Петрович, кандидат экономических наук, начальник отдела, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, nv-center@mail.ru

Низаметдинов Руслан Равилевич, начальник отдела, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, Ruslan994@mail.ru

Authors information

Fridlyand Alexander A., Doctor of Sciences (Economics), Director of The Scientific Center, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, info@aeroprogress.ru

Chubukov Alexander P., Candidate of Sciences (Economics), Head of Department, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, nv-center@mail.ru

Nizametdinov Ruslan R., Head of Department, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, Ruslan994@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13.04.2023; одобрена после рецензирования 20.07.2023; принята к публикации 28.07.2023.

The article was submitted 13.04.2023; approved after reviewing 20.07.2023; accepted for publication 28.07.2023.

Дискуссионная статья
УДК 530.12: 629.7.05

К ВОПРОСУ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФОРМУЛ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ В СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИИ

А. П. ПЛЯСОВСКИХ

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

Аннотация. В работе рассмотрены три формулы для расчёта наблюдаемого интервала времени по показаниям движущихся к наблюдателю часов. Первая формула следует из преобразований Лоренца специальной теории относительности (СТО), вторая – из соотношения СТО для эффекта Доплера, третья формула взята из статьи, опубликованной в научном журнале «Успехи физических наук». Показано, что при одинаковых условиях, при скорости движения к наблюдателю, равной 0,99 скорости света, формулы дают разные результаты, отличающиеся друг от друга в 100 и в 709 раз. Ставится вопрос о выборе истинной формулы. Актуальность работы связана с тем, что СТО используется в прикладных науках, в частности при разработке глобальных спутниковых навигационных систем, ракетной и космической техники. Показано, что использование формул СТО может приводить к ошибкам в оценке определения наблюдаемого односекундного интервала времени часов спутниковых навигационных систем порядка $1 \cdot 10^{-5}$ с. Такая ошибка определения времени может привести к ошибке определения расстояния до навигационного спутника, равной 3000 м. Погрешность определения местоположения навигационных приёмников ГЛОНАСС в горизонтальной плоскости не должна превышать 12 м, поэтому ошибки расчёта интервалов времени, к которым приводят формулы СТО, безусловно, неприемлемы. Использование ошибочных формул может привести к ошибочной работе авиационной и космической техники, поэтому установление того, какая из формул является истинной, является важной и актуальной научной задачей.

Ключевые слова: специальная теория относительности, спутниковая навигационная система, эффект Доплера, транспортные системы страны, аэронавигация, воздушное судно

Для цитирования: Плясовских А. П. К вопросу использования формул специальной теории относительности в спутниковой навигации // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 43. С. 136–144.

ON THE QUESTION OF THE USE OF THE FORMULA OF SPECIAL RELATIVITY IN SATELLITE NAVIGATION

A. P. PLYASOVSKIKH

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

Abstract. The paper considers three formulas for calculating the observed time interval according to the readings of a clock moving towards the observer. The first formula follows from the Lorentz transformations of the special theory of relativity (SRT), the second - from the SRT relation for the Doppler effect, the third formula is given in an article published in the scientific journal “Uspekhi Fizicheskikh Nauk”. It is shown that

under the same conditions, with the speed of movement towards the observer equal to 0.99 of the speed of light, the formulas give different results, differing from each other by 100 and 709 times. The question is raised about the choice of the true formula. The relevance of the work is due to the fact that SRT is used in applied sciences, in particular in the development of global satellite navigation systems, rocket and space technology. It is shown that the use of SRT formulas can lead to errors in determining the observed one-second time interval of clocks of satellite navigation systems of the order of $1 \cdot 10^{-5}$ s. Such an error in determining the time can lead to an error in determining the distance to the navigation satellite equal to 3000 m. The error in determining the location of GLONASS navigation receivers in the horizontal plane should not exceed 12 m, therefore, the errors in calculating the time intervals that SRT formulas lead to are certainly unacceptable. The use of erroneous formulas can lead not only to the erroneous operation of aviation and space technology in which these formulas are used, but also to catastrophic consequences.

Keywords: special relativity, satellite navigation system, Doppler effect, transport systems of the country, air navigation, aircraft

For citation: Plyasovskikh A. P. On the question of the use of the formula of special relativity in satellite navigation, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2023, no. 43, pp. 136–144. (In Russ.)

Введение

В настоящей дискуссионной статье ставится вопрос о том, какая из формул специальной теории относительности (СТО) является истинной. Важность этого вопроса обусловлена тем, что формулы СТО используются при разработке космической и ракетной техники, а также глобальных спутниковых навигационных систем GPS, ГЛОНАСС, GALILEO, BeiDou [1–3].

Использование ошибочных формул в навигационных системах и системах наблюдения может привести к ошибкам в их работе.

Предварительные сведения о радиовещательном автоматическом зависимом наблюдении ADS-B

Радиовещательное автоматическое зависимое наблюдение (ADS-B) в транспортных системах страны представляет собой передачу с борта воздушного судна (ВС) данных о его местоположении (широте и долготе), высоте, скорости, а также об опознавательном индексе и другой информации, полученной от бортовых систем. Сообщение ADS-B может включать информацию о моменте времени передачи сообщения в эфир.

Данные о местоположении, скорости ВС обычно получают от бортовой системы GNSS (глобальной навигационной спутниковой системы), а данные об абсолютной высоте – от кодирующего устройства барометрического высотомера.

Материалы и методы

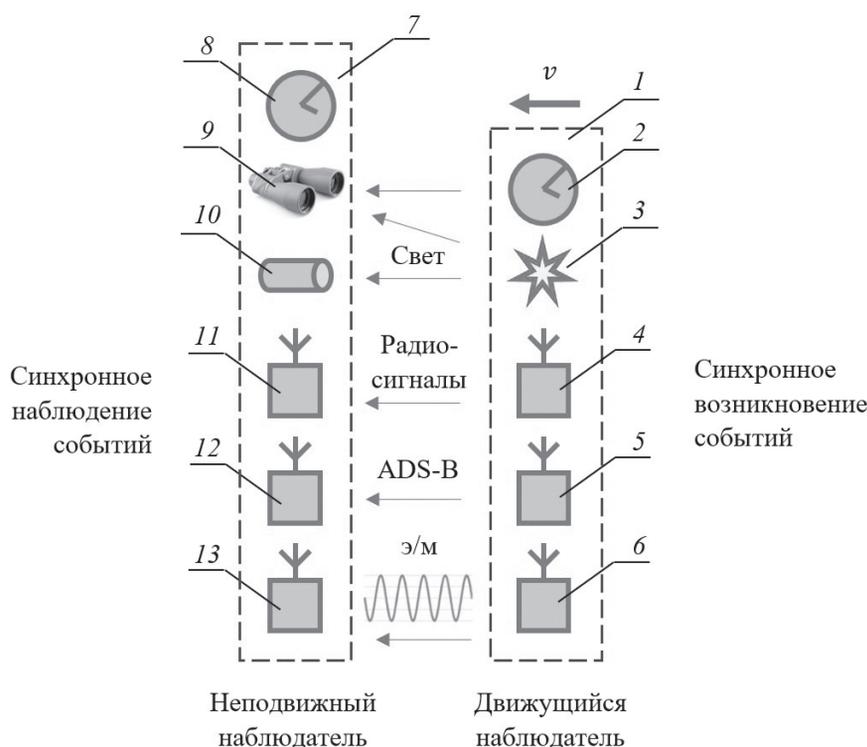
СТО изложена в многочисленных публикациях, например, [4, 5].

Рассмотрим платформу, движущуюся к расположенному в начале координат инерциальной системы отсчёта (ИСО) неподвижному наблюдателю (рисунок).

На платформе I расположены:

- Часы 2 со стрелочным либо цифровым циферблатом, которые дискретно, в моменты начала очередной секунды меняют свои показания.

- Лампа 3 , вспыхивающая с частотой f_0' , равной 1 Гц. Вспышки лампы происходят синхронно с изменением показаний часов, то есть в моменты начала очередной секунды.



Наблюдение за ходом движущихся часов:

1 – движущаяся платформа; 2 – наблюдаемые часы; 3 – лампа; 4 – радиопередатчик сигналов точного времени; 5 – передатчик ADS-B; 6 – передатчик э/м волн; 7 – измерительная установка; 8 – неподвижные часы; 9 – видеорегистратор; 10 – фотодетектор; 11 – радиоприёмник сигналов точного времени; 12 – приёмник ADS-B; 13 – приёмник э/м волн

- Радиопередатчик 4 сигналов точного времени, который транслирует в эфир сигналы точного времени синхронно с изменением показаний часов и вспышками лампы, в моменты начала очередной секунды. Частота передачи в эфир сообщений точного времени f_0^t равна 1 Гц.

- Передатчик 5 ADS-B, который передаёт в эфир сообщения с информацией о моментах времени передачи сообщений. Сообщения ADS-B передаются в эфир синхронно в моменты начала очередной секунды. Частота передачи в эфир сообщений ADS-B f_0^{ADS} равна 1 Гц.

- Передатчик 6 электромагнитной (э/м) волны частотой f_0^v , равной 1 Гц. В эфир передаётся один период волны в секунду, причём начало каждого очередного периода волны происходит в моменты начала очередной секунды.

Рядом с наблюдателем в начале координат расположена измерительная установка 7, обеспечивающая возможность наблюдения (регистрации) сигналов, посылаемых от расположенных на движущейся платформе устройств, и измерения интервалов времени, отсчитываемых по движущимся и неподвижным часам. Измерительная установка включает:

- Видеорегистратор 9, обеспечивающий наблюдение показаний часов, расположенных на движущихся на платформе, в оптическом диапазоне, например с помощью телескопа, а также синхронную видеозапись наблюдаемых показаний неподвижных часов 8 с целью последующего просмотра и анализа их хода. Запись видеорегистратора даёт возможность сравнить показания неподвижных часов наблюдателя с наблюдаемыми показаниями движущихся на платформе часов. Видеорегистратор обеспечивает также регистрацию и запись наблюдаемых вспышек расположенной на движущейся платформе лампы. Запись видеорегистратора даёт возможность измерить частоту наблюдаемых вспышек лампы f^l .

- Фотодетектор 10 вспышек лампы, также позволяющий измерить частоту наблюдаемых вспышек лампы f^l .

- Радиоприёмник 11 сигналов точного времени, обеспечивающий возможность измерения частоты моментов приёма этих сигналов f^l .

- Приёмник 12 ADS-B, обеспечивающий возможность записи в систему объективного контроля информации о времени передачи сообщений ADS-B, а также о времени приёма этих сообщений. Приёмник ADS-B обеспечивает возможность измерения наблюдаемой частоты моментов приёма сообщений f^{ADS} , а также сравнения наблюдаемых показаний движущихся на платформе часов с показаниями неподвижных часов, расположенных в начале координат.

- Приёмник 13, обеспечивающий возможность измерения частоты f^v принятой э/м волны, а также регистрации моментов времени (по часам неподвижного наблюдателя) начала периода принятой э/м волны.

Все устройства, расположенные на движущейся к неподвижному наблюдателю платформе, синхронизированы. С точки зрения наблюдателя, находящегося на движущейся платформе, следующие события происходят одновременно (синхронно):

1. Изменения показаний расположенных на платформе часов, которые отсчитывают время посекундно.
2. Вспышки лампы.
3. Передача в эфир радиосигналов точного времени.
4. Передача в эфир сообщений ADS-B.
5. Начало очередного периода передаваемой в эфир э/м волны.

Информация о всех перечисленных событиях движется к неподвижному наблюдателю в эфире по всем каналам наблюдения с одинаковой скоростью – скоростью света c . Свет от циферблата расположенных на платформе часов идёт к видеорегистратору в начале координат со скоростью c , с этой же скоростью движутся свет вспышек лампы, радиосигналы точного времени, сообщения ADS-B, а также передаваемая э/м волна.

Отсюда следует, что следующие события в начале координат будут одновременными (синхронными):

1. Наблюдение изменений показания расположенных на движущейся платформе часов, которые отсчитывают время посекундно.
2. Наблюдение вспышек лампы.
3. Приём радиосигналов точного времени.
4. Приём сообщений ADS-B.
5. Приём начала периода э/м волны.

Кроме того, из факта синхронной передачи информации о перечисленных событиях на платформе и движения информации об этих событиях к неподвижному наблюдателю (измерительной установке) в начале координат с одинаковой скоростью света, следует, что наблюдаемые (в начале координат) частоты $f^l, f^t, f^{\text{ADS}}, f^v$, а также частота изменения показаний часов на платформе f^{cl} , равны.

$$f^l = f^t = f^{\text{ADS}} = f^v = f^{cl}. \quad (1)$$

В соответствии с (1) при наблюдении из начала координат устройств на движущейся платформе секунды по наблюдаемым показаниям часов идут синхронно с наблюдаемыми вспышками лампы, полученными сигналами точного времени, принятыми сообщениями ADS-B, а также с периодами принятой э/м волны.

Так как частота принимаемой э/м волны равна наблюдаемой частоте хода показаний секунд движущихся часов, то есть $f^v = f^{cl}$, интервал времени Δt_{obs} , отсчитанный по наблюдаемым показаниям движущихся часов за соответствующий интервал времени неподвижных часов Δt , численно равен среднему числу периодов принятой э/м волны $n^v(\Delta t)$ (а также среднему числу наблюдаемых вспышек лампы, среднему числу принятых сигналов точного времени, среднему числу принятых сообщений ADS-B) за этот интервал времени неподвижных часов Δt .

Отсюда следует, что

$$\Delta t_{obs} = f^l \Delta t = f^t \Delta t = f^{ADS} \Delta t = f^v \Delta t = f^{cl} \Delta t. \quad (2)$$

Таким образом, наблюдаемый интервал времени по показаниям движущихся часов Δt_{obs} можно определить разными способами, используя телескоп и видеорегистратор для наблюдения за движущимися часами в оптическом диапазоне, фотодетектор для регистрации вспышек лампы, передатчик и приёмник радиосигналов точного времени, передатчик и приёмник сообщений ADS-B, передатчик и приёмник э/м волн.

Равенства (2) говорят о том, что независимо от способа наблюдения показаний движущихся часов, неподвижный наблюдатель зафиксирует одни и те же показания движущихся часов, один и тот же наблюдаемый темп хода показаний движущихся часов.

Так, например, если на движущейся к неподвижному наблюдателю платформе имеются только часы и передатчик э/м волны частотой 1 Гц, то величину наблюдаемого по показаниям движущихся часов интервала времени Δt_{obs} согласно (2) можно определить по формуле

$$\Delta t_{obs} = f^v \Delta t. \quad (3)$$

Интервал времени, наблюдаемый по показаниям движущихся часов

Выше было доказано, что независимо от способа наблюдения за показаниями движущихся часов (в том числе с использованием э/м волн), результат наблюдения будет одинаковым.

Рассмотрим теперь, что говорит СТО о наблюдаемом интервале времени по показаниям движущихся часов.

Первая формула расчёта наблюдаемого по показаниям движущихся часов интервала времени вытекает из следующего положения СТО: «Если наблюдать часы из системы, по отношению к которой они равномерно движутся со скоростью v , то окажется, что они идут в $1/\sqrt{1-(v/c)^2}$ раз медленнее, чем те же часы, неподвижные по отношению к этой системе» [3, с. 156].

В работе [5, с. 78] приведена формула, подтверждающая это положение:

$$\Delta t = \frac{\Delta t_{obs}}{\sqrt{1-(v/c)^2}}.$$

Отсюда следует что

$$\Delta t_{obs} = \Delta t \sqrt{1-(v/c)^2}. \quad (4)$$

Вторая формула вытекает из эффекта Доплера. В СТО при приближении передатчика к приёмнику этот эффект определяется соотношением:

$$f^v = f_0 \frac{\sqrt{1-(v/c)^2}}{1-v/c}.$$

Учитывая, что в нашем примере передаваемая э/м волна имеют частоту 1 Гц, то есть $f_0^v = 1$, то при приближении платформы с часами к неподвижному наблюдателю

$$f^v = \frac{\sqrt{1-(v/c)^2}}{1-v/c}. \quad (5)$$

Поскольку величина интервала времени Δt_{obs} согласно (3) прямо пропорциональна частоте f^v , учитывая (5), можно получить:

$$\Delta t_{obs} = \Delta t f^v = \Delta t \frac{\sqrt{1-(v/c)^2}}{1-v/c}. \quad (6)$$

Эта формула даёт второй ответ на вопрос о величине интервала Δt_{obs} , если по неподвижным часам прошёл интервал времени Δt .

Третья формула представлена в работе [6]:

$$\Delta t = \Delta t_{obs} (1-v/c).$$

В соответствии с этим

$$\Delta t_{obs} = \Delta t \frac{1}{1-v/c}. \quad (7)$$

Формула (7) получена в работах [7–12]. Результаты экспериментального подтверждения её достоверности приведены в [7].

Результаты и обсуждение

Важным полученным результатом является вывод, выраженный формулой (3): величина наблюдаемого по показаниям движущихся часов интервала времени за интервал времени Δt по неподвижным часам численно равна частоте принимаемых э/м волн (при частоте передатчика, равной 1 Гц), умноженной на Δt . Этот вывод является следствием синхронного наблюдения хода секунд на движущихся часах, вспышек лампы, получения радиосигналов точного времени и сообщений ADS-B, а также периодов принимаемой э/м волны.

Получены три разные формулы расчёта одной и той же физической величины: интервала времени, прошедшего по наблюдаемым показаниям движущихся к неподвижному наблюдателю часов (4), (6) и (7).

В таблице приведены значения наблюдаемого интервала времени Δt_{obs} , выраженного в секундах, прошедшего за одну секунду по часам неподвижного наблюдателя при скорости движения (по направлению к наблюдателю) равной 0,99 скорости света. Значения, рассчитанные по разным формулам, существенно отличаются друг от друга. Значения в таблице, помеченные верхними индексами ⁽¹⁾ и ⁽²⁾, отличаются друг от друга в 100 раз, а значения, помеченные индексами ⁽¹⁾ и ⁽³⁾, отличаются друг от друга в 708,9 раз!

Результаты расчётов наблюдаемого интервала времени Δt_{obs} по формулам (5), (7) и (8), с

Скорость движения, v	Преобразования Лоренца (4)	Эффект Доплера (6)	Публикация [6], (7)
0,99 скорости света	0,1410 ⁽¹⁾	14,1067 ⁽²⁾	100 ⁽³⁾
3500 м/с	0,999999999932	1,000011666735	1,000011666803

При скорости движения, сопоставимой с линейной скоростью движения спутников глобальных навигационных систем (ГНСС), равной 3500 м/с, формула (4) по сравнению с (8) даёт относительную погрешность значения наблюдаемого интервала времени $1,167 \cdot 10^{-3} \%$, формула (6) по сравнению с (7) приводит к относительной погрешности $6,805 \cdot 10^{-9} \%$. В соответствии с этим использование формулы (4) по сравнению с (7) влечёт за собой ошибку вычислений односекундного наблюдаемого интервала времени, равную $1,167 \cdot 10^{-5}$ с. За это

время ε/m волны распространяются на расстояние примерно 3,5 км. Поскольку погрешность определения местоположения в ГЛОНАСС (глобальной навигационной спутниковой системе), не должна превышать 12 м в горизонтальной плоскости¹, использование ошибочных формул СТО в спутниковых навигационных системах может привести к неприемлемым ошибкам в определении местоположения.

Другими словами, использовать некоторые из формул СТО в современных спутниковых навигационных системах нельзя.

Отсюда следует вывод: поскольку все три формулы (4), (6) и (7) при одинаковых исходных данных и, соответственно, при одинаковых условиях приводят к разным значениям наблюдаемого интервала времени, то не исключено, что две из трёх формул могут быть ошибочными.

Таким образом, в статье поставлен важный вопрос: какая из трёх формул (4), (6), (7) наиболее применима для использования при расчётах в современных спутниковых навигационных системах?

Заключение

В настоящей статье приведены три разные формулы расчёта одной и той же физической величины в соответствии со СТО – наблюдаемого интервала времени по показаниям движущихся к неподвижному наблюдателю часов.

При одних и тех же исходных данных эти формулы дают значения, которые при скорости 0,99 скорости света отличаются друг от друга в 100 и в 709 раз.

С использованием разных формул СТО сделан расчёт наблюдаемого с Земли интервала времени часов навигационных спутников ГНСС. Оказалось, при скорости движения навигационных спутников 3500 м/с формулы СТО приводят к ошибке вычислений односекундного интервала времени порядка $1 \cdot 10^{-5}$ с. Эта ошибка оценки времени может привести к ошибке определения расстояния, пройденного ε/m волнами, порядка 3000 м. При пределе допускаемой погрешности определения местоположения потребителей ГЛОНАСС в горизонтальной плоскости, равном 12 м, возможные величины ошибки, к которым приводят формулы СТО, недопустимы.

Использование ошибочных формул может привести к нарушениям в работе авиационной и космической техники, в которой используются эти формулы. Решение вопроса о том, какая из трёх формул СТО наиболее применима для использования при расчётах в современных спутниковых навигационных системах, для ракетной и космической техники, является важной и актуальной научной задачей.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

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

Благодарность: *Выражаю искреннюю благодарность д.т.н. Яковлеву Виктору Тимофеевичу за обсуждение рассматриваемых в работе вопросов, поддержку и рекомендации по изложению материала.*

Список источников

1. Kouba J. Relativity effects of Galileo passive hydrogen maser satellite clocks, *GPS Solut*, 23, 117 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0910-7>
2. Mudrak A., De Simone P., Lisi M. Relativistic Corrections in the European GNSS Galileo. *Aerotec. MissiliSpaz*, 94, 2015, pp. 139–144. <https://doi.org/10.1007/BF03404697>

¹ ГОСТ 32454-2013. Межгосударственный стандарт. Глобальная навигационная спутниковая система. Параметры радионавигационного поля. Технические требования и методы испытаний (введён в действие Приказом Росстандарта от 15.04.2014 № 355-ст).

3. Understanding GPS: Principles and Applications. Ed. by E D. Kaplan, Artech House, Inc., Norwood, Massachusetts, 1996, 554 p.
4. Эйнштейн А. Принцип относительности и его следствия в современной физике // Собр. науч. тр. Т. 1. Москва: Наука, 1965. С. 138–164.
5. Угаров В. А. Специальная теория относительности. Москва: Наука, 1977. 384 с.
6. Болотовский Б. М., Малыкин Г. Б. Видимая форма движущихся тел // Успехи физических наук. 2019. Т. 189. № 10. С. 1084–1103.
7. Абдульманов Т. М. и др. Эксперимент по измерению наблюдаемого темпа хода движущихся часов // Автоматика и программная инженерия. 2022. № 4(42). URL: <http://www.jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-4-2022-4.pdf> (дата обращения: 04.04.2023).
8. Плясовских А. П. Закон aberrации и его приложения в навигации и управлении воздушным движением. Москва: Знание-М, 2022. 70 с.
9. Плясовских А. П. К вопросу aberrации при продольном движении материальной точки относительно наблюдателя // Современные научные исследования и инновации. 2022. № 2 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2022/02/97670> (дата обращения: 10.02.2022).
10. Плясовских А. П. О законе aberrации // Точная наука. 2022. № 131. С. 30–42. URL: <https://idpluton.ru/wp-content/uploads/tv131.pdf> (дата обращения: 02.05.2022).
11. Plyasovskikh A. P. et al. The using of special relativity in navigation and ATC, *Science and Innovation*, 2023, Series A, vol. 2, issue 2, pp. 46–61. <https://doi.org/10.5281/zenodo.761432>
12. Plyasovskikh A. P., Eshmuradov D. E. Experiment on measuring the observed rate of a moving clock, *Science and Innovation*, 2023, Series A., vol. 2, issue 3, pp. 169–188. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7767737>

References

1. Kouba, J. Relativity effects of Galileo passive hydrogen maser satellite clocks, *GPS Solut*, 23, 117 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0910-7>
2. Mudrak A., De Simone P., Lisi M. Relativistic Corrections in the European GNSS Galileo. *Aerotec. MissiliSpaz*, 94, 2015, pp. 139–144. <https://doi.org/10.1007/BF03404697>
3. Understanding GPS: Principles and Applications. Ed. by E D. Kaplan, Artech House, Inc., Norwood, Massachusetts, 1996, 554 p.
4. Jejnshitejn A. Princip otноситel'nosti i ego sledstviya v sovremennoj fizike. Sobr. nauch. tr. vol. 1, Moscow, Nauka Publ., 1965, pp. 138–164. (In Russ.)
5. Ugarov V. A. Special'naja teoriya otноситel'nosti, Moscow, Nauka Publ., 1977, 384 p. (In Russ.)
6. Bolotovskij B. M., Malykin G. B. Visible shape of moving bodies, *Physics-USpekhi*, 2019, vol. 189, no. 10, pp. 1084–1103. (In Russ.) <https://doi.org/10.3367/UFNe.2018.08.038407>
7. Abdulmanov T. M. and others. An Experiment to Measure the Observed Rate of a Moving Clock, *Automatics and Software Enginery*, 2022, no. 4(42), available at: <http://www.jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-4-2022-4.pdf> (accessed: 04.04.2023). (In Russ.)
8. Pljasovskikh A. P. *Zakon aberracii i ego prilozhenija v navigacii i upravlenii vozdušnym dvizheniem*, Moscow, Znanie-M Publ., 2022, 70 p. (In Russ.)
9. Pljasovskikh A. P. K voprosu aberracii pri prodol'nom dvizhenii material'noj tochki otноситel'no nabljudatelja, *Modern scientific researches and innovations*, Electronic journal, 2022, no. 2. (In Russ.)
10. Pljasovskikh A. P. On the law of aberration, *Tochnaja nauka*, 2022, no. 131, pp. 30–42. (In Russ.)
11. Plyasovskikh A. P. et al. The using of special relativity in navigation and ATC, *Science and Innovation*, 2023, Series A, vol. 2, issue 2, pp. 46–61. <https://doi.org/10.5281/zenodo.761432>
12. Plyasovskikh A. P., Eshmuradov D. E. Experiment on measuring the observed rate of a moving clock, *Science and Innovation*, 2023, Series A., vol. 2, issue 3, pp. 169–188. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7767737>

Информация об авторе

Плясовских Александр Петрович, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия, al.plyasovskih@yandex.ru

Author information

Plyasovskikh Alexander P., Doctor of Sciences (Engineering), Professor, St. Petersburg State University of Civil Aviation named in honor of Air Chief Marshal A. A. Novikov, St. Petersburg, Russia, al.plyasovskih@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 05.04.2023; одобрена после рецензирования 20.06.2023; принята к публикации 27.06.2023.

The article was submitted 05.04.2023; approved after reviewing 20.06.2023; accepted for publication 27.06.2023.

Обзорная статья
УДК 351.814.2

О ПОКАЗАТЕЛЯХ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЁТОВ, ИХ ЦЕЛЕВЫХ И ПОРОГОВЫХ УРОВНЯХ

В. Д. ШАРОВ¹, Р. А. ОБРАЗЦОВ², П. М. ПОЛЯКОВ¹

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

² *Центральное межрегиональное территориальное управление воздушного транспорта Центральных районов Федерального агентства воздушного транспорта Минтранса России, Москва, Россия*

Аннотация. Назначение показателя безопасности полётов (БП) в масштабах как государства, так и отдельного авиапредприятия, целевого и пороговых уровней показателя БП является обязательным по стандартам Международной организации гражданской авиации (ИКАО). Государство должно это делать в рамках Государственной программы по БП, а авиапредприятие – в рамках своей системы управления БП (СУБП). Однако и государства, и авиационные организации сталкиваются с проблемами при разработке такого показателя и назначении его уровней. В статье анализируется ситуация с показателями БП в отечественной гражданской авиации (ГА), отмечаются особенности и недостатки их представления в действующем нормативном документе – Постановлении Правительства Российской Федерации. Разъясняется вопрос о возможности использования на государственном и корпоративном уровне рекомендаций ИКАО по рассматриваемому и другим вопросам, которые имеются в Руководстве по управлению безопасностью полётов (РУБП) ИКАО Doc 9859, 3-е изд. Предлагается методика расчета целевого и порогового уровней показателя БП на основе интервальной оценки параметров распределения значений показателя за прошлый период, которая является математически более корректной, чем методика, рекомендуемая ИКАО. В качестве примера приведён сравнительный расчёт целевого и порогового уровней по двум этим методикам по данным отечественной ГА за 2018–2020 гг. с построением экрана мониторинга показателя. Представлен мониторинг предлагаемого показателя по фактическим данным отечественной ГА за 2022 г.

Ключевые слова: программа безопасности полётов, управление безопасностью полётов, показатель безопасности полётов, целевой уровень, пороговые уровни, транспортные системы страны

Для цитирования: Шаров В. Д., Образцов Р. А., Поляков П. М. О показателях безопасности полётов, их целевых и пороговых уровнях // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 43. С. 145–155.

ABOUT SAFETY PERFORMANCE INDICATORS, THEIR TARGETS AND TRIGGERS

V. D. SHAROV¹, R. A. OBRAZTSOV², P. M. POLYAKOV¹

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

² *Central Interregional Territorial Air Transport Department of the Central Districts of the Federal Air Transport Agency. Ministry of Transport of the Russian Federation, Moscow, Russia*

Abstract. The assignment of the safety indicator (SPI) at the state level and at the level of the airline, and its target and trigger levels is mandatory according to the standards of the International Civil Aviation Organization (ICAO). The state should do this within the framework of the State Safety Program, and the

airline should do it within its BP management system. However, both States and aviation organizations face problems when developing the indicator and assigning levels. The article analyzes the situation with SPI in domestic civil aviation, highlights the features and disadvantages of their presentation in the current regulatory document Resolution of the Government of the Russian Federation. The question of the possibility of using the ICAO recommendations on the considered and other issues at the state and corporate level, which are available in the ICAO Safety Management Manual Doc 9859, 3rd ed., is explained. A methodology for calculating the target and trigger levels of the BP indicator is proposed based on an interval assessment of the parameters of the distribution of the indicator values over the past period, which is mathematically more correct than the methodology proposed in the ICAO recommendations. As an example, a comparative calculation of the target and trigger levels for these two methods is given according to the data of the domestic GA for 2018–2020 with the construction of the indicator monitoring screen. Monitoring of the proposed indicator based on actual data for 2022 is presented.

Keywords: state safety programme, safety management, safety indicator, target, trigger, transport systems of the country

For citation: Sharov V. D., Obratsov R. A., Polyakov P. M. About safety performance indicators, their targets and triggers, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2023, no. 43, pp. 145–155. (In Russ.)

Введение

Поскольку БП определена как «состояние, при котором риски авиационной деятельности снижены до приемлемого уровня и контролируются» [1], естественно ставится вопрос об установлении этого уровня. При поисках ответа на него возникает путаница понятий. Риск в рамках «технократической концепции» определяется [2] как сочетание оценок вероятности негативного события и серьезности его последствий. Таким образом, риск – это прогноз, можно говорить только об оценке риска, но не об «измерении» его.

Методов управления риском много [3], но количественная оценка его сложна, и эта задача в авиации в законченном виде не решена. Работы в этом направлении ведутся с использованием разных подходов: от цепочек условных вероятностей по группам факторов «Человек», «Машина», «Среда» до сложных алгоритмов, учитывающих сотни параметров [4–6].

При любом методе оценка риска даёт возможность лишь лучше распределять средства для предотвращения авиационных происшествий (АП). Эффективность этой работы зависит от метода, квалификации риск-менеджеров и экспертов. Для того, чтобы проверить, находится ли национальная ГА на приемлемом уровне риска, предназначен компонент системы управления БП (СУБП) № 3 под названием «обеспечение БП» (правильнее – «подтверждение» [7] уровня БП) [8] с помощью конкретных количественных показателей (SPI), их целевых (SPT) и пороговых (триггеров) значений. Показатели должны соответствовать целям по БП, определённым в [8].

Таким образом, управление риском для БП с принятием решений – с одной стороны и задание SPI, целей, триггеров, их мониторинг и также принятие решений – с другой стороны, это две разные процедуры в СУБП. Они, безусловно, связаны, эта связь чётко проявляется, например, при прогнозировании уровней БП в авиапредприятии [9], но смешивать их в одну процедуру не следует, у них разные задачи.

Показатели, цели и триггеры в соответствии с требованиями ИКАО устанавливаются в Государственной программе по БП (ГосПБП) для государства и транспортных систем страны и в рамках СУБП организации. По данному вопросу опубликовано много исследований и внедрено много конкретных решений. Однако ситуация с нормативным регулированием этого важного вопроса и его понимание в авиапредприятиях меняется постоянно, поэтому целесообразно остановиться на нём ещё раз.

Показатель безопасности полётов на государственном уровне и текущая ситуация в отечественной ГА

Стандарт ИКАО [1, п. 3.2] требует от государств установления показателя уровня БП. В каких единицах может быть задан такой показатель? Приемлемой вероятностью или частотой авиационных происшествий (АП) или катастрофы? Некоторым «целевым уровнем безопасности» (TLS), как при организации воздушного движения [10]? Государства избегают устанавливать такие уровни, но в некоторых странах это делается. Так, в Великобритании [11] устанавливался уровень 10,6 катастроф на 1 млн ч налёта. А в Постановлении Правительства Казахстана¹ приведено несколько конкретных значений показателей, в том числе и количество катастроф 0,00155 на 100 тыс. ч. Все показатели из этого документа Казахстана приведены в статье [12], но со ссылкой на проект ГосПБП России. Действительно, такой проект появился в 2016 году, обсуждался, но был негативно оценён специалистами. Быстро выяснилось, что он является практически полным заимствованием из указанного документа Казахстана без указания первоисточника, к реалиям России не имеет отношения, и об этом проекте очень быстро забыли.

Отметим, что планка, установленная Казахстаном в 2016 г., почти в 700 раз (!) выше той, что была в Великобритании в 2009 г., хотя фактические значения показателя катастроф в мировой авиации за 2009–2016 гг. [13, стр. 14] улучшились не более, чем в 3–4 раза.

Очевидно, что в разных странах по-разному подходят к установлению таких уровней. В этой связи отметим важность обмена информацией по БП на всех уровнях. Подробный анализ современного состояния вопроса приведён в статье [14]. Авторы показывают, что объединение разнородных информационных потоков, разработка единого алгоритма управления БП должны найти свое отражение в ГосПБП.

Целесообразно шире использовать международный опыт. Например, по данным IATA² [15, стр. 35] регион NASIA (Северная Азия), куда входит Китай, в 2021 г. имел показатель «количество АП на 1 млн полётов» – 0,2. Это в 5 раз лучше, чем в среднем в мире и в 20 (!) раз лучше, чем в СНГ.

На декабрь 2022 г. полноценной ГосПБП в том виде, как это понимается в ИКАО, в России нет. В то же время, как известно, Россия не заявила о невыполнении какого-либо из стандартов из Приложения 19 к Конвенции о Международной гражданской авиации [1], и в Воздушном кодексе Российской Федерации (ст. 24.1) указано, что наша государственная система управления БП основана на стандартах. Должен выполняться и стандарт установления целевого уровня БП. Однако задать его в допустимой частоте катастроф невозможно в принципе, поскольку в России не установлен допустимый риск на транспорте, например, в виде вероятности гибели человека в течение года [2].

В Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 г., в редакции распоряжения Правительства от 11.06.2014 № 1032 введён индикатор «Снижение количества происшествий на воздушном транспорте на один полёт по отношению к 2010 г.». По инновационному варианту к 2030 г. этот показатель должен составлять 50 %, а по базовому – 76 % от уровня 2010 г. Как показано в статье [16], изменение показателя по годам было задано близким к линейному. Однако распоряжением от 27.11.2021 № 3363-р был введён новый вариант Транспортной стратегии до 2030 г., в котором количественных оценок уровня БП нет.

Единственным известным документом, где установлены уровни БП в ГА России, является Постановление Правительства № 1064³, в котором устанавливаются 30 «ключевых показателей

¹ Постановление Правительства Казахстана от 11.03.2016 г. № 136 [Электронный ресурс]. URL: <https://zakon.uchet.kz/rus/docs/P1600000136> (дата обращения: 10.12.2022).

² IATA – International Air Transport Association – Международная ассоциация воздушного транспорта.

³ Постановление Правительства Российской Федерации от 21.06.2021 № 1064. Об утверждении положения о федеральном государственном контроле (надзоре) в области гражданской авиации.

федерального государственного контроля (надзора) в области ГА и их целевых значений». Все эти показатели установлены относительно 1 млн перевезённых пассажиров и могут быть разделены на группы I, II и III, как это представлено в табл. 1.

Таблица 1

Структурированное представление целевых значений показателей БП по Постановлению Правительства Российской Федерации № 1064

Наименование ключевого показателя	Целевые значения по годам				
	2022	2023	2024	2025	2026
I. Количество погибших лиц, находившихся на борту, в результате АП на 1 млн перевезённых пассажиров					
Самолёты МТОМ ⁴ >5700 кг, коммерческие авиаперевозки	0,7	0,66	0,59	0,55	0,51
Самолёты МТОМ<5700 кг, коммерческие авиаперевозки	0,1	0,09	0,08	0,08	0,07
Вертолёты, коммерческие авиаперевозки	0,13	0,12	0,11	0,1	0,09
Самолёты МТОМ>5700 кг, авиационные работы (АР)	0,1	0,09	0,08	0,08	0,07
Самолёты МТОМ<5700 кг, АР	0,1	0,09	0,08	0,08	0,07
Вертолёты, АР	0,1	0,09	0,08	0,08	0,07
Самолёты МТОМ>5700 кг, авиация общего назначения (АОН)	0,1	0,09	0,08	0,08	0,07
Самолёты МТОМ<5700 кг, АОН	0,14	0,14	0,12	0,11	0,11
Вертолёты, АОН	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
Воздушные суда (ВС), за исключением самолётов и вертолётов	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01
II. Количество лиц, находившихся на борту, получивших вред здоровью в результате АП на 1 млн перевезённых пассажиров					
Самолёты МТОМ>5700 кг, коммерческие авиаперевозки	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
Самолёты МТОМ<5700 кг, коммерческие авиаперевозки	0,1	0,09	0,08	0,08	0,07
Вертолёты, коммерческие авиаперевозки	0,1	0,09	0,08	0,08	0,07
Самолёты МТОМ>5700 кг, АР	0,1	0,09	0,08	0,08	0,07
Самолёты МТОМ<5700 кг, АР	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
Вертолёты, АР	0,1	0,09	0,08	0,08	0,07
Самолёты МТОМ>5700 кг, АОН	0,1	0,09	0,08	0,08	0,07
Самолёты МТОМ<5700 кг, АОН	0,1	0,09	0,08	0,08	0,07
Вертолёты, АОН	0,1	0,09	0,08	0,08	0,07
ВС, за исключением самолётов и вертолётов	0,1	0,09	0,08	0,08	0,07
III. Количество авиационных происшествий с ВС на 1 млн перевезённых пассажиров					
Самолёты МТОМ>5700 кг, коммерческие авиаперевозки	0,1	0,09	0,08	0,08	0,07
Самолёты МТОМ<5700 кг, коммерческие авиаперевозки	0,1	0,09	0,08	0,08	0,07
Вертолёты, коммерческие авиаперевозки	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01

⁴ МТОМ – Maximum Take Off Mass – максимальная взлётная масса.

Отметим, что показатели группы I не могут удовлетворять общество на фоне аналогичных показателей в мировой и российской ГА за последние 3 года (см. табл. 2, в которой использованы данные IATA [15, стр. 32] и данные по БП ГА России за 10 лет, которые ежегодно публикует Росавиация).

Таблица 2

Фактические значения показателя группы I в ГА России и мировой ГА

год		2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
К-во погибших на 1 млн перевезённых	IATA	0,15	0,08	0,20	0,05	0,06	0,01	0,1	0,06	0,08	0,05
	Росавиация	0,96	0,95	0,41	0,29	0,32	0,24	0,89	0,34	0,16	0,43

Пример установления приемлемого уровня такого показателя приведён в [17]. Таблица и диаграмма, построенная по этим данным, использованы в статье [12, рис. 4], но отнесены к государствам СНГ. На самом деле в статье [17] этот пример относится к США, где на основе данных в коммерческой авиации за период 1997–2006 гг. был установлен базовый уровень 0,089 на 1 млн, и с учётом линейного уменьшения к 2025 году он должен достичь 0,044.

Количество АП на 1 млн перевезённых (группа III табл. 1) в статистических отчётах государств и организаций, как правило, не применяется. Обычно приводятся данные по количеству АП (или катастроф) на 100 тыс. ч налёта или на 1 млн полётов. Опираясь на анализы Росавиации, где приведено количество перевезённых пассажиров за год, фактические значения этого показателя K_F рассчитываются по формуле:

$$K_F = \frac{N_{АП}}{P} \cdot 10^6, \tag{1}$$

где $N_{АП}$ – количество АП; P – количество пассажиров, перевезённых коммерческой авиацией за год.

По результатам расчётов по формуле (1) за 2007–2021 гг. построена диаграмма (рис. 1), на которую нанесены и целевые значения этого показателя из Постановления № 1064. Согласно рис. 1 целевые значения на 2022–2026 гг. практически совпадают с линией экспоненциального тренда фактических показателей за 2007–2021 гг., что можно рассматривать как обоснование для установления этих целевых значений. Целевые показатели группы III заданы одинаковыми почти для всех самолётов и вертолётов коммерческой ГА. Такая «уравниловка» для 8 категорий ВС, как и отличия для двух категорий, представляются необоснованными. Проверить выполнение будет трудно, особенно по АР и АОН, ввиду отсутствия точных данных по перевезённым пассажирам.

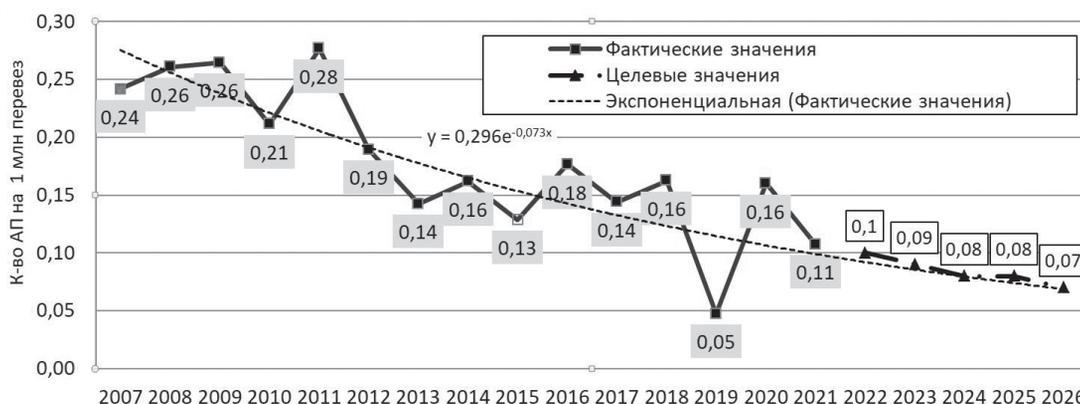


Рис. 1. Показатель «Количество АП на 1 млн перевезённых» в коммерческой ГА России

Особенности рекомендаций ИКАО по установлению целевого и пороговых уровней показателя безопасности полётов

Расчёт и мониторинг показателя БП составляет основную «количественную» сущность компонента 3 СУБП *Safety assurance*, которая в русском издании имеет название «Обеспечение БП» [8]. Как отмечалось в [7], перевод неудачный, поскольку под обеспечением БП в авиации всегда понималась вся работа в области БП. Здесь речь идёт о выполнении стандарта ИКАО по оценке фактического уровня БП с помощью количественных показателей. Рекомендации ИКАО по методам оценки на уровне государства и поставщика услуг содержатся в главе 4 РУБП ИКАО [8].

Некоторые из этих рекомендаций вызывают вопросы. Например, в п.4.2.3 говорится, что цели по БП *не должны быть (do not have to be)* в отдельности конкретными, измеряемыми, достижимыми, надёжными и своевременными (SMART), если они образуют комплекс. А вот комплекс должен соответствовать SMART. Далее в 4.3.3.2 и в пояснении к рис. 4-4 говорится уже не о «комплексах», а о конкретной цели «сокращение частоты выездов за пределы ВПП» и указано, что она соответствует SMART. Получается, что в комплексе могут быть цели, как соответствующие, так и не соответствующие SMART, что может вызывать затруднения при применении.

Далее, на рис. 4-5 в качестве примера приведён график мониторинга количества катастроф. Средний уровень (*Mean of preceding period*) за предыдущие годы – 27, а отдельные значения превышают 35. Непонятно, как появился целевой уровень 8, и почему пороговые уровни (*Alert Levels*) равны 35 и 40, если они получаются добавлением одного и двух средних квадратических отклонений (СКО) к среднему. Дётся указание: «Задача состоит в удержании показателей ниже целевого», – т. е. ниже 8 при среднем по годам 27.

В 4-м издании РУБП ИКАО [8] не приведены формулы расчёта уровней. Отметим, что опущены и другие рекомендации из 3-го издания [18]: «Контрольная карта анализа недостатков и план реализации СУБП», доб. 7 к гл. 4; и «Оценка культуры безопасности организации OSC/ORP», доб. 1 к гл. 2. С вопросом о возможности использовать рекомендации из документа, который отменён, в ИКАО обращалась авиакомпания «Волга-Днепр». В ответе директора авиационной комиссии ИКАО было сказано, что поставщик обслуживания может использовать рекомендации прежних изданий документов ИКАО, если нет противоречия с действующими. Поэтому можно законно использовать рекомендации из доб. 6 к гл. 5 РУБП ИКАО [18], что и делается на практике.

Необходимо внести ясность в корректность вычислений. Рассмотрим этот вопрос с позиций теории вероятностей. ИКАО рекомендует устанавливать целевой уровень, например, ежемесячного значения показателя, на основе среднего значения за предыдущий период 1 или 2 года и СКО. В теории вероятностей это точечная оценка математического ожидания \tilde{m} по выборочному среднему и точечная оценка СКО $\tilde{\sigma}$ случайной величины «показатель БП», которая выполняется по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{m} &= \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \\ \tilde{\sigma} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{m})^2}{n-1}}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где x_i – ежемесячные наблюдаемые показатели за рассматриваемый период; n – количество месяцев рассматриваемого периода.

Отметим неточность в формуле расчёта СКО в РУБП ИКАО, стр. 5 доб. 6-1. В знаменателе формулы расчёта СКО записано n , а должно быть $(n-1)$, как в формуле (2), что обеспечивает получение состоятельной и несмещённой оценки дисперсии и СКО.

Из теории вероятности известно, что точечная оценка не позволяет решить задачу установления точности и надёжности результата, особенно при малом числе наблюдений. Решением этой задачи является построение доверительных интервалов. Доверительный интервал I_β для математического ожидания выражается в виде:

$$I_{\beta m} = (\tilde{m} - t_\beta \sigma_{\tilde{m}}; \tilde{m} + t_\beta \sigma_{\tilde{m}}), \quad (3)$$

где t_β – число, заданное равенством $\Phi(t_\beta) = (1 + \beta)/2$, $\Phi(x)$ – функция стандартного нормального распределения с математическим ожиданием 0 и дисперсией 1; β – заданная доверительная вероятность, например для $\beta = 0,95$ $t_\beta = 1,96$; $\sigma_{\tilde{m}}$ – СКО оценки \tilde{m} , которое рассчитывается как

$$\sigma_{\tilde{m}} = \frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{n}}. \quad (4)$$

Доверительный интервал для СКО:

$$I_{\beta \sigma} = (\sqrt{\tilde{D} - t_\beta \sigma_{\tilde{D}}}; \sqrt{\tilde{D} + t_\beta \sigma_{\tilde{D}}}), \quad (5)$$

где $\tilde{D} = \tilde{\sigma}^2$ – точечная оценка дисперсии, $\sigma_{\tilde{D}}$ – это её СКО, определяются как:

$$\sigma_{\tilde{D}} = \sqrt{\frac{2}{n-1} \tilde{D}}. \quad (6)$$

Приведённое решение основано на использовании центральной предельной теоремы теории вероятностей. Как известно, практически нормальным можно считать закон распределения суммы для оценки математического ожидания при 10–20 слагаемых, а для дисперсии – при 20–30 слагаемых. Поэтому предпочтительно для установления целевого уровня ежемесячного показателя БП использовать данные не за 1–2, а за 3 года.

Можно утверждать, что более корректным математически является использование в качестве целевого (*target*) уровня K_T показателя БП не точечной оценки, а верхней границы доверительного интервала математического ожидания. Аналогично, для пороговых (*alarm*) уровней K_{A-1} и K_{A-2} следует использовать верхнюю границу доверительного интервала СКО.

Из практических соображений представляется достаточным иметь 2 пороговых уровня, чтобы представить на графике простую светофорную модель (рис. 2).

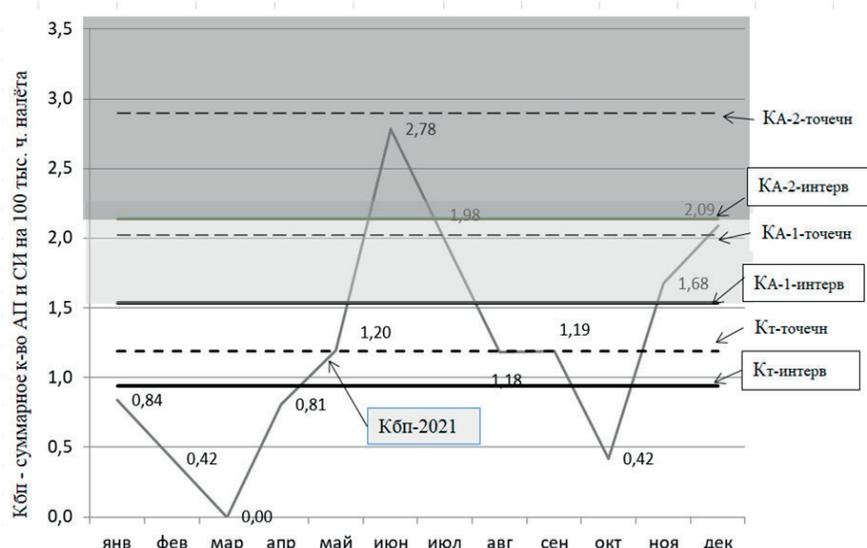


Рис. 2. Мониторинг показателя КБП за 2021 г. с учётом уровней по данным 2018–2020 гг.

На основе формул (3)–(6) после некоторых преобразований окончательно имеем:

$$K_T = \left(1 - \frac{C}{100}\right) \left(\tilde{m} + t_\beta \frac{\tilde{\sigma}}{\sqrt{n}}\right),$$

$$K_{A-1} = K_T + \sqrt{\tilde{\sigma}^2 \left(1 - t_\beta \sqrt{\frac{2}{n-1}}\right)}, \quad K_{A-2} = K_T + \sqrt{\tilde{\sigma}^2 \left(1 + t_\beta \sqrt{\frac{2}{n-1}}\right)},$$

где C – величина в процентах, на которую корректируется уровень показателя БП (при $C > 0$ целевой и пороговые уровни уменьшаются, при $C < 0$ – увеличиваются).

Методика рекомендуется для показателя на государственном и на корпоративном уровне. Для сравнения расчётов по точечным и интервальным оценкам выполнены расчёты по данным ГА России за 2018–2020 гг. В качестве показателя принята рекомендация из [18] – учитывать АП и серьезные авиационные инциденты (СИ).

Тогда ежемесячный показатель $K_{БП}$ рассчитывается по формуле:

$$K_{БП} = \frac{N_{АП} + N_{СИ}}{T} \cdot 10^5, \quad (7)$$

где $N_{АП}$, $N_{СИ}$ – количество АП и СИ за данный месяц, T – налёт часов за этот месяц.

Очевиден недостаток данного показателя: все АП и СИ входят в формулу с одинаковым «весом», равным 1, хотя они разные по серьёзности и влиянию на БП. С аналогичной проблемой сталкиваются авиапредприятия и решают её по-разному. Некоторые варианты решений рассмотрены в монографии [19]. Однако для сравнения двух методов расчёта вид показателя не имеет принципиального значения.

Данные по налёту за год и количеству авиационных событий по месяцам взяты из ежегодных отчётов Росавиации. Распределение годового налёта по месяцам выполнено авторами оценочно. Ежемесячные значения $K_{БП}$, рассчитанные по формуле (7), – это и есть значения случайной величины x_i в формулах (2). Доверительные интервалы строились для вероятности 0,95. Получены следующие результаты.

Точечные оценки:

K_T -точечн. (*target*) = 1,193; K_{A-1} -точечн. (*trigger1*) = 2,017; K_{A-2} -точечн. (*trigger2*) = 2,904.

Интервальные оценки как верхние границы доверительного интервала:

K_T -интерв. (*target*) = 1,448; K_{A-1} -интерв. (*trigger1*) = 2,447; K_{A-2} -интерв. (*trigger2*) = 3,446.

Результаты расчётов целевых и пороговых значений $K_{БП}$ различаются в данном случае на 15–18 %, что может существенно влиять на выводы при мониторинге $K_{БП}$.

На диаграмму (рис. 2) нанесены результаты расчёта $K_{БП}$ по (7) по данным 2021 года.

Заключение

Установление целевого и пороговых уровней показателя БП и мониторинг этого показателя является важным элементом управления БП как на государственном уровне, так и на уровне поставщика авиационных услуг (авиапредприятия) в СУБП.

Единственным действующим документом, где приведены такие показатели и их целевые уровни на ближайшие годы для отечественной ГА, является Постановление Правительства Российской Федерации от 21.06.2021 № 1064. Обоснования выбора именно этих показателей и назначения их целевых уровней не приводятся.

В результате исследования выявлены следующие недостатки документа.

1. Целевой уровень важнейшего показателя – количества погибших на миллион перевезённых – в несколько раз превышает фактическое значение этого показателя в отечественной

ГА за последние годы и почти на порядок превышает фактические уровни этого показателя в мировой ГА по данным IATA.

2. Отсутствует обоснование ряда одинаковых целевых уровней, как для самолётов, так и для вертолётов, в том числе и для ВС авиации общего назначения, и для ВС, выполняющих авиационные работы.

Для установления целевого и пороговых уровней БП в авиапредприятиях России широко применяются рекомендации ИКАО из 3-го издания РУБП 2013 г. Согласно разъяснениям, полученным в ИКАО, это можно делать, несмотря на то, что 3-е изд. заменено 4-м. Однако необходимо учитывать некоторые неточности этих рекомендаций:

1. Для обеспечения несмещённой оценки СКО в формуле её расчёта следует в знаменателе использовать $(n-1)$ вместо n .

2. Более точной и надёжной оценкой уровней показателя являются не точечные, а интервальные оценки среднего и СКО, рассчитанные по приведённым в статье формулам и с учётом заданной доверительной вероятности.

3. Приемлемая корректность расчётов, основанных на центральной предельной теореме теории вероятностей, достигается в данном случае при использовании ежемесячных данных не менее, чем за 3 года.

В практической работе по управлению БП в авиапредприятии необходимо учитывать, что РУБП ИКАО, Дос 9859, являясь техническим руководством, носит рекомендательный характер. К рекомендациям этим нужно относиться с осторожностью, особенно с учётом неточностей их перевода на русский язык.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников

1. Приложение 19 к Конвенции о международной гражданской авиации. Управление безопасностью полётов. ИКАО. Изд. 2. 2016. 47 с.
2. Безопасность России. Правовые социально-экономические и научно-технические аспекты. Анализ риска и проблем безопасности. В 4-х частях. Ч. 1. Основы анализа и регулирования безопасности / Научн. руковод. К. В. Фролов. М.: МГФ «Знание», 2006. 640 с.
3. ГОСТ Р 58771-2019. Менеджмент риска. Технологии оценки риска. Москва: Стандартинформ, 2020, 90 с.
4. Гузий А. Г., Капустин А. Г., Лушкин А. М., Фокин А. В. Методология количественного оценивания риска для безопасности полётов в самолётном сегменте коммерческой авиации // Научный вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22. № 4. С. 33–42.
5. Causal Model for Air Transport Safety. NLR, Amsterdam, 2009, 136 p., available at: <https://www.nlr.org/wp-content/uploads/2019/10/CATS-final-report.pdf> (accessed 10.12.2022).
6. Бутов А. А., Волков М. А., Макаров В. П., Орлов А. И., Шаров В. Д. Автоматизированная система прогнозирования и предотвращения авиационных происшествий при организации и производстве воздушных перевозок // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Том 14. № 4(2). С. 380–385.
7. Шаров В. Д., Елисеев Б. П., Воробьев В. В. Анализ недостатков в описании процедур управления риском безопасности полётов в документах ИКАО // Научный вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22. № 2. С. 49–61.
8. ИКАО Дос 9859. Руководство по управлению безопасностью полётов (РУБП). 4-изд. ИКАО. 2018. 218 с.
9. Гузий А. Г., Лушкин А. М., Майорова Ю. А. Теория и практика экспертного анализа в системах управления безопасностью полётов: монография. Москва: ИД Академии Жуковского, 2015. 127 с.

10. Safety Minima Study: Review of Existing Standards and Practices. Eurocontrol, 2000, 44 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/4700.pdf> (дата обращения: 24.06.2023).
11. CAP-784 State Safety Programme for the UK. 2009, 60 с. [Электронный ресурс] URL: <https://www.afeonline.com/shop/caa-cap-784.html> (дата обращения: 10.12.2022).
12. Рухлинский В. М., Хаустов А. А. Определение приемлемого уровня безопасности полётов поставщика авиационных услуг // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 39. С. 101–113.
13. A Statistical Analysis of Commercial Aviation Accidents 1958–2021. Airbus, 2022, 36 p. [Электронный ресурс]. URL: <https://accidentstats.airbus.com/sites/default/files/2022-02/Statistical-Analysis-of-Commercial-Aviation-Accidents-1958-2021.pdf> (дата обращения: 10.12.2022).
14. Будзко В. И., Демин С. С., Дутов А. В., Кан А. В., Михайлин И. С., Шапкин В. С. Система управления безопасностью авиационной деятельности – основной элемент перспективной авиатранспортной системы // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2020. № 32. С. 121–133.
15. 2021 Safety Report, IATA, Issued April 2022, Ed. 58, 269 p. [Электронный ресурс]. URL: https://www.iata.org/contentassets/bd3288d6f2394d9ca3b8fa23548cb8bf/iata_safety_report_2021.pdf (дата обращения: 10.12.2022).
16. Шаров В. Д., Каюмов В. П., Толстых С. А. Оценка эффективности СУБП поставщика услуг // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2020. № 30(341). С. 117–128.
17. Federal Aviation Administration FY2022 Portfolio of Goals. 127 p. [Электронный ресурс]. URL: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-04/fy22_portfolio_goals.pdf (дата обращения: 10.12.2022).
18. ИКАО Doc 9859. Руководство по управлению безопасностью полётов (РУБП). 3-изд. ИКАО. 2013. 300 с.
19. Sharov V. D., Vorobyov V. V., Zatuchny D. A. *Risk Management Methods in the Aviation Enterprise*. Springer Link, 2021, 146 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-33-6017-4>

References

1. Annex 19 to the Convention on international civil aviation. Safety management, ICAO, Second edition, 2016, 44 p.
2. Bezopasnost` Rossii. Pravovye sotsial`no-ehkonomicheskie i nauchno-tekhnicheskie aspekty. Analiz riska i problem bezopasnosti. In 4 parts. Part 1. Osnovy analiza i regulirovaniya bezopasnosti, Nauch. rukov. K. V. Frolov, Moscow, MGF “Znanie” Publ., 2006, 640 p. (In Russ.)
3. GOST R 58771-2019. Risk management. Risk assessment technologies, Moscow, Standartinform Publ., 2020, 90 p. (In Russ.)
4. Guzij A. G., Kapustin A. G., Lushkin A. M., Fokin A. V. Methodology of quantitative risk assessment for flight safety in the aircraft segment of commercial aviation, *Civil Aviation High Technologies*, 2019, vol. 22, no. 4, pp. 33–42. (In Russ.)
5. Causal Model for Air Transport Safety. NLR, Amsterdam, 2009, 136 p., available at: <https://www.nlr.org/wp-content/uploads/2019/10/CATS-final-report.pdf> (accessed 10.12.2022).
6. Butov A. A., Volkov M. A., Makarov V. P., Orlov A. I., Sharov V. D. Automated system of aviation accidents forecasting and prevention at the organization and performance of flights, *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2012, vol. 14, no. 4 (2), pp. 380–385. (In Russ.)
7. Sharov V. D., Eliseev B. P., Vorob'yev V. V. Analysis of shortcomings in the description of safety risk management procedures in ICAO documents, *Civil Aviation High Technologies*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 49–61. (In Russ.)
8. ICAO Doc 9859. Safety management manual (SMM). Fourth edition, ICAO, 2018, 182 p.
9. Guzij A. G., Lushkin A. M., Majorova Yu. A. *Teoriya i praktika ehkspertnogo analiza v sistemakh upravleniya bezopasnost'yu polyotov: monografiya [Theory and practice of expert analysis in flight safety management systems. Monograph]*, Moscow, Zhukovsky Academy Publ., 2015, 127 p. (In Russ.)

10. Safety Minima Study: Review of Existing Standards and Practices. Eurocontrol, 2000, 44 p., available at: <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/4700.pdf> (accessed 26.06.2023).
11. CAP-784 State Safety Programme for the UK. 2009, 60 p., available at: <https://www.afeonline.com/shop/caa-cap-784.html> (accessed 10.12.2022).
12. Ruhlinskij V. M., Khaustov A. A. Determination of an acceptable level of flight safety of an aviation service provider, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 39, pp. 101–113. (In Russ.)
13. A Statistical Analysis of Commercial Aviation Accidents 1958 – 2021. Airbus, 2022, 36 p., available at: <https://accidentstats.airbus.com/sites/default/files/2022-02/Statistical-Analysis-of-Commercial-Aviation-Accidents-1958-2021.pdf> (accessed 10.12.2022).
14. Budzko V. I., Demin S. S., Dutov A. V., Kan A. V., Mikhajlin I. S., Shapkin V. S. Safety management system – the main element of a promising air transport system, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2020, no. 32, pp. 121–131. (In Russ.)
15. 2021 Safety Report, IATA, Ed. 58. Issued April 2022, 269 p., available at: https://www.iata.org/contentassets/bd3288d6f2394d9ca3b8fa23548cb8bf/iata_safety_report_2021.pdf (accessed 10.12.2022).
16. Sharov V. D., Kayumov V. P., Tolstykh S. A. Evaluation of the effectiveness of the safety management system of the service provider, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2020, no. 30, pp. 117–128. (In Russ.)
17. Federal Aviation Administration FY2022 Portfolio of Goals, FAA, 2022, 127 p., available at: https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022-04/fy22_portfolio_goals.pdf (accessed 10.12.2022).
18. ICAO Doc 9859. Safety management manual (SMM). Third edition, ICAO, 2013, 254 p.
19. Sharov V. D., Vorobyov V. V., Zatuchny D. A. *Risk Management Methods in the Aviation Enterprise*. Springer Link, 2021, 146 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-33-6017-4>

Информация об авторах

Шаров Валерий Дмитриевич, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия, v.sharov@mstuca.aero

Образцов Роман Александрович, начальник отдела, Центральное межрегиональное территориальное управление воздушного транспорта ФАВТ Министерства транспорта России, Москва, Россия, obrazcov1311@mail.ru

Поляков Павел Михайлович, старший преподаватель кафедры безопасности полётов и жизнедеятельности, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия, p.polyakov@mstuca.aero

Authors information

Sharov Valeriy D., Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department, Moscow Technical State University of Civil Aviation, Moscow, Russia, v.sharov@mstuca.aero

Obraztsov Roman A., Head of the Department of the Central Interregional Territorial Air Transport Department of the Federal Air Transport Agency of the Ministry of Transport of the Russian Federation, obrazcov1311@mail.ru

Polyakov Pavel M., Senior Lecturer of the Department, Moscow State Technical University of Civil Aviation, p.polyakov@mstuca.aero

Статья поступила в редакцию 17.01.2023; одобрена после рецензирования 19.06.2023; принята к публикации 27.06.2023.

The article was submitted 17.01.2023; approved after reviewing 19.06.2023; accepted for publication 27.06.2023.

Обзорная статья
УДК 656.7.072

НОРМАТИВНО-ПРАВОВОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОРГАНИЗАЦИИ ПАССАЖИРСКИХ ПЕРЕВОЗОК ВОЗДУШНЫМ ТРАНСПОРТОМ

(публикуется в рамках реализации молодёжной политики Научного вестника ГосНИИ ГА)

П. И. БЕНЬЯМИНОВА, О. Г. ФЕОКТИСТОВА

Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. При организации перевозки пассажиров на воздушном транспорте воздействие различных источников техноферных опасностей является практически неизбежным побочным фактором, возникающим в процессе работы на авиационных предприятиях (АП). В качестве таких источников рассматриваются различные физические факторы, из которых следует выделить шум, он сильнее всего воздействует на различные функциональные системы организма человека. Шум как негативный фактор оказывает сильное влияние на работоспособность персонала, может стать причиной производственного травматизма. Сегодня считается, что борьба с шумом в авиации занимает второе место по значимости вслед за обеспечением безопасности полётов. Данная проблема многогранна и имеет несколько направлений решения. В статье анализируются некоторые противоречия содержательной части новых документов нормативно-правового регулирования акустической безопасности. Показаны проблемы в сфере оценки неблагоприятного воздействия шума на сотрудников аэровокзального комплекса. Отмечено отсутствие согласованности между санитарными правилами и национальными стандартами для проведения такой оценки. Руководящим документом по регулированию гигиенического нормирования уровня шума на рабочих местах персонала является недавно принятый СанПиН 1.2.3685-21, в котором отсутствует определение такого понятия, как предельно допустимый уровень (ПДУ) шума для производства и даже его упоминание при указании числовых значений нормативов, в отличие от предыдущих версий, что создаёт сложности при понимании сути документа.

Ключевые слова: воздушный транспорт, авиационные предприятия, авиационный шум, производственный шум, гигиеническое нормирование, аэропорт, акустическая безопасность, нормативно-правовое регулирование, транспортные системы страны

Для цитирования: Беньямина П. И., Феоктистова О. Г. Нормативно-правовое регулирование акустической безопасности при организации пассажирских перевозок воздушным транспортом // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 43. С. 156–164.

REGULATORY CONTROL OF ACOUSTIC SAFETY IN THE ORGANIZATION OF PASSENGER TRANSPORTATION BY AIR

(Published as part of the implementation of the youth policy of the Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation)

P. I. BENYAMINOVA, O. G. FEOKTISTOVA

Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

Abstract. During organization the process of transportation the passengers by air transport, exposure to various sources of technospheric hazards is an almost unavoidable by-product of air entity. As such, various physical factors are considered, from which noise should be distinguished, it has the greatest impact on various functional systems of the body of personnel. Noise as a negative factor has a strong impact on the performance of staff, can cause work injuries. Today, it is believed that air noise control is the second most important after ensuring the safety of flights. This problem is multifaceted and has several solutions. This paper analyzes some contradictions in the content of the new documents of regulatory and legal regulation of acoustic safety. The article analyses problems in the area of assessment of adverse effects of noise on employees of the air terminal complex. The authors note that there is a lack of consistency between health regulations and state standards for such an assessment. The main document on the hygienic regulation of noise in the workplace of personnel is the recently adopted SanPiN 1.2.3685-21. This document does not contain a definition of the maximum allowable level for production and even mentioning it when indicating numerical values of regulations, unlike previous versions, which creates difficulties in understanding the essence of the document.

Keywords: air transport, aviation enterprises, aviation noise, industrial noise, hygienic normalization, airport, acoustic safety, regulatory regulation, transportation systems of the country

For citation: Benyaminova P. I., Feoktistova O. G. Regulatory control of acoustic safety in the organization of passenger transportation by air, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2023, no. 43, pp. 156–164. (In Russ.)

Введение

Анализ структуры профессиональной патологии в зависимости от воздействующего вредного производственного фактора показывает, что на ведущем месте располагаются заболевания, полученные в результате профессиональной деятельности и возможные последствия в среднесрочной и долгосрочной перспективе, связанные с воздействием производственных физических факторов. В последние годы доля данных факторов приблизилась к 40 % от общего числа диагностированных профессиональных заболеваний в отечественной практике в 2021 году. Это довольно большой процент, он имеет тенденцию повышения.

Первое место занимает шум. По статистическим данным под воздействие шума с уровнем, превышающим предельно допустимый, в России при производственной деятельности попадает значительная часть работников. Удельный вес промышленных предприятий, не отвечающих санитарно-эпидемиологическим требованиям по уровню шума, составляет 26 % [1].

Негативное влияние шума на работников гражданской авиации является значительным, происходит снижение производительности труда, достигающее 20 % в зависимости от интенсивности шума, его характера и от вида выполняемой работы [2].

Если анализировать влияние производственного шума на персонал АП, то можно отметить влияние на различные функциональные системы организма. Как следствие, происходит снижение внимания, работоспособности, ухудшение реакции. Шумовое воздействие в процессе трудовой деятельности негативно воздействует также на такие функции, как память, восприятие, мышление. Проведённые исследования отечественных и зарубежных учёных обращают внимание на тот факт, что шум отвлекает внимание работников, участвующих в выполнении точечных операций [3].

Защита персонала от шумового воздействия на АП является важной задачей, данными вопросами занимаются различные организации, такие, как Всемирная организация здравоохранения, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Московский государственный технический университет гражданской авиации и ряд других.

Основу успешной деятельности АП составляет обеспечение комфортных условий труда персонала. Для этого имеется целый ряд нормативно-правовых актов в области регулирования

шумового воздействия на персонал и население в целом. При анализе содержательной части новых документов выявлены отдельные противоречия, которые будут показаны далее.

При оценке шумового воздействия на персонал выявляются различные соответствия и несоответствия при сравнении с допускаемыми уровнями звукового давления.

Для проведения оценки шумового воздействия необходимо знать нормативные значения шума, ниже уровня которых отсутствует негативное влияние на работоспособность и здоровье персонала АП.

Сравнительный анализ санитарных правил и норм с национальными стандартами в рамках обеспечения акустической безопасности персонала АП

Основным руководящим документом по гигиеническому нормированию предельного значения уровня шума на рабочих местах персонала является СанПиН 1.2.3685-21 [4].

Согласно новой редакции «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» отменены требования таких санитарных правил, касающихся шумового воздействия, как:

- СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки» от 31 октября 1996 г. № 36 [5];
- СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» от 21 июня 2016 г. № 81 [6];
- СП 2.1.8.3565-19 «Отдельные санитарно-эпидемиологические требования при оценке шума от пролётов воздушных судов» от 22 октября 2019 г. № 15.

В СанПиН 1.2.3685-21 (п. 34) содержатся положения, устанавливающие следующие показатели для оценки влияния шума: эквивалентный уровень звука (L_{pAeqT} , дБА), уровень, действующий на работающего за рабочую смену (измеренный или рассчитанный относительно 8 ч рабочей смены); максимальные уровни звука А, измеренные с временными коррекциями Slow и I ($L_{pA max}$); пиковый уровень звука ($L_{pC peak}$, дБС), скорректированный по С (взвешенному наибольшему значению за время измерений).

Далее в пункте 35 СанПиН 1.2.3685-21 установлены конкретные числовые значения, показанные в табл. 1.

Таблица 1

Нормативные значения шума

Показатель	Нормативное значение
L_{pAeqT} , дБА	80 дБА
$L_{pA max}$, дБА • с коррекцией S • с коррекцией I	110 дБА 125 дБА
$L_{pC peak}$, дБС	137 дБС

В СанПиН 1.2.3685-21 отсутствует определение такого понятия, как предельно допустимый уровень шума для производства, хотя в предыдущей версии СанПиН 2.2.4.3359-16 данное определение было отражено и определяло предельно допустимые уровни факторов, которые при воздействии на сотрудников предприятия в течение трудового дня (8 ч и не более 40 ч в неделю) и далее на протяжении всего рабочего стажа не вызывают заболеваний и (или) отклонений в состоянии здоровья. Кроме того, в СанПиН 2.2.4.3359-16 содержалось прямое требование

проводить оценку фактических уровней физических факторов на производстве с учётом неопределённости измерений, чего нет в СанПиН 1.2.3685-21.

Предельно допустимые уровни звукового давления, уровни звука и эквивалентные уровни звука для основных наиболее типичных видов трудовой деятельности и рабочих мест, которые содержались в СН 2.2.4/2.1.8.562-96, отсутствуют в новом документе СанПиН 1.2.3685-21.

Также в СанПиН 2.2.4.3359-16, в приложении 6, содержались предельно допустимые эквивалентные уровни звука на рабочих местах с учётом напряжённости и тяжести трудового процесса, которые отсутствуют в новой редакции. Данные приведены в табл. 2.

Таблица 2

Предельно допустимые уровни звука и эквивалентные уровни звука, дБА, на рабочих местах для трудовой деятельности разных категорий тяжести и напряжённости

Категории напряжённости трудового процесса	Категории тяжести трудового процесса		
	Лёгкая и средняя физическая нагрузка	Тяжёлый труд 1 степени	Тяжёлый труд 2 степени
Напряжённость лёгкой и средней степени	80	75	75
Напряжённый труд 1 степени	70	65	65
Напряжённый труд 2 степени	60	-	-
Напряжённый труд 3 степени	50	-	-

Количественная оценка тяжести и напряжённости трудового процесса каждой из указанных в таблице категорий описана в «Руководстве, по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса» Р 2.2.2006-05 [7].

Гигиеническое нормирование предполагает тесную взаимосвязь между санитарными правилами и национальными стандартами.

Некоторые значимые различия и несоответствия с санитарными нормами содержатся в ГОСТ 12.1.003-2014 [8] «Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности», принятом в качестве национального межгосударственного стандарта, который не является простой заменой предыдущей версии ГОСТ 12.1.003-83 [9].

Рассмотрим некоторые противоречия:

1. ГОСТ 12.1.003-2014 содержит общие принципы сохранения здоровья работников и «требования к оценке воздействия шума» (р. 1). При этом в ГОСТ 12.1.003-83 содержались прямые указания по обеспечению безопасности, а именно, допустимые уровни шума.

2. Положения о принципах нормирования и нормируемых показателях шума (п.п. 4.2 и 4.3 ГОСТ 12.1.003-2014) в соответствии с действующим законодательством должны включать ссылки на требования СанПиН. Эти условия не соблюдены в ГОСТ 12.1.003-2014.

3. В ГОСТ 12.1.003-2014 в разделе «Оценка шумового воздействия на рабочем месте» (р. 5) предложенная в п. 5.2 процедура оценки кумулятивного воздействия шума с учётом неопределённости измерений весьма неоднозначна и не соответствует общепринятой практике гигиенической оценки.

4. В ГОСТ 12.1.003-2014 в качестве основного нормируемого показателя рассматривается эквивалентный уровень звука за 8 ч рабочий день, но при этом не учитываются поправки на импульсный/тональный характер шума, как указано в СанПиН 1.2.3685-21.

Нормируемые параметры шума в пассажирских залах аэропортов и вокзалов содержатся в СанПиН 1.2.3685-21, п. 100, и представлены в табл. 3.

Таблица 3

Нормируемые параметры шума в октавных полосах частот, эквивалентных и максимальных уровней звука проникающего шума в пассажирских залах аэропортов и вокзалов

Для источников постоянного шума									Для источников непостоянного шума		
Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровень звука L(A), дБА	Эквивалентный уровень звука LAэкв, дБА	Максимальный уровень звука LAmax, дБА
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000			
93	79	70	63	59	55	53	51	49	60	60	75

Указанные в табл. 3 значения также касаются работников службы организации перевозок (СОП), так как их функционал включает комплекс мероприятий по приёму к перевозке пассажиров, а именно регистрацию пассажиров, оформление перевозочной документации, информационное обеспечение авиаперевозок пассажиров, багажа и др. Эти действия в основном происходят во взаимодействии с пассажирами, то есть в тех же залах (см. табл. 3), а отдельные требования именно для СОП в рамках гигиенического регулирования отсутствуют. Данное структурное подразделение играет весьма важную роль в перевозочном процессе, а в санитарных правилах СП 2.5.3650-20 содержатся требования по предельным значениям звукового давления только для членов экипажа и диспетчеров управления воздушным движением.

Далее в табл. 4 представлены предельно допустимые уровни звука в соответствии с динамикой отечественного нормирования в области шумового воздействия [10].

Таблица 4

Динамика нормирования производственного шума

Документ	ПДУ в дБА
СН 785-69: Санитарные нормы и правила по ограничению уровня шума на территориях и в помещениях промышленных предприятий	85
ГОСТ 12.1.003-76: ССБТ. Шум. Общие требования безопасности	85
СН 3223-85: Санитарные нормы допустимых уровней шума на рабочих местах	80
СН 2.2.4/2.1.8.562-96: Санитарные нормы. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки	80
ГОСТ 12.1.003-83: ССБТ. Шум. Общие требования безопасности	80
СанПиН 1.2.3685-21: Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания (действует)	80
ГОСТ 12.1.003-2014: ССБТ. Шум. Общие требования безопасности. (действует)	80

Примечание. ГОСТ 12.1.003-2014 является стандартом, заменившим ГОСТ 12.1.003-83, но в отличие от своего предшественника не имеет конкретных значений по ПДУ, для него взято значение из старой версии документа.

Из приведённых выше данных можно отследить динамику изменения уровней звукового давления, которая показывает, что уровень 80 дБА действует с 80-х гг. XX века, несмотря на введение новых гигиенических нормативов.

Согласно СанПиН 1.2.3685-21 допустимые уровни шумового воздействия для населения не должны превышать значений, приведённых в табл. 5. Следует отметить, что СН 2.2.4/2.1.8.561-96 содержали такие же нормативы.

При рассмотрении вопроса нормирования производственного шума на АП в отношении СОП необходимо учесть, что в соответствии с ГОСТ 22283-2014 [11] на вновь проектируемых территориях жилой застройки вблизи существующих аэропортов и на существующих территориях жилой застройки вблизи вновь проектируемых аэропортов уровни авиационного шума не должны превышать определённых значений.

Для сравнения в табл. 5 представлены нормативные значения ГОСТ 22283-88, ГОСТ 22283-2014 и СанПиН 1.2.3685-21.

Таблица 5

Предельные значения авиационного шума

Время суток	Эквивалентный уровень звука LAэкв, дБ(А)	Максимальный уровень звука при единичном воздействии LАмакс, дБ(А)
ГОСТ 22283-88		
День (с 7.00 до 23.00 ч)	65	85
Ночь (с 23.00 до 7.00 ч)	55	75
ГОСТ 22283-2014		
День (с 7.00 до 23.00 ч)	55	75
Ночь (с 23.00 до 7.00 ч)	45	65
СанПиН 1.2.3685-21		
День (с 7.00 до 23.00 ч)	65	85
Ночь (с 23.00 до 7.00 ч)	55	75

Из табл. 5 следует, что с введением ГОСТ 22283-2014 произошло ужесточение в требованиях к таким показателям как LAэкв, дБ(А) и LАмакс, дБ(А), что обусловлено изменением парка воздушных судов в авиакомпаниях, увеличением регулярности полётов и как следствие увеличением шумовой нагрузки на территории жилой застройки вблизи аэропортов.

Оценка условий труда сотрудников аэровокзального комплекса проводится на основании Р 2.2.2006-05.

Измерение нормируемых параметров при воздействии на сотрудников непостоянного шума производится интегрирующим шумомером или расчётным способом. Нормативные требования к применяемым шумомерам регламентируются ГОСТ Р 53188.1-2019 «Государственная система обеспечения единства измерений. Шумомеры. Часть 1. Технические требования».

Оценка условий труда при воздействии постоянного шума проводится с использованием результатов измерения уровня звука в дБА по шкале «А» шумомера на временной характеристике «медленно».

В соответствии с Р 2.2.2006–05 существует три класса условий труда: допустимый, вредный и опасный.

Допустимый класс предполагает отсутствие необходимости в улучшении условий труда по такому физическому фактору, как шум. При вредном и опасном классе необходимо принятие комплекса мер по снижению действующего на персонал шума, профилактике такого вредного воздействия в краткосрочной и долгосрочной перспективе.

При анализе динамики изменений руководств по установлению классов условий труда от уровней шума (табл. 6), выявлено, что представленные в Р 2.2.2006-05 значения были приняты в конце девяностых годов. Р 2.2.2006-05 содержит ссылки на санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.562-96, действие которых уже прекращено.

Таблица 6

Динамика превышения ПДУ от класса условий труда

Документ	Класс условий труда				
	Вредный				Опасный
	3.1	3.2	3.3	3.4	
	Превышение ПДУ до (включительно), дБА				
Гигиеническая классификация труда № 4137-86	<10	10–15	>15		
Р 2.2.013-94	<10	10–25	25–40	40–50	>50
Р 2.2.755-99	<5	5–15	15–25	25–35	>35
Р 2.2.2006-05	<5	5–15	15–25	25–35	>35

Из табл. 6 видно, что в период с 1986 по 1994 год были разработаны новые классы условий труда; далее после появления новых классов в 1999 году были уменьшены значения превышения ПДУ, для класса 3.1. – на 5 дБА, 3.2 – на 10 дБА, 3.3 и 4 – на 15 дБА. Эти изменения действуют и в настоящее время.

При рассмотрении конкретных примеров из Руководства Р 2.2.2006-05 и СанПиН 1.2.3685-21 видны противоречия. Так, СанПиН 1.2.3685-21 не отмечает такое понятие как ПДУ, и как следствие приходится только догадываться, являются ли значения в таблице 5.35 «Нормируемые параметры шума в октавных полосах частот, эквивалентных и максимальных уровней звука проникающего шума в помещениях жилых и общественных зданий и шума на селитебной территории» предельными.

К примеру, по СН 2.2.4/2.1.8.562-96, где ещё отражались ПДУ по видам деятельности, ПДУ при выполнении всех видов работ на производственных помещениях составляло 80 дБА, а для высококвалифицированной работы, требующей сосредоточенности – 60 дБА. Если сопоставить данные значения с табл. 6, то видно, что введение стандартных поправок к различным видам деятельности приводит к большому нерегламентированному расхождению в величинах, характеризующих опасный класс условий труда. К опасному классу относятся уровни звука в диапазоне свыше 95 дБА и звуки уровня свыше 115 дБА. Указанные значения не должны иметь расхождения в таком диапазоне и должны соответствовать данным исследований в этой области.

Заключение

При анализе изменений, которые происходили в гигиеническом нормировании на протяжении более двадцати лет, были отмечены некоторые несоответствия содержательной части новых документов нормативно-правового регулирования акустической безопасности. Так, СанПиН 1.2.3685-21 отменил целый ряд санитарных правил, при этом некоторые изменения, а именно отсутствие упоминания понятия ПДУ и, как следствие, отсутствие нормирования предельно допустимых уровней звукового давления, уровней звука и эквивалентных уровней звука для основных наиболее типичных видов трудовой деятельности и рабочих мест внесли неоднозначность в понимание нового документа. Неясно, являются ли нормативные значения в различных помещениях предельными. ГОСТ 12.1.003-2014 заменил ГОСТ 12.1.003-83, но в отличие от своего предшественника также не имеет конкретных значений по ПДУ.

Авторами показано отсутствие согласованности между санитарными правилами, национальными и межгосударственными стандартами при проведении оценки неблагоприятного воздействия шума на сотрудников аэровокзального комплекса; стандарты должны содержать ссылки на требования санитарных норм. Эти условия не соблюдены в ГОСТ 12.1.003-2014.

Допустимые уровни авиационного шума в СанПиН 1.2.3685-21 и предельные уровни авиационного шума по ГОСТ 22283-2014 различаются между собой на 10 дБА.

Авторами предлагается при разработке новых редакций нормативных документов для гармонизации действий между санитарными правилами, национальными и межгосударственными стандартами снова ввести понятия предельно допустимого уровня звукового давления, а также предельно допустимого уровня звука и эквивалентных уровней звука для основных наиболее типичных видов трудовой деятельности и рабочих мест. Также следует установить конкретные числовые значения предельно допустимых уровней звукового давления для СОП.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников

1. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2021 году: государственный доклад. Москва: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, 2022. 340 с.
2. Беньяминова П. И. Влияние шума на авиационный персонал и пассажиров // Наука. Техника. Человек: исторические, мировоззренческие и методологические проблемы: Межвузовский сборник научных работ. Вып. 11. Москва: МГТУ ГА, 2021. С. 192–195.
3. Prevention of noise-induced hearing loss. Report of a WHO-PDH Informal consultation, Geneva, 28–30 October 1997 (WHO/ PDH/98/5), Geneva, WHO, 1998.
4. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Введены 29.01.2021 [Электронный ресурс]. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102030022> (дата обращения: 12.04.2023).
5. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. 2.2.4. Физические факторы производственной среды. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки: Санитарные нормы: Постановление Госкомсанэпиднадзора России от 31 октября 1996 г. № 36 [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_103805/ (дата обращения: 12.04.2023).
6. СанПиН 2.2.4.3359-16. Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Введены 21.06.2016 [Электронный ресурс]. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_203183/ (дата обращения: 12.04.2023).
7. Р 2.2.2006-05. Руководство по гигиенической оценке факторов рабочей среды и трудового процесса. Критерии и классификация условий труда. Утв. Главным государственным санитарным врачом Российской Федерации 29.07.2005 [Электронный ресурс]. URL: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=92758> (дата обращения: 12.04.2023).
8. ГОСТ 12.1.003-2014. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности. Введён 01.11.2015 [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200118606/> (дата обращения: 12.04.2023).
9. ГОСТ 12.1.003-83. Система стандартов безопасности труда. Шум. Общие требования безопасности. Введён 01.07.1984 [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/5200291/> (дата обращения: 12.04.2023).
10. Готлиб Я. Г., Алимов Н. П., Азаров В. Н. Вопросы ограничения шума для оценки условий труда // Альтернативная энергетика и экология. 2013. № 13(135). С. 70–83.
11. ГОСТ 22283-2014. Шум авиационный. Допустимые уровни шума на территории жилой застройки и методы его измерения. Введён 01.01.2015 [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200112157/> (дата обращения: 12.04.2023).

References

1. O sostoyanii sanitarno-ehpidemiologicheskogo blagopoluchiya naseleniya v Rossijskoj Federatsii v 2021 godu, gosudarstvennyj doklad. Moscow, Federal'naya sluzhba po nadzoru v sfere zashchity prav potrebitel' i blagopoluchiya cheloveka, 2022, 340 p. (In Russ.)

2. Benyaminova P. I. Vliyanie shuma na aviatsionnyj personal i passazhirov. *Nauka. Tekhnika. Chelovek: istoricheskie, mirovozzrencheskie i metodologicheskie problem, Mezhvuzovskij sbornik nauchnykh работ*, вып. 11, Moscow, MSTU CA publ., 2021, pp. 192–195. (In Russ.)
3. Prevention of noise-induced hearing loss. Report of a WHO-PDH Informal consultation, Geneva, 28–30 October 1997 (WHO/ PDH/98/5), Geneva, WHO, 1998.
4. SanPiN 1.2.3685-21. Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti I (ili bezvrednosti dlya cheloveka faktorov srede obitaniya. Vvedeny 29.01.2021, available at: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202102030022> (accessed 12.04.2023). (In Russ.)
5. SN 2.2.4/2.1.8.562-96. 2.2.4. Fizicheskie faktory proizvodstvennoj srede. Shum na rabochikh mestakh, v pomeshcheniyakh zhilykh, obshchestvennykh zdaniy i na territorii zhiloy zastroyki. Sanitarnye normy: postanovlenie Goskomsanehpidnadzora Rossii ot 31 oktyabrya 1996 no. 36, available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_103805/ (accessed 12.04.2023). (In Russ.)
6. SanPiN 2.2.4.3359-16. Sanitarno-ehpidemiologicheskie trebovaniya k fizicheskim faktoram na rabochikh mestakh. Sanitarno-ehpidemiologicheskie pravila I normativy. Vvedeny 21.06.2016, available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_203183/ (accessed 12.04.2023).
7. Rukovodstvo 2.2.2006-05. Rukovodstvo po gigienicheskoj otsenke faktorov rabochej srede i trudovogo protsessa. Kriterii i klassifikatsiya uslovij truda. Utv. Glavnym gosudarstvennym sanitarnym vrachom Rossijskoj Federatsii 29.07.2005, available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=92758> (accessed: 12.04.2023). (In Russ.)
8. GOST 12.1.003-2014. Occupational safety standards system. Noise. General safety requirements, available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200118606> (accessed 12.04.2023). (In Russ.)
9. GOST 12.1.003-83. Occupational safety standards system. Noise. General safety requirements, available at: <https://docs.cntd.ru/document/5200291> (accessed 12.04.2023). (In Russ.)
10. Gotlib Ya. G., Alimov N. P., Azarov V. N. Voprosy ogranicheniya shuma dlya otsenki uslovij truda. *Alternativnaya energetika i ekologiya*, 2013, no. 13(135), pp. 70–83. (In Russ.)
11. GOST 22283-2014. Aircraft noise. Admissible noise levels in the region of dwelling-houses and methods of its measurement, available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200112157> (accessed 12.04.2023). (In Russ.)

Информация об авторах

Беньямина Полина Игоревна, аспирант, ассистент кафедры безопасности полетов и жизнедеятельности, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия, p.benyaminova@mstuca.aero

Феоктистова Оксана Геннадьевна, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры безопасности полетов и жизнедеятельности, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия, o.feoktistova@mstuca.aero

Authors information

Benyaminova Polina I., Post Graduate Student, Assistant of the Department, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia, p.benyaminova@mstuca.aero

Feoktistova Oksana G., Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia, o.feoktistova@mstuca.aero

Статья поступила в редакцию 28.04.2023; одобрена после рецензирования 20.06.2023; принята к публикации 28.06.2023.

The article was submitted 28.04.2023; approved after reviewing 20.06.2023; accepted for publication 28.06.2023.

Научная статья

УДК 629.7.058.43: 351.814.334.3

РАДИОВЕЩАТЕЛЬНОЕ АВТОМАТИЧЕСКОЕ ГИБРИДНОЕ НАБЛЮДЕНИЕ AHS-B

А. П. ПЛЯСОВСКИХ¹, И. Н. ШЕСТАКОВ²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации
имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия

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

Аннотация. В работе предлагается способ авиационного наблюдения, представляющий собой усовершенствованное радиовещательное автоматическое зависимое наблюдение (АЗН-В), в рамках этой работы называемый радиовещательным автоматическим гибридным наблюдением AHS-B. AHS-B представляет собой комплекс (совокупность) АЗН-В и независимого кооперативного наблюдения. AHS-B обеспечивает проверку точности и достоверности получаемой с борта воздушного судна (ВС) информации о местоположении, что позволяет использовать AHS-B в качестве основного и единственного источника информации наблюдения в интересах обслуживания воздушного движения (ОВД) и усовершенствованной системы управления наземным движением и контроля за ним (A-SMGCS) на аэродромах. Использование AHS-B как средства наблюдения повысит безопасность полётов в регионах ОВД, где отсутствует радиолокационное наблюдение, при этом потребуется в 2–7 раз меньше станций по сравнению с многопозиционной системой наблюдения.

Ключевые слова: интеллектуальные транспортные системы, автоматическое зависимое наблюдение, радиовещательное автоматическое гибридное наблюдение, многопозиционная система наблюдения, мультилатерация, независимое кооперативное наблюдение

Для цитирования: Плясовских А. П., Шестаков И. Н. Радиовещательное автоматическое гибридное наблюдение AHS-B // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 43. С. 165–175.

AUTOMATIC HYBRID SURVEILLANCE-BROADCAST AHS-B

A. P. PLYASOVSKIKH¹, I. N. SHESTAKOV²

¹ St. Petersburg State University of Civil Aviation named in honor of Air Chief Marshal A. A. Novikov,
St. Petersburg, Russia

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

Abstract. The paper proposes a method of aviation surveillance, which is an advanced radio broadcasting automatic dependent surveillance (ADS-B), within the framework of this work called radio broadcasting automatic hybrid surveillance AHS-B. AHS-B is a complex (combination) of ADS-B and independent cooperative surveillance. AHS-B provides independent validation of the accuracy of the location information received from the aircraft, which makes it possible to use AHS-B as the main and only source of surveillance information in the interests of air traffic services (ATS) and the advanced Ground Traffic Control and Control System (A-SMGCS) at airfields. The use of AHS-B as a surveillance tool will increase flight safety in ATS regions where there is no radar surveillance. The paper shows that it takes 2–7 times less to cover the same area with AHS-B ground stations than when using a multi-position observation system.

Keywords: intelligent transport systems, automatic dependent surveillance, automatic hybrid surveillance-broadcast, multi-position surveillance system, multi-position surveillance system, multilateration, independent cooperative surveillance

For citation: Plyasovskikh A. P., Shestakov I. N. Automatic hybrid surveillance-broadcast AHS-B, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2023, no. 43, pp. 165–175. (In Russ.)

Введение

Технология радиовещательного автоматического зависимого наблюдения (АЗН-В) должна значительно расширить возможности гражданской авиации за счёт повышения точности [1] и частоты обновления координатной информации [2, 3]. АЗН-В (англ. ADS-B) – это система наблюдения ОВД, которая [4, 5] может применяться либо в сочетании с другими системами наблюдения, либо самостоятельно, в том числе для обеспечения эшелонирования ВС. Однако такие системы наблюдения уязвимы [6, 7] и имеют слабые места, например, возможна имитация злоумышленниками сигналов от ВС, которые принимаются системой ОВД. Требуется методы защиты принимаемой координатной информации от ВС и оценки её достоверности от наведённых целенаправленных помех [8]. Сформированное глобальными спутниковыми радионавигационными системами (ГНСС) единое координатно-временное поле [9] позволяет организовывать другие, не радиолокационные способы наблюдения.

Недостатками АЗН-В, которые препятствуют самостоятельному использованию при ОВД являются [3]:

1) АЗН-В при получении данных о местоположении и скорости полагаются исключительно на ГНСС. Поэтому возможны отказы АЗН-В в случаях, когда уровень характеристик или геометрия спутниковой группировки недостаточны для поддержки того или иного вида применения.

2) Системы наблюдения АЗН-В подвержены искажению информации, что обуславливает необходимость подтверждения достоверности поступающей в наземные станции АЗН-В информации, например, с использованием радиолокаторов и систем мультilaterации (многопозиционной системы наблюдения – МПЧН).

3) При использовании АЗН-В необходима проверка точности передаваемых данных о местоположении.

В настоящей работе предлагается радиовещательное автоматическое гибридное наблюдение AHS-B (Automatic Hybrid Surveillance-Broadcast) – способ авиационного наблюдения, представляющий собой комплекс АЗН-В и независимого кооперативного наблюдения с использованием информации о высокоточном времени передачи сообщений в эфир и барометрической высоте, а также метода TDOA (разницы во времени прихода сигнала).

Радиовещательное автоматическое гибридное наблюдение AHS-B

AHS-B – это комплекс (совокупность) АЗН-В и независимого кооперативного наблюдения, при котором достоверность данных о местоположении, полученных с помощью АЗН-В, подтверждается с использованием данных независимого кооперативного наблюдения. При временном пропадании данных о местоположении независимого кооперативного наблюдения для ОВД используются местоположение сообщений АЗН-В (при условии, что до пропадания данных независимого наблюдения их достоверность была подтверждена). При пропадании данных о местоположении АЗН-В для ОВД используются данные независимого наблюдения.

AHS-B обеспечивает возможность подтверждения достоверности принимаемой наземными станциями информации наблюдения, а также проверку точности передаваемых данных

о местоположении, что позволяет использовать АНС-В при ОВД для обеспечения эшелонирования ВС самостоятельно.

Метод определения местоположения с использованием независимого кооперативного наблюдения

Для независимого кооперативного наблюдения необходимы следующие данные:

1. Текущие атмосферное давление и температура воздуха в точке расположения наземных станций (приёмников) АНС-В, которые получают от метеостанции;
2. Барометрическая высота полёта ВС, температура воздуха на высоте полёта ВС и точное время передачи сообщения в эфир, поступающие в сообщении;
3. Географические координаты и геометрическая высота наземных приёмников АНС-В относительно уровня моря.

Передаваемая информация о времени передачи сообщения может (желательно) включать дополнительную информацию о качестве данных (точности передаваемой информации о времени).

Независимое определение местоположения осуществляется следующим образом.

1. Определяют атмосферное давление на высоте полёта (по данным барометрического высотомера берут табличные значения стандартной атмосферы).
2. Определяют геометрическую высоту полёта относительно уровня моря (по барометрической формуле Лапласа, используя данные о давлении и температуре воздуха на высоте полёта и в точке установки наземных приёмников АНС-В, рассчитывают геометрическую высоту полёта относительно приёмника).
3. Рассчитывают расстояние (наклонную дальность) между приёмной антенной наземной станцией АНС-В и ВС с использованием информации о времени передачи сообщения АНС-В и времени его приёма в наземной станции.
4. Рассчитывают расстояние между наземной станцией АНС-В и ВС в горизонтальной плоскости с использованием наклонной дальности и геометрической высоты ВС.
5. С использованием других станций (одной или двух) аналогичным образом рассчитывают расстояние в горизонтальной плоскости между станциями и ВС.
6. По данным о горизонтальном расстоянии ВС до станций рассчитывают точки вероятного местоположения ВС (как пересечение двух или более окружностей). При наличии только двух окружностей их пересечение даёт две точки вероятного местоположения ВС. Истинная точка определяется по плану движения ВС, предыстории движения, или по данным АЗН-В.

Методика подтверждения достоверности получаемых в сообщении АЗН-В данных о местоположении

Если ВС наблюдается только одной наземной станцией:

1. С использованием информации о горизонтальном расстоянии между наземной станцией и ВС и о его высоте, а также с использованием параметров требуемой точности информации наблюдения [10] рассчитывают кольцевой строб вероятного местоположения ВС.
2. Проверяют попадание местоположения ВС (содержащегося в сообщении АНС-В) в кольцевой строб вероятного местоположения объекта наблюдения. Если местоположение ВС в сообщении попадает в кольцевой строб, данные о местоположении считают достоверными. В противном случае – недостоверными.

Если ВС наблюдается несколькими наземными станциями:

1. Проверяют попадание местоположения ВС в сообщении в кольцевые стробы каждой наземной станции. Если местоположение ВС в сообщении попадает во все кольцевые стробы, данные о местоположении считают достоверными. В противном случае – недостоверными.

2. С использованием метода TDOA попарно, для каждой пары станций, рассчитывают гиперболы вероятного местоположения ВС, лежащие в горизонтальной плоскости, расположенной на высоте полёта ВС, после чего рассчитывают расстояние от точки полученного в сообщении местоположения ВС до гипербол вероятного местоположения. Если рассчитанное расстояние меньше установленной предельной величины, которая определяется заранее, данные о местоположении в сообщении считают достоверными. В противном случае – недостоверными.

Общая схема работы АНС-В изображена на рис. 1.

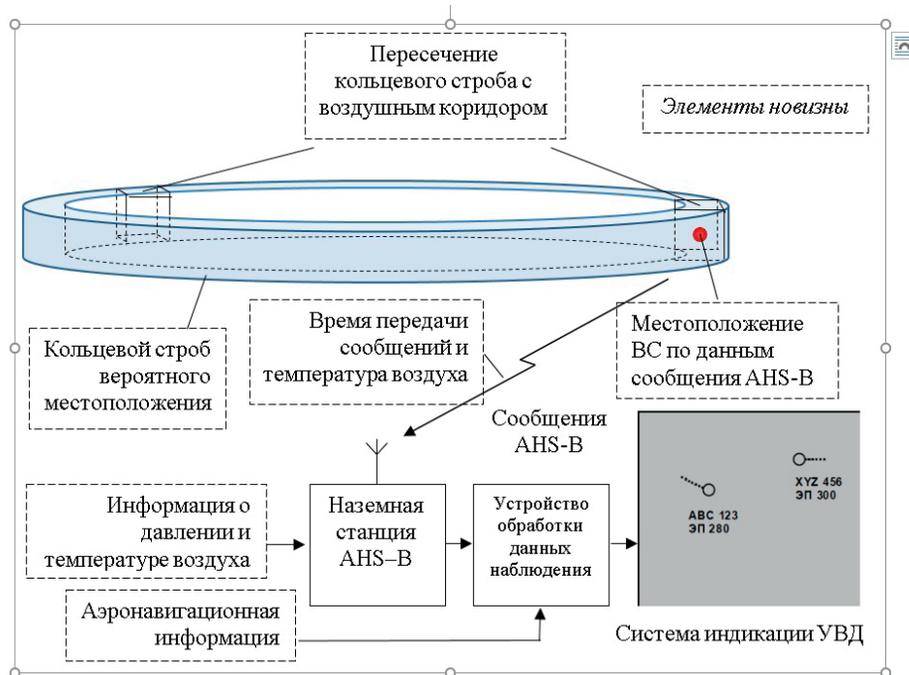


Рис. 1. Радиовещательное автоматическое гибридное наблюдение АНС-В

Далее приводится иллюстрация подтверждения достоверности получаемых в сообщении АЗН-В данных о местоположении с использованием метода TDOA в случае наблюдения ВС двумя наземными станциями.

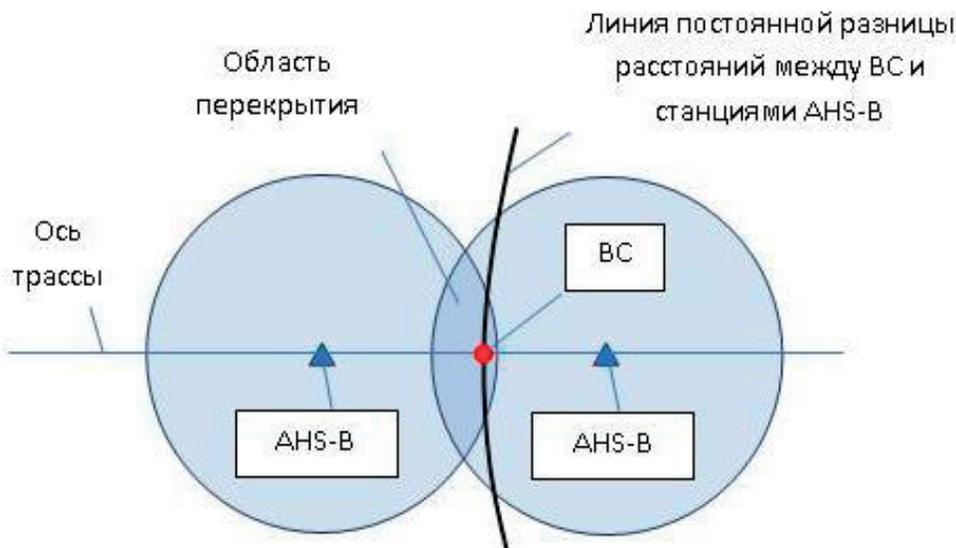


Рис. 2. Дополнительная проверка достоверности данных АНС-В с использованием гиперболы вероятного местоположения ВС на горизонтальной плоскости

Пусть ВС выполняет полёт по трассе, в пунктах обязательного донесения которой находятся наземные станции АНС-В так, что между ними имеется зона перекрытия, как это изображено на рис. 2. В зоне перекрытия с использованием метода разницы во времени прихода сигнала (TDOA) на горизонтальной плоскости, расположенной на высоте полёта ВС, определяется гипербола, представляющая постоянную разницу расстояний между ВС и двумя станциями АНС-В. Очевидно, что если расстояние между этой гиперболой и местоположением ВС на плоскости не превышает установленной допустимой ошибки определения, то местоположение ВС подтверждается по критерию TDOA. Очевидно также, что метод TDOA позволяет отфильтровать ложные цели.

Определение местоположения ВС с использованием данных о высоте с помощью метода TDOA в случае наблюдения тремя и более станциями

В отличие от МПЧН, в которой определение местоположения ВС осуществляется с использованием как минимум четырёх станций, предлагаемый здесь метод (определения местоположения ВС с использованием данных о высоте и метода TDOA) позволяет обеспечить определение местоположения ВС аналогичным образом с помощью трёх станций.

В отличие от МПЧН, в которой расчёты выполняются в трёхмерном пространстве и местоположение ВС определяется как пересечение трёхмерных гиперboloидов (в $E3$ – трёхмерном евклидовом пространстве), описываемый метод предполагает выполнение расчётов в двухмерном пространстве ($E2$), то есть на горизонтальной плоскости на высоте полёта ВС или на высоте расположения наземных станций. На этой плоскости для каждой пары станций рассчитывают гиперболы вероятного местоположения ВС, пересечение которых даёт точку расчётного местоположения, независимо от данных, поступающих с ВС.

Расчёт местоположения ВС данным способом осуществляют следующим образом.

Как и в «Методе определения местоположения с использованием независимого кооперативного наблюдения» выполняются пункты 1 и 2, а далее (продолжим нумерацию):

3. С использованием метода TDOA на горизонтальной плоскости рассчитывают гиперболы, представляющие собой линии постоянной разницы расстояний между проекцией местоположения ВС на горизонтальную плоскость и парами станций АНС-В, расположенными на плоскости (рис. 3).

4. Рассчитывают координаты точки пересечения двух (трёх) гипербол, которые представляют собой координаты ВС в горизонтальной плоскости.

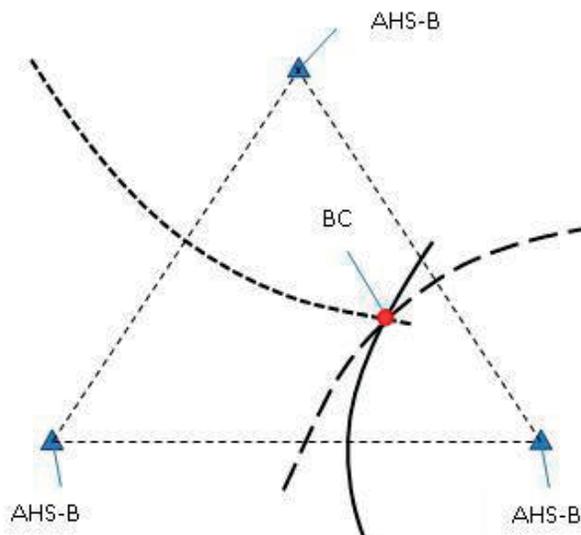


Рис. 3. Пересечение трёх гипербол на плоскости определяет местоположение ВС

Дополнительная проверка достоверности информации наблюдения с использованием аэронавигационной информации.

При полётах к и от наземной станции АНС-В с использованием аэронавигационной информации, а именно информации об установленных коридорах движения ВС, может осуществляться проверка попадания полученного в сообщении местоположения в пределы воздушного коридора. Условием подтверждения достоверности информации о местоположении ВС является при этом попадание полученного в сообщении местоположения в элемент кольцевого строга вероятного местоположения ВС, который является пересечением самого кольцевого строга с воздушным коридором (рис. 1).

Покрывание наблюдением большой площади.

На рис. 4 представлена схема возможного расположения наземных станций для четырёхкратного покрытия всех точек воздушного пространства на некоторой высоте h при абсолютно ровной подстилающей поверхности (то есть в идеальных условиях). На рис. 4 круги отображают зоны действия отдельных наземных станций. Радиус круга R является функцией от высоты полёта: $R = f(h)$. Эта схема расположения наземных станций представляет собой схему МПСН, в которой ВС в любой точке воздушного пространства должно наблюдаться не менее чем четырьмя станциями.

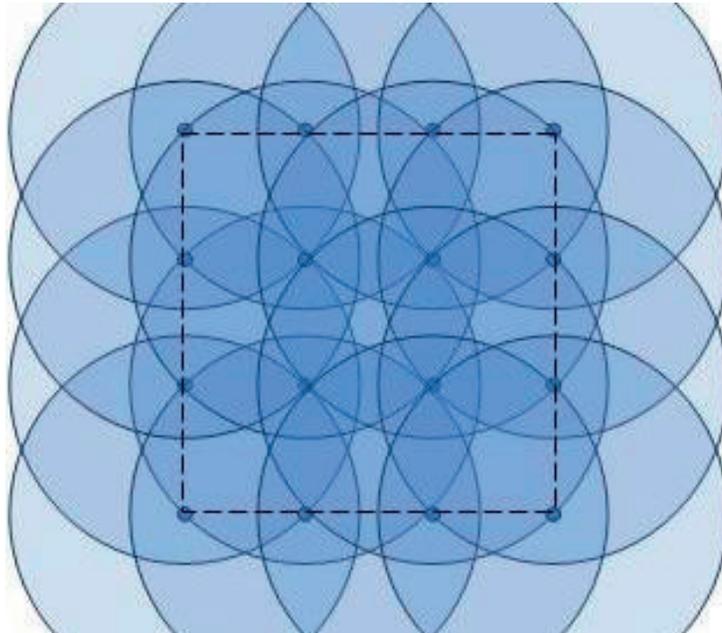


Рис. 4. Расположение станций для четырёхкратного покрытия наблюдением большой площади. Минимальная ячейка, обеспечивающая четырёхкратное перекрытие – 4 станции

На рис. 5 представлена схема возможного расположения наземных станций для трёхкратного покрытия всех точек воздушного пространства. Эта схема характерна для АНС-В в условиях неработоспособности ГНСС и АЗН-В, например, при постановке помех средствами радиоэлектронной борьбы. Предварительные расчёты показывают, что для трёхкратного покрытия большой площади требуется примерно в 2 раза меньше станций по сравнению с МПСН (см. рис. 4).

На рис. 6 представлена схема возможного расположения наземных станций для однократного покрытия всех точек воздушного пространства. Наземные станции расположены в шахматном порядке. При этом области четырёхкратного перекрытия образуют квадраты, на вершинах которых расположены наземные станции. Данная схема обеспечивает работоспособность АНС-В условиях стабильной работы ГНСС и, соответственно, при наличии в сообщениях АНС-В информации о местоположении ВС, а также информации о времени передачи сообщений.

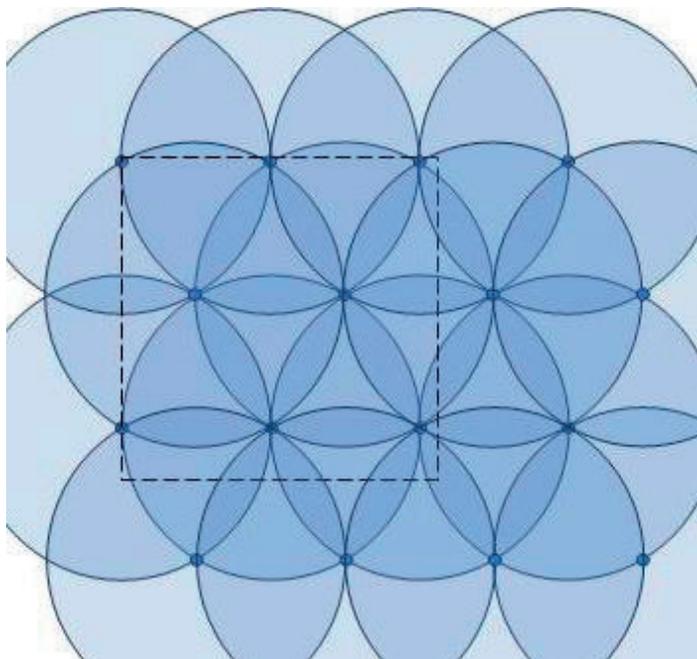


Рис. 5. Расположение станций для трёхкратного покрытия наблюдением большой площади. Минимальная ячейка, обеспечивающая трёхкратное перекрытие – 3 станции

Для корректной работы AHS-B при такой схеме расположения станций требуется примерно в 4 раза меньше станций по сравнению с МПСН. При этом примерно 57 % площади будет обеспечено двукратным перекрытием и проверкой достоверности информации наблюдения с использованием независимого кооперативного наблюдения (методом TDOA).

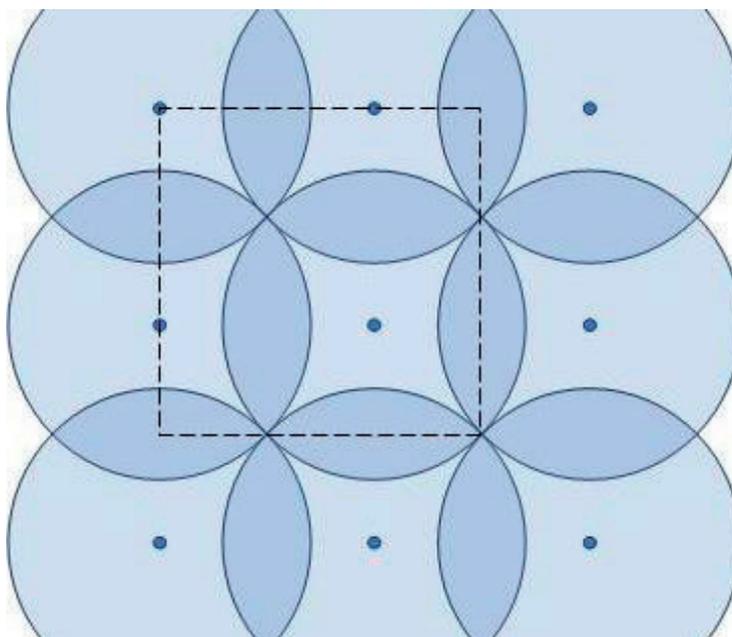


Рис. 6. Расположение станций в шахматном порядке для однократного покрытия наблюдением большой площади. Минимальная ячейка, обеспечивающая перекрытие – 1 станция

На рис. 7 представлена схема однократного перекрытия наблюдением большой площади. Наземные станции расположены внутри шестиугольных сот. Для работы AHS-B при такой схеме требуется примерно в 7 раз меньше станций по сравнению с МПСН.

На рис. 4–7 для сравнения изображены квадраты одинаковой площади.

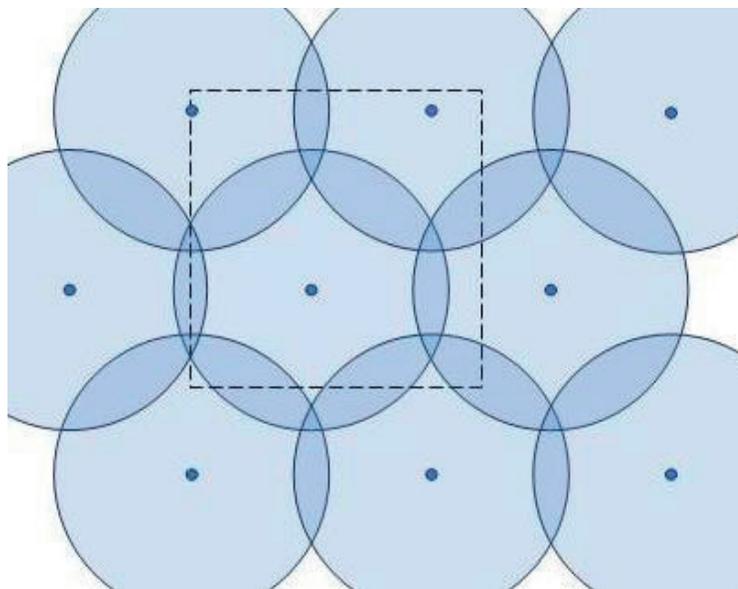


Рис. 7. Сотовое расположение станций для однократного покрытия наблюдением большой площади. Минимальная ячейка, обеспечивающая перекрытие – 1 станция

Преимущества радиовещательного автоматического гибридного наблюдения

1) Преимущества АНС-В по сравнению с АЗН-В.

Преимущества по сравнению с АЗН-В заключаются в независимом подтверждении достоверности данных, передаваемых в сообщении АЗН-В, а именно геометрической высоты и координат ВС (широты и долготы), передаваемых в сообщении. Достоверность информации определяется фактом попадания в кольцевой строб вероятного местоположения ВС.

В зонах перекрытия двух и более наземных станций осуществляется ещё одна дополнительная проверка достоверности информации АНС-В методом TDOA, при которой проверяют отклонение полученного в сообщении местоположения от гипербол вероятного местоположения ВС в горизонтальной плоскости.

При этом обеспечивается возможность независимой оценки точности полученной информации о местоположении в сообщениях АНС-В.

Предполагается, что АНС-В обеспечивает возможность ОВД с нормами эшелонирования 5 морских миль или 10 км при использовании только одной наземной станции АНС-В в качестве единственного источника информации наблюдения. Данное предположение требует проведения дополнительных исследований.

Заметим, что в настоящее время использование АЗН-В в качестве единственного источника информации наблюдения запрещено по причине необходимости подтверждения достоверности информации АЗН-В (информация АЗН-В может быть ложной, искажённой, или же содержать недопустимо большие ошибки, исключающие возможность её использования).

В настоящее время использование АЗН-В возможно только лишь совместно с такими средствами авиационного наблюдения как радиолокатор и (или) МПСН, с помощью которых обеспечивается подтверждение достоверности информации АЗН-В.

Использование АНС-В позволит в несколько раз снизить стоимость организации наблюдения (включая наблюдение беспилотных авиационных систем) в тех регионах и участках воздушного пространства, где наблюдение отсутствует или не удовлетворяет требованиям точности, целостности и доступности.

В текущих условиях снижения доходов провайдеров аэронавигационных услуг, к которым относится ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», снижение стоимости средств авиационного наблюдения является актуальным вопросом.

2) *Преимущества АНС-В по сравнению с МПСН.*

В условиях наличия точной (неискажённой) информации о местоположении ВС, поступающей в сообщении АНС-В, для полного покрытия непрерывным полем наблюдения большой площади при использовании АНС-В в шахматном порядке (ближайшие друг к другу станции расположены на вершинах квадрата) требуется примерно в 4 раза меньше станций по сравнению с МПСН. При этом около $(\pi/2 - 1) \cdot 100 \%$, то есть 57 % площади будет обеспечено двойным перекрытием (см. рис. 4 и рис. 6).

При сотовом расположении станций (ближайшие друг к другу станции расположены на вершинах треугольника, см. рис. 7) для полного покрытия наблюдением большой площади требуется примерно в 7 раз меньше станций по сравнению с МПСН.

Для обеспечения надёжного наблюдения, независимого от содержащейся в сообщении информации (например, при подавлении АНС-В средствами постановки помех), при использовании АНС-В требуется перекрытие наблюдением всех точек пространства как минимум тремя наземными станциями (в отличие от четырёх в МПСН). Для трёхкратного перекрытия той же площади при АНС-В требуется примерно 50 % станций по сравнению с МПСН, то есть в два раза меньше (см. рис. 4, рис. 5). При этом АНС-В обеспечивает характеристики наблюдения не хуже, чем МПСН.

Минимальная ячейка, обеспечивающая наблюдение, составляет в МПСН 4 наземных станции, тогда как АНС-В – 2 или даже 1 станцию.

Таким образом, предлагаемый способ радиовещательного автоматического гибридного наблюдения АНС-В требует меньше станций и затрат по сравнению с МПСН.

В таблице представлены основные характеристики и параметры АНС-В, МПСН и АНС-В.

Сравнительные характеристики и параметры АНС-В, МПСН и АНС-В

Параметр / характеристика	АНС-В	МПСН	АНС-В
Возможность самостоятельного использования	Не обеспечивается	Обеспечивается	Обеспечивается
Подтверждение достоверности информации наблюдения	Не обеспечивается	Обеспечивается	Обеспечивается
Минимальная ячейка наблюдения, станций	1	4	1 (2)*
Количество станций, требуемое для перекрытия наблюдением большой площади, в % от требуемого МПСН			
- трёхкратное перекрытие	-	100 %	50 % (в 2 раза меньше)
- однократное перекрытие	-	-	15 % (в 7 раз меньше)

* требуются дополнительные исследования.

Заключение

Предлагаемое в настоящей работе радиовещательное автоматическое гибридное наблюдение АНС-В является усовершенствованным радиовещательным автоматическим зависимым наблюдением АНС-В, в котором обеспечивается независимая наземная проверка достоверности информации о местоположении, передаваемой с ВС. В качестве ВС может выступать любое транспортное средство с аналогичным оборудованием.

АНС-В обеспечивает возможность низкозатратного авиационного наблюдения в зонах ОВД, где отсутствуют радиолокаторы или МПСН. АНС-В может использоваться в качестве единственного источника информации для усовершенствованной системы управления наземным движением и контроля за ним (А-SMGCS) на аэродромах со средней сложностью движения, имеющих до двух одновременно эксплуатируемых взлётно-посадочных полос [11, 12], что обеспечивает низкозатратное решение задач наблюдения за наземным движением.

При относительно низких затратах по сравнению с другими техническими решениями наблюдения в зонах и регионах ОВД, АНС-В позволяет обеспечить безопасность полётов там, где отсутствуют средства наблюдения.

АНС-В, с одной стороны, объединяет в себе преимущества ADS-B и мультilaterации (МПСН), с другой, АНС-В менее затратно по сравнению с МПСН. Для обеспечения перекрытия наблюдением воздушного пространства большой площади с использованием АНС-В в идеальных условиях наземных станций требуется в 2–7 раз меньше, чем с использованием МПСН.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников

1. Крыжановский Г. А., Шестаков И. Н. Расширение поля СРНС с помощью наземных станций АЗН-В // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 210(12). С. 114–117.
2. Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской авиации. Авиационная электро-связь. Том IV. Системы наблюдения и предупреждения столкновений. ИКАО, Издание 5е. 2014. 244 с.
3. ИКАО Doc 9924. Руководство по авиационному наблюдению. Издание третье. ИКАО, 2021. 432 с.
4. ИКАО Doc 4444. Правила аэронавигационного обслуживания. Организация воздушного движения. Издание шестнадцатое. ИКАО, 2016. 530 с.
5. Федеральные авиационные правила. Организация воздушного движения в Российской Федерации (Приказ Минтранса России от 25.11.2011г. № 293). 91 с.
6. Плясовских А. П., Рубцов Е. А. Метод оценки достоверности информации АЗН-В в системе наблюдения и контроля аэродромного движения // Вестник СПбГУ ГА, 2019. № 3(24). С. 90–101.
7. Фадеев А. Н., Орлов В. Г. Особенности обеспечения безопасности в системе АЗН-В ОВЧ ЛПД режима 4 // Материалы Международной научно-технической конференции INTERMATIC-2015, часть 5. Москва: МИРЭА. 2015. С. 297–299.
8. Крыжановский Г. А., Шестаков И. Н. Способ повышения защищённости применения технологии автоматического зависимого наблюдения от наведённых целенаправленных помех // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Труды XXIII Всероссийской научно-практической конференции Российской академии ракетных и артиллерийских наук. Т. 5. Москва: РАРАН. 2020. С. 342–344.
9. Одуан К., Гино Б. Измерение времени. Основы GPS. Москва: Техносфера, 2002. 400 с.
10. Eurocontrol specification for ATM surveillance system performance (Volume 2 Appendices), EUROCONTROL-SPEC-0147, Edition 1.2, 2021, 166 p.
11. ИКАО Doc 9830 AN/452. Руководство по усовершенствованным системам управления наземным движением и контроля за ним (А-SMGCS). ИКАО. 2004. 100 с.
12. ИКАО Doc 9750-AN/963. Глобальный аэронавигационный план на 2016–2030 гг. 5-е изд. 2016. 142 с.

References

1. Kryzhanovsky G. A., Shestakov I. N. Expansion of the SRNS field using ADS-B ground stations. *Civil Aviation High Technologies*, 2014, no. 210(12), pp. 114–117. (In Russ.)

2. Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation. Aeronautical Telecommunications. Volume IV. Surveillance and Collision Avoidance Systems, ICAO, Fifth Edition, 2014, 228 p.
3. ICAO Doc 9924. Aviation Surveillance Manual, 3rd edition, ICAO, 2020, 398 p.
4. ICAO Doc 4444. Rules of air navigation services. Air traffic management, Sixteenth edition, ICAO, 2016, 490 p.
5. Federal Aviation Regulations “Organization of Air Traffic in the Russian Federation” (Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation, no. 293 dated 25.11.2011), 91 p.
6. Plyasovskikh A. P., Rubtsov E. A. Reliability estimation method of ADS-B information for surface movement guidance and control system, *Scientific Bulletin of SpbGU GA*, 2019, no. 3(24), pp. 90–101. (In Russ.)
7. Fadeev A. N., Orlov V. G. Features of security in the system of automatic transmission system-VHF LPD mode 4, *Materials of the International scientific and Technical Conference INTERMATIC-2015*, part 5, Moscow, MIREA Publ., pp. 297–299. (In Russ.)
8. Kryzhanovsky G. A., Shestakov I. N. A way to increase the security of the use of automatic dependent surveillance technology from induced targeted interference. In the collection: Actual problems of protection and security. *Proceedings of the XXIII All-Russian Scientific and Practical Conference of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences*, vol. 5, Moscow, RARAN Publ., 2020, pp. 342–344. (In Russ.)
9. Oduan K., Gino B. *Measurement of time. Fundamentals of GPS*, Moscow, Tekhnosfera Publ., 2002, 400 p.
10. Eurocontrol specification for ATM surveillance system performance (Volume 2 Appendices), EUROCONTROL-SPEC-0147, Edition 1.2, 2021, 166 p.
11. ICAO Doc 9830 AN/452. Advanced Surface Movement Guidance and Control Systems (A-SMGCS) Manual, ICAO, 2004, 89 p.
12. ICAO Doc 9750-AN/963. 2016–2030 Global Air Navigation Plan. 5th ed., ICAO, 2016, 142 p.

Информация об авторах

Плясовских Александр Петрович, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации имени Главного маршала авиации А. А. Новикова, Санкт-Петербург, Россия, al.plyasovskikh@yandex.ru

Шестаков Иван Николаевич, доктор технических наук, учёный секретарь, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, shin63@mail.ru

Authors information

Plyasovskikh Alexander P., Doctor of Sciences (Engineering), Professor, St. Petersburg State University of Civil Aviation named in honor of Air Chief Marshal A. A. Novikov, St. Petersburg, Russia, al.plyasovskikh@yandex.ru

Shestakov Ivan N., Doctor of Sciences (Engineering), Scientific Secretary, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, shin63@mail.ru

Статья поступила в редакцию 23.04.2023; одобрена после рецензирования 02.08.2023; принята к публикации 09.08.2023.

The article was submitted 23.04.2023; approved after reviewing 02.08.2023; accepted for publication 09.08.2023.

Научная статья

УДК 551.50:629.735.054.07.058.42

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗНЫХ ИСТОЧНИКОВ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ОЦЕНОК ПОГРЕШНОСТЕЙ СИСТЕМ ИЗМЕРЕНИЯ ВЫСОТЫ

Д. Е. ЩЕРБАКОВ, С. М. ВЕРГАЗОВ, О. В. САМОЙЛОВА, А. В. СУТОРМИНА

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. Для обеспечения безопасности полётов в воздушном пространстве между эшелонами 290 и 410, где применяется сокращённый минимум вертикального эшелонирования (RVSM), ИКАО организовало тринадцать региональных мониторинговых агентств (РМА), в которых аккредитованы практически все страны – члены ИКАО. РМА выполняют программу контроля характеристик выдерживания высоты воздушного судна (ВС) – мониторинг. Наиболее технически сложной задачей, которую выполняют РМА, является задача мониторинга погрешности систем измерения высоты (ASE) ВС. Для определения ASE РМА используют специальные технические средства – системы мониторинга. Метеорологические прогнозы являются одним из основных входных информационных компонентов, на основании которых системы мониторинга вычисляют погрешность ASE. Прогнозы поступают из Всемирных центров зональных прогнозов (ВЦЗП). Идентичность входных метеорологических данных влияет на идентичность результатов оценки погрешности ASE, получаемых различными РМА. На основании результатов измерений, проводимых региональным мониторинговым агентством «Евразия» (РМА «Евразия»), авторы статьи провели анализ данных прогностических моделей от двух ВЦЗП и сделали вывод, какой источник метеорологических данных даёт наиболее достоверные результаты расчёта геометрической высоты эшелонов полёта. Предлагается алгоритм для уменьшения величины ошибки погрешности ASE ВС, попавшего в анализируемую выборку, который позволяет улучшить сходимость результатов, получаемых от различных систем мониторинга, за счёт снижения влияния различий, присутствующих в метеорологических прогнозах источников метеорологической информации, являющихся причиной снижения достоверности оценки геометрической высоты эшелона полёта.

Ключевые слова: метеорологические данные, Всемирный центр зонального прогнозирования, геометрическая высота, глобальная система ассимиляции метеоданных, погрешность системы измерения высоты, система мониторинга выдерживания высоты, станция наземного базирования, региональное мониторинговое агентство, транспортные системы страны, интеллектуальные транспортные системы

Для цитирования: Щербаков Д. Е., Вергазов С. М., Самойлова О. В., Сутормина А. В. Использование разных источников метеорологических данных для повышения достоверности оценок погрешностей систем измерения высоты // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 43. С. 176–186.

USAGE OF DIFFERENT SOURCES OF METEOROLOGICAL DATA TO INCREASE ALTIMETRY SYSTEM ERROR MEASUREMENT VERACITY

D. E. SHCHERBAKOV, S. M. VERGAZOV, O. V. SAMOYLOVA, A. V. SUTORMINA

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

Abstract. To ensure the safety of flights in the airspace between flight levels 290 and 410, where a reduced vertical separation minimum (RVSM) is used, ICAO has organized thirteen regional monitoring agencies (RMA), in which almost all ICAO member countries are accredited. RMAs perform the program of control of aircraft height-keeping performance (monitoring). The most technically difficult task performed by RMAs is the task of monitoring the aircraft altimetry systems error (ASE). To determine ASE RMA, special technical means are used - monitoring systems. Meteorological forecasts are one of the main input information components, on the basis of which monitoring systems calculate the ASE error. Forecasts come from World Area Forecast Centers (WAFCs). The identity of the input meteorological data affects the identity of the results of ASE error estimates obtained by different RMAs. Based on the results of measurements performed by the Regional Monitoring Agency “Eurasia” (RMA “Eurasia”), the authors of the article analyzed the data of forecast models from two WAFCs and concluded which source of meteorological data provides the most reliable results of calculating the geo-metric height of flight levels. An algorithm is proposed to reduce the value of the ASE error of the aircraft ASE included in the analyzed sample, which allows improving the convergence of the results obtained from various monitoring systems by reducing the influence of differences present in the meteorological forecasts of meteorological information sources, which are the reason for reducing the reliability of geometric height estimates flight level.

Keywords: meteorological data, World Area Forecast Center, geometric height, Global Meteorological Data Assimilation System, altimetry systems error, height-keeping monitoring system, ground-based station, Regional Monitoring Agency, country transport systems, intelligent transport systems

For citation: Shcherbakov D. E., Vergazov S. M., Samoylova O. V., Sutormina A. V., Usage of different sources of meteorological data to increase altimetry system error measurement veracity, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2023, no. 43, pp. 176–186. (In Russ.)

Введение

Одной из наиболее сложных в техническом отношении задач, которые должны решать РМА в рамках программы контроля характеристик выдерживания высоты ВС, является задача оценки погрешности бортовых систем её измерения. Значение ASE невозможно определить пилотажными бортовыми средствами контроля в кабине экипажа и наземными средствами наблюдения в центрах обслуживания воздушного движения (ОВД), поэтому в профессиональной среде её называют невидимой ошибкой. Применение наземных систем мониторинга характеристик выдерживания высоты (АНМС), использующих информацию вещательного автоматического зависимого наблюдения АЗН-В, позволило значительно увеличить зону действия АНМС и собирать большой объём оценок ASE. В связи с этим специалисты РМА «Евразия» столкнулись с вопросом влияния источников метеорологической информации и методов её обработки на достоверность оценок ASE. В статье приведены некоторые результаты, полученные при использовании метеорологических данных в международном стандартизованном бинарном формате метеоданных (GRIB2) от разных ВЦЗП. Выяснилось, что в отдельных случаях используемые источники метеоинформации могут значительно влиять на достоверность оценок ASE.

Цель исследования – разработка алгоритма и сравнение с его использованием результатов расчётов геометрических высот эшелонов полёта от трёх источников метеорологических данных при вычислении ASE и установление предпочтительного источника с точки зрения получения наиболее достоверных оценок погрешностей ASE.

Сравнение результатов расчёта погрешности ASE при использовании разных источников метеорологических данных

Метеопроцессор, используемый РМА «Евразия» для оценки ASE, обрабатывает метеоданные в формате GRIB2. В этом формате ВЦЗП представляют свои прогнозы всем пользователям

для последующей обработки и прикладного использования. Такая функциональность метеопроцессора позволила провести сравнительную оценку использования разных источников метеорологических данных.

Между собой сравнивались метеорологические данные прогностических моделей от Лондонского ВЦЗП (WAFС_{Лондон}, шаг сетки $1,25^{\circ} \times 1,25^{\circ}$), Вашингтонского ВЦЗП (WAFС_{Вашингтон}, шаг сетки $1,25^{\circ} \times 1,25^{\circ}$) и данные модели Глобальной системы ассимиляции метеоданных (GDAS), представляемые США: Национальными центрами по охране окружающей среды (National Oceanic and Atmospheric – administration (NOAA), National Centers for Environmental Protection (NCEP). Таким образом, РМА «Евразия» проводило расчёт ASE одновременно с использованием трёх источников метеорологических данных на одном наборе траекторий ВС.

В основном результаты расчёта геометрической высоты эшелонов при использовании источников метеоинформации были сопоставимы, и разница не превышала 20 фут (рис. 1).

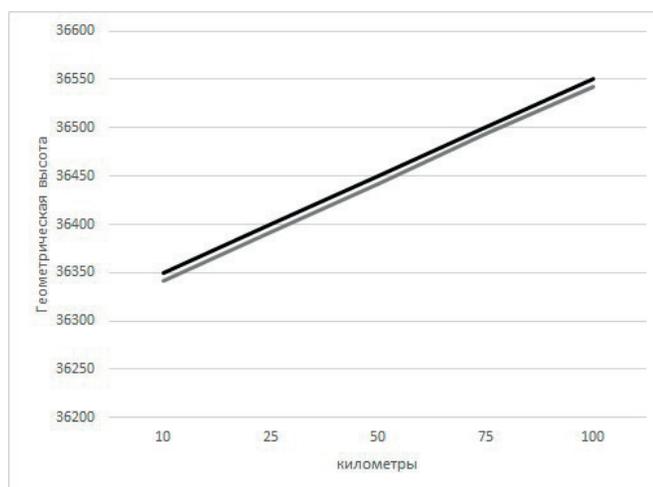


Рис. 1. Пример совпадения результатов расчёта геометрической высоты эшелона 350 с использованием разных источников метеоданных на расстоянии 100 км

Такие расхождения можно считать вполне приемлемыми. Однако были установлены случаи, когда разность вычисленных геометрических высот превышала 60 фут, что составляет четвертую часть от допустимой погрешности ASE и потому уже является критическим значением (рис. 2). Специалисты РМА «Евразия» обратили внимание на то, что значение разности расчёта геометрической высоты в основном сохраняется на всём промежутке времени полёта ВС (тот же характер кривой).

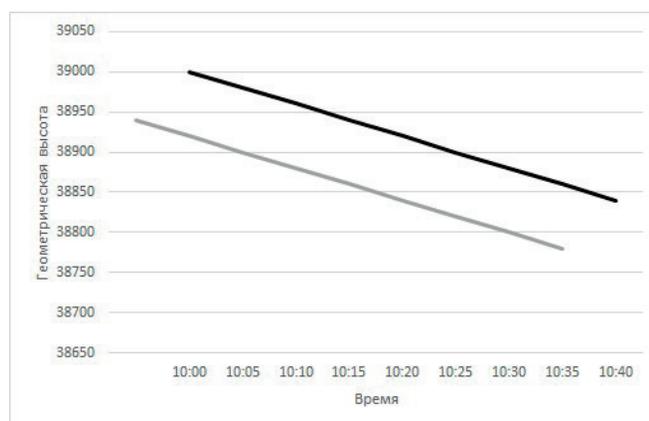


Рис. 2. Пример несовпадения результатов расчёта геометрических высот эшелона 380 по траектории полёта ВС при оценке ASE с использованием разных прогностических моделей

Особый интерес при проведении исследований вызывал вопрос сравнения прогнозов данных Лондонского и Вашингтонского ВЦЗП, поскольку эти прогнозы являются официальными данными для использования в гражданской авиации (ГА). Для этого в воздушном пространстве Московского центра ОВД была выделена область размером $1,25^{\circ} \times 1,25^{\circ}$, в которой проводились сравнения геометрических высот эшелонов по метеорологическим данным GRIB2 Лондонского и Вашингтонского ВЦЗП. Область пространства была выбрана так, что через неё проходили наиболее интенсивные потоки ВС (рис. 3).

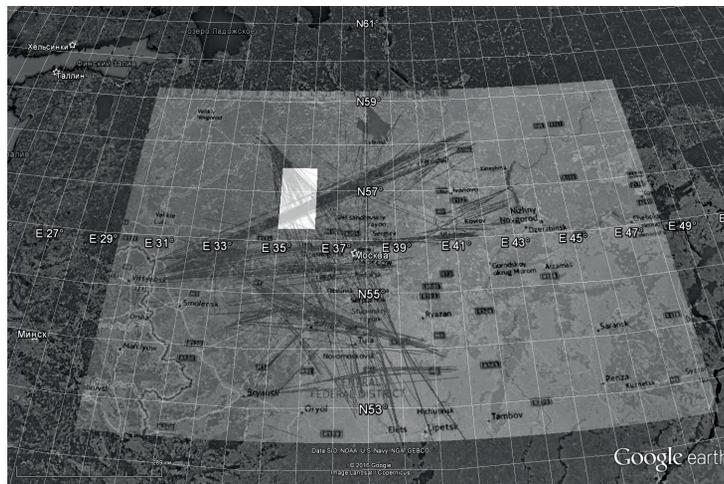


Рис. 3. Область, где проводилось сравнение результатов расчёта геометрических высот эшелонов от разных прогностических моделей

В выбранной области авторами было организовано постоянное наблюдение за состоянием поверхностей эшелонов полёта. Для сравнения результатов область аппроксимировалась 2601 точкой, для которых рассчитывалась геометрическая высота эшелонов по прогнозам Лондонского и Вашингтонского ВЦЗП. Результаты наблюдений за средним значением разницы между поверхностями геометрических высот эшелона 360 в выбранной области для фиксированных значений времени (с периодичностью 1 ч) за несколько дней представлены на рис. 4.

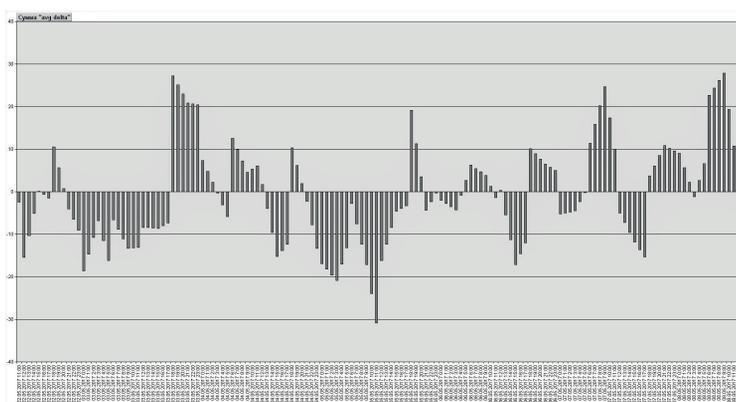


Рис. 4. Средняя разность по 2601 точке, вычисленная на начало каждого часа между прогнозами двух ВЦЗП за 5 дней наблюдений

Среднее значение разности геометрических высот для 2601 точки в течение дня обычно не превышало 2 фут (максимальное зафиксированное среднее значение не превышало 5 фут). Однако в отдельные часы некоторых дней разность была значительной (достигала 60 фут). Поверхности, иллюстрирующие разницу в результатах расчёта геометрических высот по

двум прогнозам для эшелона 360 для фиксированного момента времени представлены на рис. 5 и рис. 6.

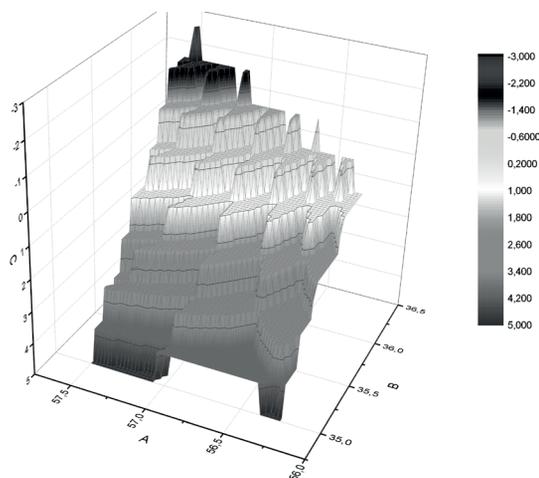


Рис. 5. Поверхность, иллюстрирующая хорошее совпадение результатов расчёта геометрических высот по прогнозам двух ВЦЗП. Разница в значениях геометрических высот эшелона 360 составляет от 3 до 5 футов

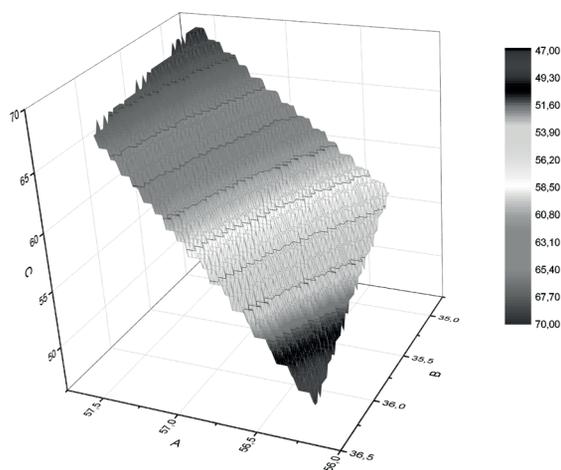


Рис. 6. Поверхность, иллюстрирующая плохое совпадение результатов расчёта геометрических высот по прогнозам двух ВЦЗП. Разница в значениях геометрических высот эшелона 360 составляет от 40 до 70 футов

Для одного и того же потока ВС среднее значение погрешности ASE и его среднее квадратичное отклонение (СКО), вычисленное по данным разных метеорологических источников, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Сравнение разных метеорологических источников

Расчётные характеристики	WAFС _{Лондон} (сетка 1,25°×1,25°)	WAFС _{Вашингтон} (сетка 1,25°×1,25°)	GDAS (сетка 0,25°×0,25°)
Среднее ASE	-34,020644	-26,365	-25,2
СКО	46,179	43,742	42,48

Среднее значение ASE по выбранному потоку ВС, рассчитанное в ходе проведения работ по данным GDAS, ближе к нулю и имеет меньшее СКО. Наибольшее отклонение среднего значения ASE от нуля по всему рассматриваемому потоку ВС наблюдалось при использовании метеоданных WAFС_{Лондон}.

В табл. 2 приведены значения СКО ASE отдельного ВС, выбранного из группы, рассчитанные по каждому из трёх источников.

Таблица 2

Значения СКО ASE для отдельного ВС

WAFС _{Лондон} (сетка 1,25°×1,25°)	WAFС _{Вашингтон} (сетка 1,25°×1,25°)	GDAS (сетка 0,25°×0,25°)
12,16667	10,66667	10,167

Полученные РМА «Евразия» результаты показывают, что исходные метеорологические данные в отдельных случаях могут значительно влиять на достоверность оценки погрешности ASE, а источник GDAS даёт наиболее точные результаты оценки и может рассматриваться как основной источник данных. Аналогичные результаты, показывающие, что использование источника GDAS позволяет снизить значения СКО погрешности ASE, были получены [1] специалистами РМА Северной Америки.

Зависимость достоверности оценки ASE от невязок источников метеоинформации

Специалисты РМА «Евразия» провели сравнение парных оценок ASE для случаев, когда одно и то же ВС проходило мониторинг дважды в течение одних суток [2]. На рис. 7 показана гистограмма разностей между результатами двух парных оценок ASE, выполненных в один день.

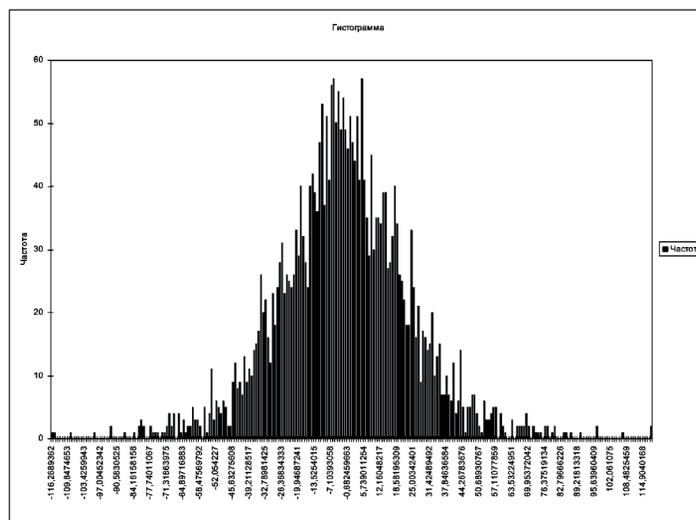


Рис. 7. Гистограмма разностей между двумя оценками ASE одного и того же ВС, сделанными в один день

Всего были проанализированы результаты 19689 измерений. Общее количество парных оценок составило 8292. Встречались случаи, когда разность двух измерений в течение одного дня достигала значений 60 фут и более. При этом авиакомпании не информировали о возникновении нештатных ситуаций в полёте, а СКО мгновенных значений ASE при выполнении всех оценок не превысило 35 фут.

Полученный результат позволил предположить, что одной из причин наблюдаемых значительных отклонений оценок ASE BC от среднего значения могут являться погрешности, присутствующие в прогнозах ВЦЗП. Разные источники метеорологических данных, возможно, в некоторых случаях недостаточно точно предсказывают уровни давления в своих первичных прогностических моделях, что приводит к снижению достоверности оценки ASE. При этом нельзя определить, в каком случае какой из источников предоставляет наиболее корректные результаты. Оценка ASE всегда проводится с использованием метеорологических данных одного источника, выбранного в качестве основного. Несовпадение данных от двух источников может служить индикатором возможного возникновения проблемной ситуации. Из табл. 1 видно, что наибольшие различия характерны для пары источников метеорологических данных: WAFС_{Лондон} и GDAS. В случае правильности высказанного предположения об индикаторе возможного возникновения проблемной ситуации должна существовать статистически подтвержденная корреляция между величиной отклонений от средних значений ASE, вычисленных с использованием основного метеорологического источника GDAS, и величиной невязок геометрической высоты эшелона между источниками данных WAFС_{Лондон} и GDAS.

Каждая оценка ASE является случайной величиной. Для проверки высказанного предположения все измерения ASE по каждому BC были преобразованы к стандартизованному виду в соответствии с правилом стандартизации случайных величин. Если ASE_{ij} – i -е измерение ASE для j -го BC; $ASE_{срj}$ – среднее значение ASE j -го BC и δ_j – СКО ASE j -го BC, то $ASE_{стандартij} = (ASE_{срj} - ASE_{ij}) / \delta_j$. Преобразованные таким образом результаты характеризуют относительное отклонение i -го измерения для j -го BC от среднего значения ASE этого экземпляра BC. Такое преобразование позволяет исключить влияние средней ошибки ASE каждого BC, попавшего в анализируемую выборку, на результат анализа. Представленные далее результаты получены на основе анализа стандартизованных значений оценок ASE.

Общее количество оценок ASE, вошедших в выборку для анализа, составило 3523. При анализе учитывались BC, имеющие не менее 20 оценок ASE. Вычисленный коэффициент корреляции между величиной ASE (по данным GDAS) и разностью геометрических высот эшелонов по двум источникам ($WAFС_{Лондон} - GDAS$) составил $K = 0,25$ с уровнем значимости по критерию Пирсона 0,001. Это говорит о наличии статистически подтвержденной связи между величиной отклонения от среднего значения ASE BC по источнику GDAS и значениями невязок геометрической высоты эшелонов между источниками WAFС_{Лондон} и GDAS. На графиках рис. 8–10 детализирована выявленная тенденция для полученных оценок ASE_{стандарт} по источнику GDAS в зависимости от величины невязки геометрических высот эшелонов в метеорологических источниках WAFС_{Лондон} и GDAS.

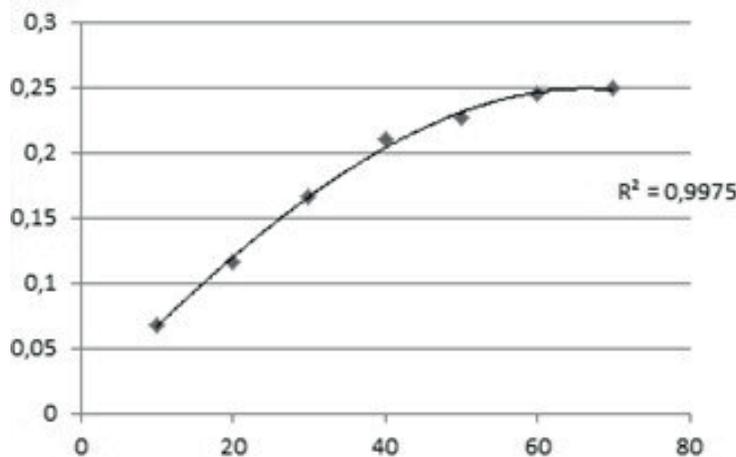


Рис. 8. Изменение коэффициента корреляции отклонений значений ASE_{стандарт} от среднего значения при увеличении невязок геометрических высот эшелонов WAFС_{Лондон} и GDAS

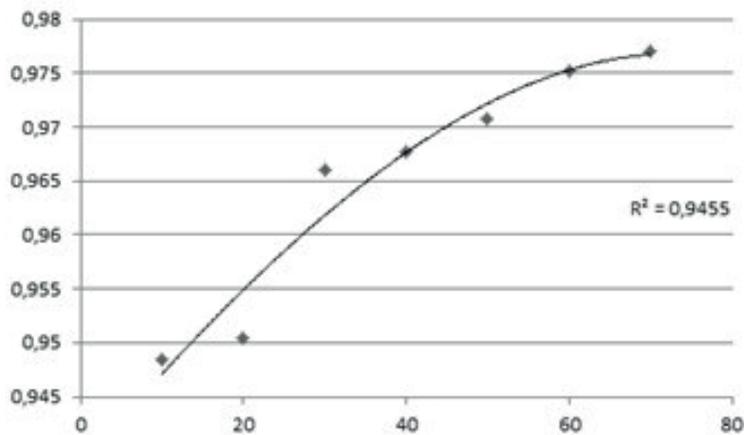


Рис. 9. Изменение СКО ASE_{стандарт} при увеличении невязок геометрических высот эшелонов WAFC_{Лондон} и GDAS

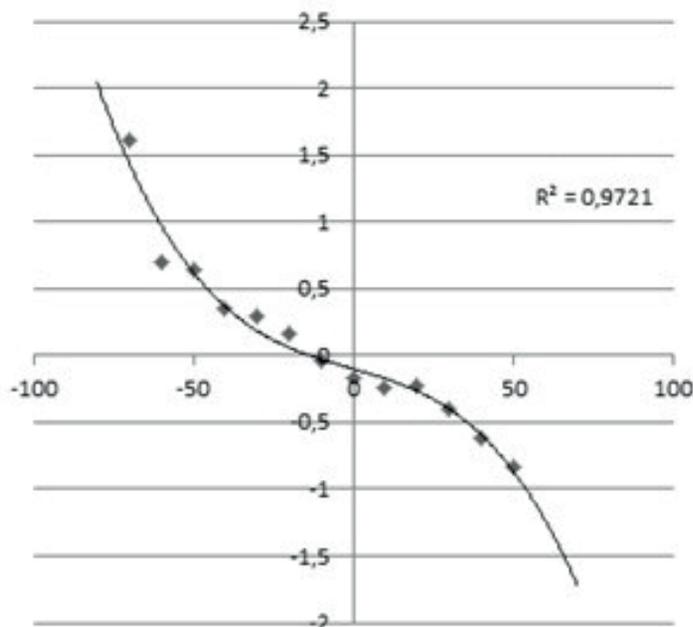


Рис. 10. Изменение средних отклонений ASE_{стандарт} от нуля на отдельных интервалах невязок геометрических высот эшелонов WAFC_{Лондон} и GDAS равных 10 фут

Все три зависимости показывают, что с уменьшением абсолютной величины невязок геометрических высот эшелонов между источниками WAFC_{Лондон} и GDAS достоверность оценок ASE по основному источнику GDAS улучшается. Происходит это за счёт того, что появление больших отклонений значений ASE от их среднего значения характерно в наибольшей степени для больших невязок между источниками WAFC_{Лондон} и GDAS.

Выявленная закономерность позволяет предложить следующий метод повышения достоверности и сходимости результатов оценок ASE с использованием информации от двух метеорологических источников WAFC_{Лондон} и GDAS, основным из которых является GDAS. Выберем интервал невязок ± 35 фут между геометрической высотой эшелона по источникам WAFC_{Лондон} и GDAS. Такая разность высот эшелонов примерно соответствует среднему вертикальному габариту ВС. Измерения ASE классифицируются как выполненные при плохих метеоусловиях, если по траектории ВС невязки геометрических высот эшелонов между источниками WAFC_{Лондон} и GDAS превышают выбранный интервал. Это позволит уменьшить влияние ошибок метеорологических прогнозов, присутствующих в данных источников метеорологической информации, на достоверность оценки

погрешности ASE и улучшить сходимость результатов от разных систем мониторинга [3]. Анализ собранных статистических данных показывает, что количество маркированных (исключённых) таким образом измерений не будет превышать 9 %. Площадь зоны действия современных систем мониторинга на основе информации АЗН-В, используемых на территории России, может быть оценена примерно как 1000×1000 км. Оценки ASE каждого ВС выполняются последовательно на 5-минутных интервалах полёта. Это позволяет безболезненно исключать из рассмотрения оценки ASE, выполненные в районах с плохим качеством метеорологических прогнозов.

Авторами в настоящей статье не ставилась задача уделить достаточное внимание вопросам обеспечения единства измерений и метрологического обеспечения проведённых изысканий. Поэтому в дальнейших исследованиях, с применением методических подходов, изложенных в [4–7], предполагается обеспечить проработку вопросов, связанных с решением измерительных задач косвенных измерений геометрических высот от трёх источников метеорологических данных при вычислении ASE, в том числе, для исключения возникновения метрологических рисков негативных ситуаций [8].

Заключение

Исходные метеорологические данные в отдельных случаях могут значительно влиять на достоверность оценки погрешности ASE, а источник GDAS позволяет получить наиболее достоверные результаты этих оценок и может рассматриваться как основной источник данных.

Полученные результаты говорят о наличии статистически подтверждённой связи между величиной отклонения от среднего значения ASE ВС по источнику GDAS и значениями невязок геометрической высоты эшелонов между источниками WAFС_{Лондон} и GDAS. Результаты оценок ASE, выполненные в районах с плохим качеством метеорологического прогноза маркируются, если по траектории ВС невязки высот эшелонов между источниками WAFС_{Лондон} и GDAS превышают выбранный интервал. В дальнейшем при оценке характеристик выдерживания высоты каждого ВС они подлежат исключению. Предложенный алгоритм в системах мониторинга НМУ/АНМС разработан авторами и внедрён предприятиями российской промышленности в практику авиационной деятельности отечественной ГА.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников

1. Источник метеорологической информации ФАА и форматы файлов данных, Двенадцатое координационное совещание региональных мониторинговых агентств, Сальвадор, Бразилия. 22–26 Мая 2017. URL: <https://portal.icao.int/RMA/RMACG12> (дата обращения: 24.07.2023)
2. Терентьев Л. А., Щербаков Е. К. Использование различных метеорологических источников для повышения точности измерений ASE. WP241, Рабочий документ тринадцатого заседания координационной группы RMA, Сальвадор, Бразилия, 11–15 мая 2018. URL: <https://portal.icao.int/RMA/RMACG13> (дата обращения: 24.07.2023).
3. Сравнение систем мониторинга. Шестнадцатое совещание RMACG16, 14–25 июня 2021 г., WP03, RMA Eurasia. URL: <https://portal.icao.int/RMA/RMACG16> (дата обращения: 24.07.2023).
4. Богоявленский А. А. Результаты испытаний системы НАСКД-200ПР для регламентного контроля авиационного оборудования вертолётов семейства Ми-8 // Мир измерений. 2022. № 1. С. 24–27.
5. Богоявленский А. А. Результаты испытаний системы НАСКД-200ПР для регламентного контроля авиационного оборудования вертолётов семейства Ми-8 (Окончание. Начало в № 1 за 2022 год) // Мир измерений. 2022. № 2. С. 30–33.

6. Богоявленский А. А., Боков А. Е., Матюхин К. Е. Метрологическое обеспечение эксплуатационных испытаний наземной автоматизированной системы контроля: методология и анализ результатов // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 219(9). С. 137–143.
7. Богоявленский А. А. Роль метрологической деятельности в условиях инновационного развития России // Мир измерений. 2021. № 1. С. 22–26.
8. Богоявленский А. А., Боков А. Е. Постановка задачи разработки методов управления метрологическими рисками негативных ситуаций в авиационной деятельности // Мир измерений. 2013. № 10. С. 3–7. <https://doi.org/10.35400/1813-8667-2013-10-3-7>

References

1. FAA Meteorological Information Source and Data File Formats, Twelfth Regional Monitoring Agencies Coordination Meeting, Salvador, Brazil, 22–26 May 2017, available at: <https://portal.icao.int/RMA/RMACG12> (accessed: 24.07.2023).
2. Terentiev L. A., Shcherbakov E. K. Use of various meteorological sources to improve the accuracy of ASE measurements. WP241, *Working Paper of the Thirteenth Meeting of the RMA Steering Group*, El Salvador, Brazil, 11–15 May 2018, available at: <https://portal.icao.int/RMA/RMACG13> (accessed: 24.07.2023).
3. Comparison of monitoring systems. Sixteenth RMACG16 meeting, June 14–25, 2021, WP03, RMA Eurasia, available at: <https://portal.icao.int/RMA/RMACG16> (accessed: 24.07.2023).
4. Bogoyavlensky A. A. Test results of the NASKD-200-PR system for routine control of aircraft equipment of Mi-8 helicopters, *Measurements World*, 2022, no. 1, pp. 24–27. (In Russ.)
5. Bogoyavlensky A. A. Test results of the NASKD-200-PR system for routine control of aircraft equipment of Mi-8 helicopters, (Ending. Beginning at no. 1 for 2022), *Measurements World*, 2022, no. 2, pp. 30–33. (In Russ.)
6. Bogoyavlenskiy A. A., Bokov A. E., Matyukhin K. E. Metrological support of operational testing of ground-based automated control system: methodology and analysis of results, *Civil Aviation High Technologies*, 2015, no. 219(9), pp. 137–143. (In Russ.)
7. Bogoyavlensky A. A. The role of metrological activity in the conditions of innovative development of Russia, *Measurements World*, 2021, no. 1, pp. 22–26. (In Russ.)
8. Bogoyavlensky A. A., Bokov A. E. Statement of the problem of development of methods of management of metrological risks of negative situations in aviation activities. *The world of measurement*, 2013, no. 10, pp. 3–7. <https://doi.org/10.35400/1813-8667-2013-10-3-7>

Информация об авторах

Щербаков Дмитрий Евгеньевич, старший научный сотрудник, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, shcherbakov_de@gosniiga.ru

Вергазов Сергей Михайлович, старший научный сотрудник, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, vergazov_sm@gosniiga.ru

Самойлова Оксана Викторовна, научный сотрудник, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, samoilova_ov@gosniiga.ru

Сутормина Алевтина Викторовна, научный сотрудник, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, sutormina_av@gosniiga.ru

Authors information

Shcherbakov Dmitry E., Senior Researcher, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, shcherbakov_de@gosniiga.ru

Vergazov Sergey M., Senior Researcher, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, vergazov_sm@gosniiga.ru

Samoylova Oksana V., Researcher, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, samoylova_ov@gosniiga.ru

Sutormina Alevtina V., Researcher, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, sutormina_av@gosniiga.ru

Статья поступила в редакцию 12.01.2023; одобрена после рецензирования 03.08.2023; принята к публикации 09.08.2023.

The article was submitted 12.01.2023; approved after reviewing 03.08.2023; accepted for publication 09.08.2023.

Обзорная статья
УДК 004.2

МИКРОСЕРВИСНАЯ И СЕРВИС-ОРИЕНТИРОВАННАЯ АРХИТЕКТУРЫ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ИНФРАСТРУКТУРОЙ ИТ-ПОДРАЗДЕЛЕНИЯ

С. А. ПЕТРУХИН, П. Е. ЧЕРНИКОВ, Г. Е. ГЛУХОВ, А. Г. КАРАПЕТЯН

Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия

Аннотация. В статье представлены две современные общепринятые концепции построения веб-инфраструктуры предприятия, основным направлением деятельности которого является разработка и внедрение веб-приложений и веб-сервисов. Авторы рассматривают сервис-ориентированную архитектуру (SOA) и микросервисную архитектуру (MSA) с точки зрения применимости на базе информационной инфраструктуры ИТ-подразделения ГосНИИ ГА. В статье приводится сравнительная характеристика указанных способов построения веб-инфраструктуры и обосновывается выбор технических решений для их реализации. По итогам представленного сравнительного анализа авторы в статье рассматривают и формируют схему построения веб-архитектуры на базе применения элементов обеих архитектур, взаимодействие которых обеспечивает наиболее приемлемый для нужд ИТ-подразделения результат. В рамках сформированной схемы обосновываются потенциальные преимущества (по сравнению с существующей инфраструктурой) организации доступа, администрирования, разработки и модернизации веб-приложений и веб-сервисов в обновлённой веб-инфраструктуре.

Ключевые слова: микросервисная архитектура, веб-инфраструктура, программное обеспечение, разработка веб-приложений, администрирование, программирование, интеллектуальные транспортные системы

Для цитирования: Петрухин С. А., Черников П. Е., Глухов Г. Е., Карапетян А. Г. Микросервисная и сервис-ориентированная архитектуры в задачах оптимизации управления информационной инфраструктурой ИТ-подразделения // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2023. № 43. С. 187–196.

MICROSERVICE AND SERVICE-ORIENTED ARCHITECTURES IN THE TASKS OF OPTIMIZING THE MANAGEMENT OF IT INFORMATION INFRASTRUCTURE

S. A. PETRUKHIN, P. E. CHERNIKOV, G. E. GLUKHOV, A. G. KARAPETYAN

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

Abstract. The article presents two modern generally accepted concepts for building an enterprise web infrastructure, the main activity of which is the development and implementation of web applications and web services. The authors consider service-oriented architecture (SOA) and microservice architecture (MSA) in terms of applicability based on the IT information infrastructure of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation. The article provides a detailed comparative description of these methods of building a web infrastructure and justifies the choice of technical solutions for their implementation. Based on the results of the presented comparative analysis, the authors in the article consider and form a scheme for building the web

architecture of the IT information infrastructure on the basis of the use of elements of both architectures, the complementation of which provides the most acceptable result for the needs of the IT information infrastructure. Within the framework of the formed scheme, the potential advantages (compared to the existing infrastructure) of organizing access, administration, development and modernization of web applications and web services in the updated web infrastructure are justified.

Keywords: microservice architecture, web infrastructure, software, web application development, administration, programming, intelligent transport systems

For citation: Petrukhin S. A., Chernikov P. E., Glukhov G. E., Karapetyan A. G. Microservice and service-oriented architectures in the tasks of optimizing the management of IT information infrastructure, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2023, no. 43, pp. 187–196. (In Russ.)

Введение

Исторически веб-архитектура строилась на клиент-серверных технологиях, берущих своё начало в 1990 году, когда в ЦЕРН (европейской организации по ядерным исследованиям) велась разработка первого веб-сервера, известного как CERN HTTPD, а впоследствии как W3C HTTPD. Именно по такой традиционной архитектуре, в центре которой находится веб-сервер как отдельное программное обеспечение (ПО), были построены веб-службы ИТ подразделения ГосНИИ ГА. В общем виде веб-сервер возвращает клиенту статическую веб-страницу (файл из хранилища), либо формирует страницу или её отдельные части, запуская скрипт (отдельно написанную программу) на интерпретируемом языке программирования, который может обращаться к базе данных за необходимыми сведениями [1]. Ряд удачных технических решений позволил небольшому коллективу специалистов ИТ-подразделения разрабатывать и внедрять в короткие сроки эффективные веб-решения.

В последующие годы, после появления первых веб-серверов и веб-браузеров, веб-технологии активно развивались. По мере качественного роста технологий отображения информации в браузерах и совершенствования методов серверной обработки и передачи информации веб-технологии вышли далеко за рамки простой клиент-серверной парадигмы. Множество нововведений в этой сфере и запросы пользователей и клиентов потребовали дальнейшего совершенствования веб-инфраструктуры ИТ-подразделения, тем более, что инфраструктура, построенная на основе традиционной архитектуры, имела слабую поддержку современных стандартов построения веб-приложений. Это выражалось в архаичном, по меркам сегодняшнего дня, интерфейсе пользователя и невозможности использования современных компилируемых языков программирования, более быстрых, чем устаревшие аналоги. Кроме того, эксплуатация и доработка уже разработанных решений стали осложняться тем, что некоторые элементы ПО веб-инфраструктуры были разработаны более 20 лет назад и их техническая поддержка давно прекращена.

Поиск технического решения и сравнение архитектур

Изучение проблемы показало, что обновление компонентов существующей веб-инфраструктуры потребует переписать, а фактически разработать заново около 35 веб-сервисов, созданных специалистами ИТ-подразделения. Очевидно, что сделать это одномоментно невозможно. Предварительные расчёты показали, что имеющимся штатом специалистов такие работы могут быть выполнены в течение двух лет, в условиях отказа от внесения изменений (доработок) в уже эксплуатируемые веб-сервисы и от разработки новых веб-сервисов. В реальных условиях отказ от доработок невозможен, так как пользователям регулярно требуется хотя бы минимальное обновление разработанного ПО для его соответствия текущим задачам. Также весьма сомнительной выглядит возможность отказа от новых разработок, так как множество новых задач

пользователей не может быть решено в рамках старых веб-сервисов. Невозможность выполнения этих двух условий выявила необходимость разработки такого технического решения, которое бы позволило одновременно с эксплуатацией уже существующей веб-инфраструктуры вести плавный переход на более современную веб-платформу, проводя постепенную переработку и миграцию существующих веб-сервисов, а в случае необходимости – осуществлять разработку и внедрение новых. Кроме того, такое техническое решение должно учитывать возможность портирования на новую веб-платформу других продуктов, созданных программистами ИТ-подразделения как пользовательские настольные (десктопные) приложения операционной системы (ОС). Помимо этого в обязательном порядке должны быть учтены государственные требования перехода на отечественное ПО в интеллектуальных транспортных системах. В этой связи решено было, наряду с традиционной архитектурой, рассмотреть более современные способы построения веб-инфраструктуры, а именно сервис-ориентированную архитектуру (service-oriented architecture, далее SOA) и микросервисную архитектуру (microservices architecture, далее MSA).

В основе концепции SOA лежат две основные идеи – повторное использование разработанных компонентов и общая для них шина данных. Главная идея – это разбиение системы на отдельные сервисы, каждый из которых решает одну задачу, что исключает дублирование функционала и сильно облегчает многократное использование сервисов в разных прикладных задачах. Общая шина используется для передачи данных между сервисами и выполняет связующую и координационную роль. Также сервисы взаимодействуют друг с другом, вызывая методы (действия над данными с одновременной передачей данных) друг друга. Сервисы в парадигме SOA делятся на инфраструктурные, прикладные, сервисы уровня предприятия и сервисы для внешних вызовов (api). Задача инфраструктурных сервисов – обеспечить сервисы более высокого уровня необходимым набором простых базовых функций. Задача многократного использования сервисов относится в первую очередь именно к инфраструктурным сервисам, и уже в меньшей степени к сервисам более высокого уровня. Иерархически над инфраструктурными сервисами располагаются сервисы прикладного уровня, которые, опираясь на инфраструктурные сервисы, решают отдельные прикладные задачи. На следующей ступени находятся сервисы уровня предприятия, опирающиеся на два предыдущих типа сервисов и реализующие уже не отдельные прикладные задачи, а комплекс связанных задач (бизнес-процессы). Несколько особняком стоят сервисы, предназначенные для внешних вызовов (api). Их задача – обеспечить необходимыми данными пользовательские интерфейсы, обычно представляющие собой веб-приложения или мобильные приложения. Также сервисы внешних вызовов используются для интеграции с другими информационными системами.

В MSA делается упор на автономность сервисов, дублирование функционала в такой архитектуре не только допустимо, но и поощряется ради достижения максимальной независимости сервисов друг от друга. При таком подходе, как правило, нет общей шины данных, а для взаимодействия сервисы используют шину (брокер) сообщений; для хранения данных каждый сервис оперирует, как правило, своей собственной базой данных. Всё это в комплексе позволяет отказаться от реализации механизмов разделения ресурсов и делает каждый сервис самодостаточным.

Было проведено сравнение архитектур, применительно к задачам, решаемым ИТ-подразделением, по критериям, связанным прежде всего с разработкой, внедрением и последующей эксплуатацией веб-сервисов [2]. Результаты таких сравнений приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Сравнительные критерии разработки и внедрения для различных архитектур

Критерий	Архитектура		
	Традиционная	SOA	MSA
Скорость разработки веб-сервисов	средняя/высокая	средняя/высокая	средняя/высокая

Окончание таблицы 1

Критерий	Архитектура		
	Традиционная	SOA	MSA
Сложность разработки веб-сервисов	средняя	высокая	низкая
Скорость внедрения веб-сервисов	средняя	средняя	высокая
Возможность разработки веб-сервисов под разные программно-аппаратные платформы	средняя	высокая	высокая
Эффективность использования компилируемых языков программирования	низкая	высокая	высокая
Возможность интеграции с современными ИТ-системами	низкая	высокая	высокая
Возможность соответствовать определению «Отечественное программное обеспечение»	низкая	высокая	высокая

По критериям ведения разработки и внедрения все архитектуры показывают в целом хорошие результаты. Скорость разработки веб-сервисов в парадигме любой архитектуры может быть высокой при соблюдении соответствующих архитектуре концепций и правил. Однако обращает на себя внимание трудность или даже невозможность для традиционной архитектуры соответствовать трём заключительным критериям в табл. 1, а они очень важны. Использование современных быстрых компилируемых языков программирования в традиционной парадигме либо невозможно, либо сопряжено с серьёзными архитектурными перекосями и падением скорости работы: традиционный веб-сервер становится в этом случае лишним звеном, препятствующим нормальному процессу обработки и передачи информации. Интеграция с современными информационными системами и ПО затруднена, как из-за особенностей традиционной архитектуры, так и (в случае ИТ-подразделения) из-за некоторых устаревших компонентов, не позволяющих воспользоваться современными программными библиотеками, драйверами и прочими средствами, необходимыми для интеграции. Этот недостаток весьма существенен, так как от современных веб-систем уже давно требуется не только выдавать контент пользователю, но и взаимодействовать с другими информационными системами. Тенденции к интеграции систем постоянно усиливаются, ПО, выполняющее только одну задачу передачи данных пользователю и не имеющее возможность взаимодействовать с другими системами, в наши дни полностью теряет свою актуальность. Возможность соответствовать определению «Отечественное ПО» не может быть реализована в реальных условиях, так как все продукты, лежащие в основе эксплуатируемой ИТ-подразделением веб-инфраструктуры, включая как собственно сам веб-сервер и базы данных имеют иностранное происхождение и заменить их на отечественное не представляется возможным ввиду отсутствия некоторых категорий отечественного ПО. Относительно SOA следует заметить, что хотя во многих отношениях это весьма прогрессивная концепция, однако из-за более сложной архитектуры и, как следствие, увеличения количества внутренних связей, число которых стремительно изменяется по мере развития продукта, она требует дополнительных трудозатрат при разработке. MSA обращает на себя внимание скоростью разработки и внедрения и при этом меньшей сложностью разработки по сравнению с другими архитектурами.

Таблица 2

Сравнительные критерии эксплуатации для различных архитектур

Критерий	Архитектура		
	Традиционная	SOA	MSA
Возможность внесения изменений в веб-сервис (доработка), не затрагивая работу уже существующих веб-сервисов	низкая	низкая	высокая
Возможность горизонтального масштабирования при росте нагрузки	низкая	средняя	высокая
Возможность автономной работы веб-сервиса	низкая	низкая	высокая
Возможность переноса веб-сервисов в другую среду (в среду заказчика)	низкая	низкая	высокая
Сложность поддержки инфраструктуры	высокая	высокая	низкая
Затраты на администрирования сопутствующего ПО	высокие	средние	низкие

Табл. 2 показывает, что самые существенные трудозатраты, заметно бóльшие, чем для других архитектур, требуются для эксплуатации существующей традиционной инфраструктуры. Это связано, во-первых, с тем, что для обработки входных данных и выдачи результата используется «слоёный пирог» из различного ПО, которое необходимо поддерживать в рабочем состоянии. Эти слои включают в себя, помимо необходимых компонентов ОС (например компонентов для запуска программ как сервисов ОС) следующее ПО: веб-сервер «Apache», сервер веб-приложений «Passenger», программную библиотеку языка «ruby», пакет «rails», другие вспомогательные пакеты, систему управления базами данных. Некоторые из этих слоёв содержат сотни модулей, включённых «на всякий случай», на все случаи жизни, что ведёт к усложнению конфигурационных файлов, их разрастанию и, как следствие, делает систему запутанной и сложной в обслуживании, требующей значительного времени на поддержание её в рабочем состоянии. Кроме того, некоторые из этих частей «слоёного пирога» не совместимы с современными ОС и не могут быть заменены на обновлённые версии, так как это приведёт к неработоспособности всего написанного ранее кода. Некоторые компоненты настолько стары, что из сети Интернет удалены не только отдельные страницы и разделы, но и целые сайты, созданные в своё время для обеспечения технической документацией по этим компонентам и их технической поддержки, что создаёт затруднения при поиске решений проблем, возникающих во время эксплуатации. Всё это ведёт к тому, что рабочее время специалистов всё больше и больше расходуется на поддержание старой веб-инфраструктуры, а не на разработку новых проектов.

Выбор архитектуры

Ключевыми элементами SOA являются концепция создания повторно используемых компонентов и (как правило, но не всегда) использование шины данных. В теории это звучит хорошо – каждый компонент разрабатывается как элемент, выполняющий одно простое действие, и результаты его работы используются во всех других компонентах, что должно давать значительный прирост скорости разработки, поскольку повторно не требуется разрабатывать функции, реализованные в других сервисах. На практике же этот подход ведёт к лавинообразному росту количества связей между сервисами, что значительно усложняет поддержку системы и разработку новых компонентов, особенно когда система достигает зрелости (большого количества

компонентов). Кроме того, наличие множества связей между сервисами предъявляет жёсткие требования к документированию разработок, что в разы увеличивает затраты времени на создание подробной детальной документации и поддержание её в актуальном состоянии. Как следствие, такой архитектурный подход требует наличия профессиональной команды, занимающейся только разработкой и сопровождением SOA-проектов, разработчики отдельных сервисов при этом не владеют пониманием работы всей системы (а зачастую даже её укрупнённых частей), роль координатора и качество документирования становятся критическими. В случае недочётов в координации действий (а такая координация на практике сложна и требует значительных усилий) или недостатков в ведении документации система, построенная по концепции SOA, очень быстро превращается в неуправляемый «чёрный ящик». Кроме того, такая система требует значительных трудозатрат для сопровождения её эксплуатации, так как требуется контролировать большое количество связей между компонентами и поддерживать их в рабочем состоянии. В реалиях ИТ-подразделений ГосНИИ ГА разработка веб-сервисов ведётся зачастую прерывисто, разными специалистами, имеющими неодинаковый уровень знаний и опыта в разработке веб-технологий, в разное время и часто с большим временным лагом, а веб-сервисы по большей части функционируют автономно, без непрерывного контроля. Кроме того, из-за большого количества внутренних связей между сервисами в случае переноса каких-либо решений внешним заказчикам потребуются дополнительные трудозатраты на портирование, настройку, внедрение и последующее сопровождение систем из компонентов, построенных по концепции SOA. Это, по мере внедрения таких решений, очень быстро сузит круг возможных новых заказчиков, так как уже после нескольких внедрений весь персонал ИТ-подразделения вынужден будет всё своё рабочее время уделять поддержке сложных архитектурных решений внедрённых проектов.

Главной концепцией MSA является идея автономности сервисов, снижения зависимости их друг от друга до минимума [3]. Это ведёт к написанию некоторого количества избыточного кода, однако даёт ряд преимуществ на практике, таких как возможность вести разработку различных сервисов разным специалистам в разное время, независимо друг от друга. Созданные сервисы легко переносятся в другую среду, в том числе в среду заказчика, и требуют минимального сопровождения. Появление небольших недочётов в документации или координации действий специалистов не ведёт к потере управляемости всей инфраструктурой сервисов, в отличие от SOA.

ПО, созданное по современным архитектурным принципам, не имеет ненужного «навязанного» ПО, поэтому требует значительно меньших затрат на администрирование и по удобству эксплуатации значительно превосходит созданное на основе традиционной архитектуры. Фактически администрировать приходится то, что сделали сами разработчики, а такое ПО не имеет дополнительных накладных расходов, присутствующих в системах, построенных в рамках традиционной архитектуры, в виде избыточных ненужных для работы конкретных решений модулей [4]. Для SOA большие затраты на поддержку инфраструктуры по сравнению с MSA обусловлены более сложной структурой с большим количеством внутренних связей между компонентами, которые необходимо контролировать, отслеживать и поддерживать в рабочем состоянии. Большое количество связей между компонентами применительно к задачам, решаемым ИТ-подразделениями ГосНИИ ГА, не позволит быстро перенести разработанные решения в среду заказчика, так как потребует анализа используемых компонентов, их внутренних связей и пересборки веб-сервисов под каждого заказчика персонально. А это, в свою очередь, приведёт к появлению множества уникальных несовместимых решений и, как следствие, потребует значительных затрат при последующей технической поддержке и развитии проектов, внедрённых у заказчиков. Гораздо более привлекательным в этом отношении выглядит подход MSA со своей концепцией автономной работы сервисов. Для ИТ-подразделений ГосНИИ ГА наиболее важными критериями являются: скорость разработки, возможность применения и использования в своих продуктах современных веб-технологий, возможность интеграции с различными информационными системами, возможность использования современных языков программирования, а также

методов и средств разработки, возможность горизонтального масштабирования при росте нагрузки, быстрое внедрение, возможность вести разработку независимо различным членам команды, скорость переноса к заказчикам и простота адаптации под их конкретные условия, возможность вносить изменения, не нарушая работу других сервисов, минимальные затраты на техническую поддержку. Всем этим критериям наиболее полно соответствует микросервисная архитектура, поэтому она является более привлекательной, чем сервис-ориентированная.

Планируемая архитектура микросервисов

На рисунке представлено схематическое изображение включения микросервисов в уже существующую веб-инфраструктуру. Слева изображён существующий веб-сервер (традиционная архитектура), справа – новая планируемая часть веб-инфраструктуры. Обе части совмещённой веб-инфраструктуры выходят в интернет через существующий маршрутизатор независимо друг от друга. На переходный период будут эксплуатироваться старая веб-инфраструктура и выстраиваемая параллельно ей новая (левая и правая часть на рисунке соответственно), при этом будет происходить постепенная переработка и миграция существующих веб-сервисов на новый технологический стек. Переход на микросервисы на практике может быть длительным процессом [5].

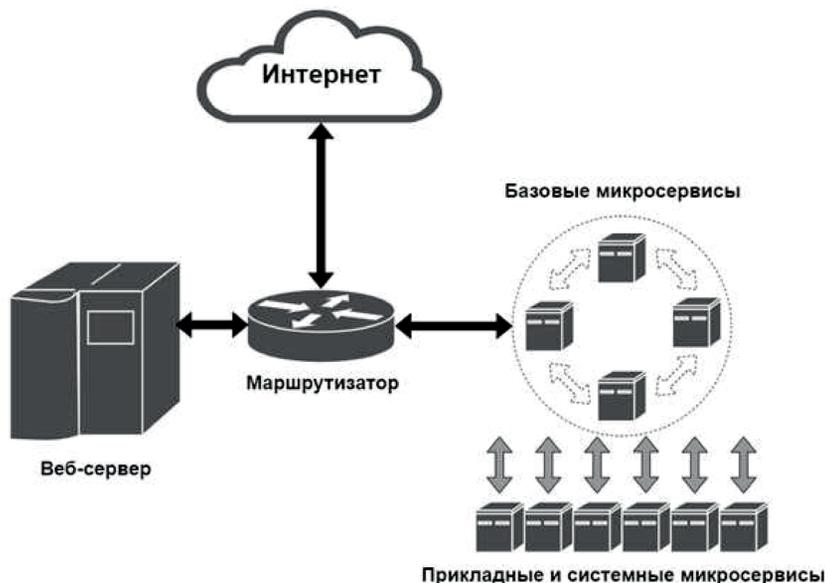


Схема включения микросервисов в существующую инфраструктуру

Микросервисы подразделяются на три основных типа: базовые, прикладные и системные. Прикладные микросервисы предназначены для работы пользователей и решают конкретные прикладные задачи, в общем случае микросервис прикладного типа можно считать веб-сервисом или веб-приложением или даже (но не всегда) веб-сайтом. Системные микросервисы, как правило, не имеют интерфейса для взаимодействия с пользователем и служат для решения системных задач, таких как приём и отправка электронной почты, взаимодействие с базами данных, конвертация данных в различные форматы, работа с источниками и приёмниками данных, интеграция с другими информационными системами.

Базовые сервисы (в верхнем круге справа на рисунке) обеспечивают работу всех прочих микросервисов. Можно считать это небольшим отступлением от MSA в сторону SOA, но здесь это оправдано, так как позволит избежать разработки дублирующего функционала для всех прочих микросервисов [6]. Базовые микросервисы включают в себя реверсивный прокси-сервер, сервис аутентификации, сервис ведения лог-файлов, сервис протоколирования действий. Связи

между базовыми микросервисами обозначены пунктирными стрелками по причине того, что не могут быть определены на этапе предварительного планирования и прояснятся только в процессе проектирования и реализации базового слоя. Реверсивный прокси-сервер обеспечивает выход всех сервисов в интернет, в том числе по протоколу HTTPS, для чего осуществляет поддержку работы механизмов SSL, а также взаимодействие со службой DNS для перенаправления веб-трафика из сети Интернет на конкретный прикладной микросервис, находящийся в локальной сети. Кроме того, он служит дополнительным барьером безопасности между сетью Интернет и прикладными микросервисами, изолируя их от вредоносного трафика, при должной реализации и соответствующих настройках [7]. При этом прикладные веб-сервисы могут работать по более простому протоколу HTTP, что весьма существенно упрощает их разработку и внедрение. Сервис аутентификации реализует единую службу для пользователей, что избавит их от необходимости аутентифицироваться в каждом веб-сервисе отдельно, а программистов от необходимости реализации такого функционала в каждом микросервисе. Учитывая, что число микросервисов будет исчисляться десятками, а со временем вероятно сотнями, это позволит существенно сэкономить время на их разработку и внедрение [8]. Сервисы записи лог-файлов и протоколирования также избавляют программистов от необходимости реализовывать эти функции в прикладных микросервисах. Небольшое включение в MSA элементов SOA в виде слоя базовых микросервисов позволит программистам сосредоточиться на реализации прикладных задач и избавит от необходимости многократного написания дублирующего кода в разных веб-проектах.

Заключение

В реалиях работы ИТ-подразделений ГосНИИ ГА для функционирования интеллектуальных транспортных систем существующая традиционная веб-инфраструктура уже не справляется с современными задачами, что выражается в замедлении разработки новых проектов из-за недостаточной поддержки современных технологий, невозможности предоставления полноценного одновременного доступа всем разработчикам к серверам, постоянно растущих трудоёмкости технической поддержки и трудностей переноса уже разработанных и функционирующих решений к сторонним заказчикам. Подход SOA, несмотря на кажущуюся внешнюю привлекательность, мало применим в практике ИТ-подразделения, а проекты в рамках такого подхода будут затруднительно разрабатывать, внедрять, переносить и сопровождать. Гораздо более удачным решением выглядит использование MSA с обоснованным отступлением в сторону SOA для обеспечения базового функционала, который потребуется всем или почти всем портируемым и вновь разрабатываемым веб-сервисам. Опора на микросервисную архитектуру позволит ИТ-специалистам вести разработку различных сервисов независимо друг от друга, быстро внедрять их, относительно легко переносить заказчикам и тратить гораздо меньше усилий при доработке и сопровождении. Кроме того, выбор MSA позволит в переходный период продолжить эксплуатировать уже существующую традиционную веб-инфраструктуру.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список источников

1. Эспозито Д. Разработка современных веб-приложений: анализ предметных областей и технологий. Москва: Вильямс И.Д., 2017. 464 с.
2. Будникова И. К., Котков М. А. Концепция и технология разработки веб-сервисов // Информационные технологии в строительных, социальных и экономических системах. 2022. № 3(29). С. 27–30.

3. Караханова А. А. Анализ микросервисной архитектуры, монолитных приложений, архитектуры SOA // Синергия Наук. 2020. № 46. С. 255–262. <https://elibrary.ru/bvoveu>
4. Калашников А. О., Аникина Е. В., Остапенко Г. А., Борисов В. И. Влияние новых технологий на информационную безопасность критической информационной инфраструктуры // Информация и безопасность. 2019. Т. 22. № 2. С. 156–169. <https://elibrary.ru/sbkzgb>
5. Райффайзен Банк: Переход от монолита к микросервисам: история и практика. URL: <https://habr.com/ru/company/raiffeisenbank/blog/458404/> (дата обращения: 14.02.2023).
6. Петрухин С. А., Черников П. Е., Глухов Г. Е., Еремин В. А. Перспективы использования блокчейна в Информационно-аналитической системе мониторинга лётной годности воздушных судов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 40. С. 164–172. <https://elibrary.ru/powxxn>
7. Благоразумов А. К., Черников П. Е., Глухов Г. Е., Семин А. В. Методы обеспечения безопасности веб-приложений // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2022. № 41. С. 144–152. <https://elibrary.ru/zfzkxx>
8. Москалев М. Г., Газизов Т. Т. Использование экосистемного подхода в разработке микросервисов образовательной организации // Информация и образование: границы коммуникаций. 2022. № 14(22). С. 57–60.

References

1. Ehsposito D. *Razrabotka sovremennykh veb-prilozhenij: analiz predmetnykh oblastej i tekhnologij [Development of modern web applications: analysis of subject areas and technologies]*, Moscow, Vil'yams I. D. publ., 2017, 464 p. (In Russ.)
2. Budnikova I. K., Kotkov M. A. Kontseptsiya i tekhnologiya razrabotki veb-servisov, *Informatsionnye tekhnologii v stroitel'nykh, sotsial'nykh i ehkonomicheskikh sistemakh*, 2022, no. 3(29), pp. 27–30. (In Russ.)
3. Karakhanova A. A. Analysis of microservice architecture, monolithic applications, SOA architecture, *Sinergiya Nauk*, 2020, no. 46, pp. 255–262. (In Russ.)
4. Kalashnikov A. O., Anikina E. V., Ostapenko G. A., Borisov V. I. Vliyanie novykh tekhnologij na informatsionnyu bezopasnost' kriticheskoy informatsionnoj infrastruktury, *Information and Security*, 2019, vol. 22, no. 2, pp. 156–169. (In Russ.)
5. Rajffajzen Bank: Perekhod ot monolita k mikroservisam: istoriya i praktika, available at: <https://habr.com/ru/company/raiffeisenbank/blog/458404/> (accessed: 14.02.2023). (In Russ.)
6. Petrukhin S. A., Chernikov P. E., Glukhov G. E., Eremin V. A. Prospects for the use of block-chain in the information and analytical system for monitoring the airworthiness of aircraft, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 40, pp. 164–172. (In Russ.)
7. Blagorazumov A. K., Chernikov P. E., Glukhov G. E., Semin A. V. Web application security methods, *Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2022, no. 41, pp. 144–152. (In Russ.)
8. Moskaev M. G., Gazizov T. T. Ispol'zovanie ehkosistemnogo podkhoda v razrabotke mikroservisov obrazovatel'noj organizatsii, *Informatsiya i obrazovanie: granitsy kommunikatsij*, 2022, no. 14(22), pp. 57–60. (In Russ.)

Информация об авторах

Петрухин Сергей Александрович, старший научный сотрудник, заместитель начальника отдела, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, petruhin@mlgvs.ru

Черников Павел Евгеньевич, кандидат технических наук, заместитель директора Научного центра, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, chernikov@mlgvs.ru

Глухов Геннадий Евгеньевич, заместитель директора Научного центра, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, glukhov@mlgvs.ru

Карапетян Арман Гегамович, начальник отдела, Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Москва, Россия, karapetyan@mlgvs.ru

Authors information

Petrukhin Sergey A., Senior Research Fellow, Deputy Head of Department, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, petruhin@mlgvs.ru

Chernikov Pavel E., Candidate of Sciences (Engineering), Deputy Director of Scientific Centre, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, chernikov@mlgvs.ru

Glukhov Gennady E., Deputy Director of Scientific Centre, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, glukhov@mlgvs.ru

Karapetyan Arman G., Head of Department, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia, karapetyan@mlgvs.ru

Статья поступила в редакцию 14.04.2023; одобрена после рецензирования 12.06.2023; принята к публикации 19.06.2023.

The article was submitted 14.04.2023; approved after reviewing 12.06.2023; accepted for publication 19.06.2023.

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 21.08.2023

Печать офсетная
22,5 усл. печ. л.

Формат 60x84 1/8
Заказ № 23-41з

15,2 уч.-изд. л.
Тираж 70 экз.

Изготовлено и оформлено: ООО «Типография Миттель Пресс»

e-mail: mittelpress@mail.ru

Автор вёрстки: Михеева А. В.