

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 (GosNII GA)

СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ (№ 347)

№ 36

Москва

2021

ББК 39.5

НЗ4

Научный вестник ГосНИИ ГА

№ 36

Научный вестник ГосНИИ ГА включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, сформированный в соответствии с приказом Минобрнауки России от 25 июля 2014 г. № 793.

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, formed in accordance with the order of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation of 25 July 2014 no. 793.

Учредитель. Издатель. Редакция:

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

Founder, Publisher, Editorial board:

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

Подписной индекс в Объединенном Каталоге
«Пресса России» 70663

© ФГУП Государственный НИИ гражданской авиации, 2021

Редакционная коллегия

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

Члены редакционной коллегии

С.С. Билидеров, д-р техн. наук, доцент (*Национальный военный университет, Велико Тырново, Болгария*)

Е.С. Вайцехович, канд. техн. наук (*ОАО «Минский завод гражданской авиации № 407», Минск, Беларусь*)

В.И. Горбаченко, почетный работник высшего профессионального образования РФ, д-р техн. наук, профессор (*ПГУ, Пенза, Российская Федерация*)

М.С. Громов, лауреат Премии Правительства РФ в области науки и техники, канд. техн. наук (*ФГУП ГосНИИ ГА, Москва, Российская Федерация*)

С.В. Далецкий, заслуженный работник транспорта РФ, д-р техн. наук, профессор (*ФГУП ГосНИИ ГА, Москва, Российская Федерация*)

А.Я. Книвель, канд. техн. наук (*ФАО «Авиарегистр России», Москва, Российская Федерация*)

В.Б. Козловский, д-р техн. наук, профессор (*АО «НПК «ПАНХ», Краснодар, Российская Федерация*)

Е.А. Куклев, заслуженный работник высшей школы, д-р техн. наук, профессор (*СПбГУ ГА, Санкт-Петербург, Российская Федерация*)

Е.Е. Нечаев, заслуженный работник транспорта, д-р техн. наук, профессор (*МГТУ ГА, Москва, Российская Федерация*)

Г. Попов, д-р техн. наук, профессор (*Научно-технический союз машиностроителей Болгарии «Industry-4.0», София, Болгария*)

Н. Радулов, д-р техн. наук, профессор (*Новый Болгарский Университет, София, Болгария*)

Н.А. Сиденко, д-р техн. наук (*Рижский технический университет, Рига, Латвия*)

В.А. Соколов, заслуженный работник высшей школы РФ, д-р физ.-мат. наук, профессор, (*Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Ярославль, Российская Федерация*)

О.Ю. Страдомский, заслуженный работник транспорта РФ, канд. техн. наук (*ФГУП ГосНИИ ГА, Москва, Российская Федерация*)

Р.С. Фадеев, канд. техн. наук (*Ассоциация «Транспортная безопасность», Москва, Российская Федерация*)

Фам Вьет Зунг, канд. техн. наук (*Министерство транспорта Вьетнама, Ханой, Вьетнам*)

О.Г. Феоктистова, д-р техн. наук, доцент (*МГТУ ГА, Москва, Российская Федерация*)

тел./факс: 8 (495) 956 49 63 (*1018)

e-mail: science@gosniiga.ru

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

Editorial Board

- Chief editor** – Maksimenko A.V., Cand. Sci. (Soc.), GosNII GA, Moscow, Russian Federation
- Deputy chief editor** – Bogoyavlenskiy A.A., Dr. Sci. (Eng.), GosNII GA, Moscow, Russian Federation
- Responsible secretary** – Diogenov S.V., Cand. Sci. (Mil.), GosNII GA, Moscow, Russian Federation

The members of the Editorial Board

- Biliderov S.S., Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, The National Military University, Veliko Tarnovo, Bulgaria
- Vaitsehovich E.S., Cand. Sci. (Eng.), Minsk Plant of Civil Aviation No. 407, Minsk, Belarus
- Gorbachenko V.I., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Penza State University, Penza, Russian Federation
- Gromov M.S., Cand. Sci. (Eng.), GosNII GA, Moscow, Russian Federation
- Daletskiy S.V., Dr. Sci. (Eng.), Professor, GosNII GA, Moscow, Russian Federation
- Dung Pham Viet, Cand. Sci. (Eng.), Department of Air Navigation of the Ministry of Transport of Vietnam, Hanoi, Vietnam
- Knivel A.Ya., Cand. Sci. (Eng.), Aviation register of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation
- Kozlovskiy V.B., Dr. Sci. (Eng.), Professor, PANH Helicopters, Krasnodar, Russian Federation
- Kuklev E.A., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Saint-Petersburg State University CA, Saint-Petersburg, Russian Federation
- Nechaev E.E., Dr. Sci. (Eng.), Professor, MSTU CA, Moscow, Russian Federation
- Popov G., Dr. Sci. (Eng.), Professor, Scientific and Technical Union of Mechanical Engineers of Bulgaria «Industry-4.0», Sofia, Bulgaria
- Radulov N., Dr. Sci. (Eng.), Professor, New Bulgarian University, Sofia, Bulgaria
- Sidenko N.A., Dr. Sci. (Eng.), Riga Technical University, Riga, Latvia
- Sokolov V.A., Dr. Phys.-Mat. (Eng.), Professor, P.G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl, Russian Federation
- Stradomskiy O.Yu., Cand. Sci. (Eng.), GosNII GA, Moscow, Russian Federation
- Fadeev R.S., Cand. Sci. (Eng.), Transport Safety Association, Moscow, Russian Federation
- Feoktistova O.G., Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, MSTU CA, Moscow, Russian Federation

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

e-mail: science@gosniiga.ru

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

Federal State Unitary Enterprise The State Scientific Research Institute of Civil Aviation
Legal and postal address: Mikhalkovskaya Street, 67, building 1, 125438 Moscow, Russian Federation

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК ГОСУДАРСТВЕННОГО НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ИНСТИТУТА ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

№ 36

2021

СОДЕРЖАНИЕ

Аэронавигация и эксплуатация воздушного транспорта

Разиньков Ф.Ф. Анализ эксплуатационных повреждений, вызванных усталостью материала под действием виброакустических нагрузок, шпангоутов хвостовых балок вертолетов типа Ми-8.....	9
Мусин С.М., Калий В.А., Щупаков А.С., Храмов Н.Б. Идентификация функциональной опасности встречного включения генераторов системы электроснабжения переменного тока.....	20
Кулаков М.В. Исследование технологии взаимодействия органов обслуживания воздушного движения.....	29
Дегтярев В.С. Проблематика оценки имитации акселерационных эффектов полнопилотажными авиационными тренажерами.....	39
Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б., Михайлин Д.А., Румакина А.В. Оценка практической эффективности обслуживания потока заявок в стандартных и экстренных ситуациях при помощи генетического алгоритма.....	48
Вавилов Д.С., Евдокименков В.Н., Кан А.В., Кропова В.В., Топоров Н.Б., Шапкин В.С. Новый подход к реализации принципов функционального проектирования.....	60
Демин С.С., Вдовин В.А., Афанасьева О.А., Калачанов В.В. Моделирование процессов маневрирования ресурсами инструментального хозяйства на предприятиях авиастроительной отрасли.....	70

Техногенная безопасность транспортных систем (на воздушном транспорте)

Фейгенбаум Ю.М., Божевалов Д.Г., Метелкин Е.С., Соколов Ю.С., Диогенов С.В. Вероятностная модель случайных эксплуатационных повреждений конструкции самолетов местных воздушных линий.....	82
---	----

Рухлинский В.М., Хаустов А.А., Вдовенко Р.А., Диогенов С.В. О моделировании процессов поставщика авиационных услуг для оценки рисков в области безопасности полетов.....	97
Громов М.С., Низев В.Я., Костенко А.В., Смирнов А.В., Степанов В.Н. Влияние пакета ремонтных накладок на напряженное состояние панели крыла пассажирского самолета.....	110
Картышев М.О. Применение мер сбалансированного подхода ИКАО к управлению авиационным шумом при обосновании и контроле размеров шумовой зоны приаэродромной территории.....	118
Попов Ю.В., Диогенов Е.С. Анализ данных об авиационных происшествиях.....	130

SCIENTIFIC BULLETIN OF THE STATE SCIENTIFIC RESEARCH INSTITUTE OF CIVIL AVIATION

No. 36

2021

CONTENTS

Air navigation and operation of aircraft

Razinkov F.F. Operational damage analysis, caused by fatigue of the material under the action of vibroacoustic loads, frames tail beams of Mi-8 helicopters.....	9
Musin S.M., Kaliy V.A., Shcupakov A.S., Khramov N.B. Identification of the functional hazard of interconnecting the generators of the AC power supply system.....	20
Kulakov M.V. Research of technology of interaction between the air traffic controllers.....	29
Degtyarev V.S. Problematics of evaluating the simulation of acceleration effects by full-flight aviation simulators.....	39
Lebedev G.N., Malygin V.B., Mikhailin D.A., Roumakina A.V. Assessing the practical effectiveness of servicing the flow of applications in standard and emergency situations using genetic algorithm.....	48
Vavilov D.S., Evdokimenkov V.N., Kan A.V., Kropova V.V., Toporov N.B., Shapkin V.S. A new approach to implementation of the idea of functional design principles.....	60
Demin S.S., Vdovin V.A., Afanasieva O.A., Kalachanov V.V. Simulating maneuvering processes resources for tool management aircraft industry enterprises.....	70

***Technogenic safety of transport systems
(on air transport)***

Feygenbaum Yu.M., Bozhevalov D.G., Metelkin E.S., Sokolov Yu.S., Diogenov S.V. A probabilistic model of the impact damages of local airlines aircraft in operation.....	82
Rukhlinskiy V.M., Khaustov A.A., Vdovenko R.A., Diogenov S.V. About aviation service provider process modeling for safety risk assessment.....	97
Gromov M.S., Nizev V.Ya., Kostenko A.V., Smirnov A.V., Stepanov V.N. The influence of a package of repair linings on the condition of the panel of a passenger aircraft.....	110

Kartyshev M.O. Application of ICAO balanced approach measures to aircraft noise management in justification and control of the size of the noise zone of the aerodrome territory.....	118
Popov Yu.V., Diogenov E.S. Analysis of data on aviation incidents.....	130

УДК 629.735.015.4:629.735.45

АНАЛИЗ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ, ВЫЗВАННЫХ УСТАЛОСТЬЮ МАТЕРИАЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ НАГРУЗОК, ШПАНГОУТОВ ХВОСТОВЫХ БАЛОК ВЕРТОЛЕТОВ ТИПА МИ-8

Ф.Ф. РАЗИНЬКОВ

*Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации,
г. Москва, Российская Федерация*

Аннотация. В работе приведены основные результаты анализа усталостных повреждений шпангоутов хвостовых балок (ХБ) вертолетов типа Ми-8. Показано, что после устранения условий образования усталостных трещин в стыковых (с центральной частью фюзеляжа и концевой балкой) шпангоутах № 1 ХБ и № 17 ХБ, разрушение которых может повлечь за собой создание аварийной или катастрофической ситуации, наиболее часто повреждения усталостного характера выявляются в шпангоутах, сопряженных с внешними агрегатами или элементами конструкции вертолета. Такими являются шпангоуты № 2 ХБ в зоне крепления к нему обтекателя антенны АШС-1, шпангоуты № 13 ХБ, № 14 ХБ и усиливающая диафрагма между ними в зоне установки стабилизатора. По результатам проведенного анализа для повышения долговечности шпангоутов хвостовых балок рекомендовано доработать шпангоут № 2 ХБ в зоне крепления обтекателя антенны АШС-1, а также провести дополнительное усиление шпангоута № 13 ХБ и диафрагмы между шпангоутами № 13ХБ–14 ХБ в зоне крепления пяты под болты регулировочных скоб стабилизатора по правому борту. Анализ распределения суммарного количества усталостных повреждений шпангоутов по наработке с начала эксплуатации позволил выявить интервалы наработок, при которых во всех элементах поперечного каркаса хвостовых балок наблюдается изменение интенсивности образования усталостных трещин.

Ключевые слова: вертолет Ми-8, хвостовая балка, шпангоут, стрингер, диафрагма, усталостное повреждение, трещина

OPERATIONAL DAMAGE ANALYSIS, CAUSED BY FATIGUE OF THE MATERIAL UNDER THE ACTION OF VIBROACOUSTIC LOADS, FRAMES TAIL BEAMS OF MI-8 HELICOPTERS

F.F. RAZINKOV

The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper presents the main results of the analysis of fatigue failures of the frames of the tail beams of Mi-8 helicopters. It is shown that after eliminating the conditions for the formation of fatigue cracks in the butt (with the central part of the fuselage and the end beam) frames No. 1 and 17, the destruction of which can lead to the creation of an emergency or catastrophic situation, the most often fatigue-related damage is detected in the frames associated with external units or structural elements of the helicopter. These are frames No. 2 in the area of attachment of the antenna fairing to it, frames No. 13, 14 and a reinforcing diaphragm between them in the area of installation of the

stabilizer. According to the results of the analysis, in order to increase the durability of the frames of the tail beams, it is recommended to modify the frame No. 2 in the area of attachment of the antenna fairing, as well as to carry out additional reinforcement of the frame No. 13 and the diaphragm between the frames No. 13-14 in the area of fixing the heel under the bolts of the stabilizer adjustment brackets on the starboard side. Analysis of the distribution of the total number of fatigue failures of frames by operating time since the beginning of operation allowed us to identify the intervals of operating time at which a change in the intensity of fatigue crack formation is observed in all elements of the transverse frame of the tail beams.

Keywords: Mi-8 helicopter, tail beam, frame, stringer, diaphragm, fatigue damage, crack

Введение

Критическим местом по усталостной прочности и долговечности фюзеляжа вертолетов Ми-8 всех типов и модификаций Разработчиком признан участок между шпангоутами № 3-4 концевой балки (КБ) [1]. В связи с этим основное внимание в работах, посвященных сохранению летной годности и безопасности полетов вертолетов типа Ми-8, уделяется повреждаемости элементов конструкции концевых балок [2–6].

Вместе с тем, сравнительный анализ повреждаемости основных элементов конструкции концевой и хвостовой балок свидетельствует, что количество выявленных повреждений усталостного характера (трещин), обусловленных виброакустическим нагружением, в элементах конструкции хвостовых балок сопоставимо с количеством выявленных аналогичных повреждений концевых балок.

В данной статье *термин «повреждение»* используется применительно к усталостным трещинам, выявленным в объектах исследования после завершения этапа циклического накопления повреждений усталостного характера на стадии инкубационного периода исчерпания долговечности.

Так, в шпангоутах 186 концевых балок, характеризующихся наибольшей повреждаемостью среди всех элементов конструкции КБ вертолетов типа Ми-8, в настоящее время зарегистрировано 250 усталостных трещин. В то же время в полках и стенках шпангоутов 164 хвостовых балок вертолетов этого же типа выявлено 215 трещин [7].

Учитывая сравнительно часто практикуемую при эксплуатации вертолетов типа Ми-8 замену концевых балок при выявлении значительных повреждений, в том числе усталостного характера, элементов их конструкции, представляется важным оценить повреждаемость элементов конструкции хвостовых балок, замена которых в эксплуатации проводится сравнительно редко.

Цель исследования

Целью исследования является анализ усталостной долговечности шпангоутов под действием виброакустических нагрузок хвостовых балок вертолетов типа Ми-8.

Объект исследования

Объектом исследования являются шпангоуты хвостовых балок вертолетов типа Ми-8.

Краткая характеристика объекта исследования

Поперечный каркас хвостовой балки вертолетов типа Ми-8, имеющей форму усеченного конуса, состоит из семнадцати шпангоутов Z-образного сечения, два из которых – № 1 ХБ и

№ 17 ХБ являются стыковочными, и усиливающей диафрагмы, установленной между шпангоутами № 13 ХБ и № 14 ХБ.

На начальном этапе эксплуатации по мере увеличения наработки парка вертолетов типа Ми-8 проявился серьезный дефект – разрушение стыковочных болтов соединения стыковых шпангоутов № 23 центральной части фюзеляжа (ЦЧФ) и № 1 ХБ [8]. Помимо этого, в стенках (фланцах) стыковых шпангоутов выявлялись трещины усталостного характера, развивающиеся от отверстий под стыковочные болты.

Вследствие этого Разработчиком был проведен ряд доработок конструкции стыковых шпангоутов ЦЧФ и ХБ, заключающихся в замене материала шпангоутов на сплав АК6, в изменении конфигурации, толщины стенок (фланцев) шпангоутов и количества отверстий под соединяющие шпангоуты болты. Увеличен был и диаметр стыковочных болтов. В настоящее время на вертолетах Ми-8 всех типов и модификаций толщина фланцев стыковых шпангоутов № 23 ЦЧФ и № 1 ХБ увеличена с первоначальных 5,5 мм до 10 мм, стыковые шпангоуты имеют по 52 отверстия вместо 28 в исходной конструкции, по которым они соединяются при помощи 28 болтов диаметром 12 мм и 24 болтов диаметром 10 мм. Под болты диаметра 12 мм и их гайки устанавливаются сферические шайбы.

После катастрофы 18.09.1979 вертолета Ми-8 № 22478 (зав. № 0538), произошедшей при наработке 8134 часа с начала эксплуатации (СНЭ) вследствие образования и развития усталостной трещины от отверстия диаметром 12 мм под стыковочные болты в шпангоуте № 1 концевой балки, была также доработана конструкция стыка КБ и ХБ. С этой целью был изменен материал стыковых шпангоутов на сплав АК6, толщина полок стыковых шпангоутов № 17 ХБ и № 1 КБ была увеличена с 5,5 мм до 8 мм [8].

В результате введенных конструктивных изменений за время наблюдений с 1999 года не зарегистрировано ни одной трещины усталостного характера в стыковых шпангоутах и в стыковочных болтах, соединяющих ЦЧФ с ХБ и ХБ с КБ.

Помимо этого, в первые годы эксплуатации вертолетов типа Ми-8 в гражданской авиации (с 1967 года) трещины выявлялись в зоне установки стабилизатора в шпангоутах № 13 ХБ и № 14 ХБ [9].

Для устранения данного дефекта промышленностью были разработаны бюллетени № 276-ДК «Усиление шпангоута № 14 хвостовой балки» и № М742-ДК «По вопросу: Усиление 13 шпангоута хвостовой балки» (введены для вертолетов гражданской авиации 15.10.1973 и 25.09.1979 соответственно).

В настоящее время на всех вертолетах типа Ми-8, зарегистрированных в Государственном реестре гражданских воздушных судов Российской Федерации, в хвостовых балках установлены шпангоуты № 13 ХБ и № 14 ХБ, изготовленные с учетом доработок, введенных указанными бюллетенями промышленности.

По состоянию на 01.06.2021 в гражданской авиации Российской Федерации в эксплуатации находилось 443 вертолета типа Ми-8, изготовленных Казанским вертолетным заводом (КВЗ) и Улан-Удэнским авиационным заводом (У-УАЗ).

Конструктивно хвостовые балки КВЗ и У-УАЗ одинаковы, однако изготовлены по различным технологиям. Хвостовые балки, изготовленные Казанским вертолетным заводом, полностью клепаной конструкции. В хвостовых балках Улан-Удэнского авиационного завода применено клеесварное соединение стрингеров с обшивкой в правой, левой и нижней панелях. Соединения остальных элементов конструкции хвостовых балок (перестыковка стрингеров, соединение панелей между собой и со шпангоутами, в том числе со стыковыми, крепление кронштейнов, люков и т.п.) на обоих вариантах выполнены клепкой, вследствие чего напряженно-деформированное состояние балок в местах, определяющих их усталостную долговечность, практически одинаково [10].

Вследствие этого в настоящей работе статистический анализ повреждаемости шпангоутов проведен для всех хвостовых балок вертолетов типа Ми-8 без разделения по технологии изготовления.

Объект исследования

Распределение эксплуатационных повреждений, вызванных усталостью материала под действием виброакустических нагрузок, в шпангоутах (диафрагмах) и их накладках по длине хвостовой балки вертолетов типа Ми-8, приведено на рис. 1.

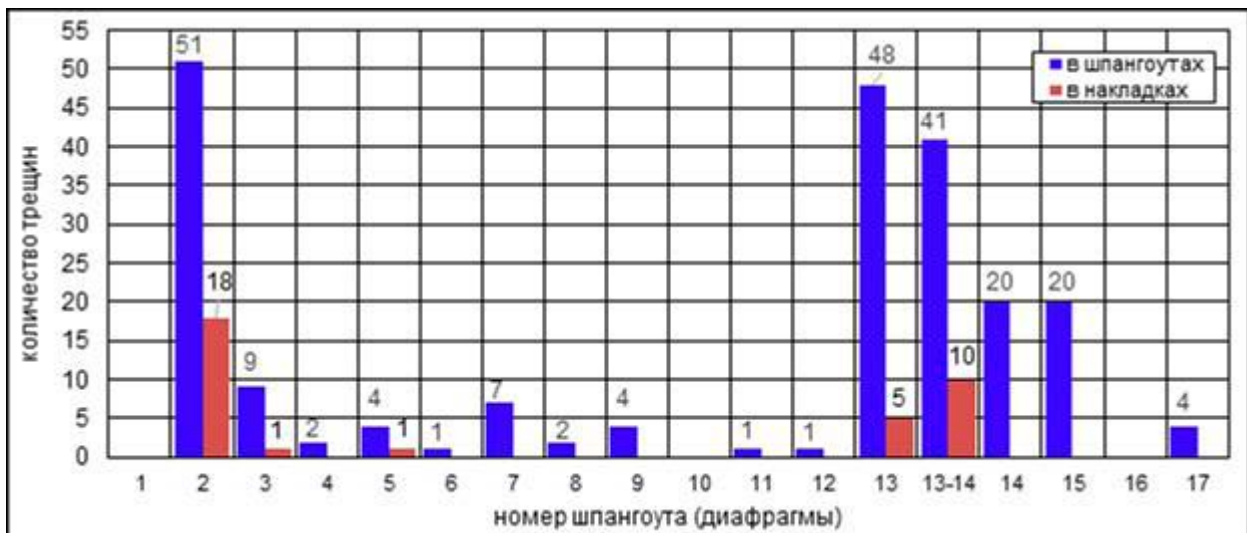


Рис. 1. Гистограмма распределения суммарного количества трещин в шпангоутах (диафрагмах) и их накладках в продольном направлении хвостовой балки

Наибольшее количество трещин усталостного характера, приходящееся на один шпангоут, выявлено в шпангоуте № 2 ХБ, между стрингерами № 1-2, по правому борту которого крепится обтекатель антенны типа АШС-1. До 1984 года антенны типа АШС-1 устанавливались не на хвостовой балке, а на хвостовом отсеке ЦЧФ вертолетов, в связи с чем шпангоут № 2 ХБ изготавливался неусиленным. Бюллетенями № М1218-ДМ для вертолетов изготовления КВЗ и № М1490-БУ (введен для гражданской авиации 27.09.1984) для вертолетов изготовления У-УАЗ наряду с заменой радиостанции Р-860 на радиостанцию «Баклан-20» было изменено и положение антенны АШС-1 с обтекателем. Несмотря на это шпангоут № 2 ХБ до настоящего времени не усилен.

Наибольшее количество усталостных трещин зарегистрировано в зоне, включающей в себя шпангоуты № 13 ХБ, 14 ХБ и диафрагму между этими шпангоутами, которая является зоной установки стабилизатора вертолета. К шпангоуту № 13 ХБ между стрингерами № 6-7 с правого и левого бортов приклепаны пяты под болты регулировочных скоб стабилизатора, а на шпангоуте № 14 ХБ установлены кронштейны навески стабилизатора.

Достаточно большое количество трещин выявлено также в полках и стенках шпангоута № 15 ХБ, в зоне которого располагаются подкосы хвостовой опоры, которая, в свою очередь, крепится к шпангоуту № 17 ХБ.

За анализируемое время наблюдений (с 1999 года) в элементах конструкции хвостовых балок не было выявлено ни одной трещины усталостного характера в стыковом (с центральной частью фюзеляжа) шпангоуте № 1 ХБ и в шпангоутах № 10 ХБ и № 16 ХБ.

Распределение суммарного количества трещин, выявленных в шпангоутах (диафрагмах) и их накладках хвостовых балок по правому и левому бортам относительно вертикальной оси симметрии, приведено на рис. 2.

Большинство трещин усталостного характера выявлено в шпангоутах (диафрагмах) по правому борту хвостовых балок. Так, из 250 выявленных к настоящему времени трещин в элементах поперечного каркаса ХБ (и их накладках) на правый борт приходится 160, на левый – 70 трещин, положение 20 трещин в ремонтной документации не указано.

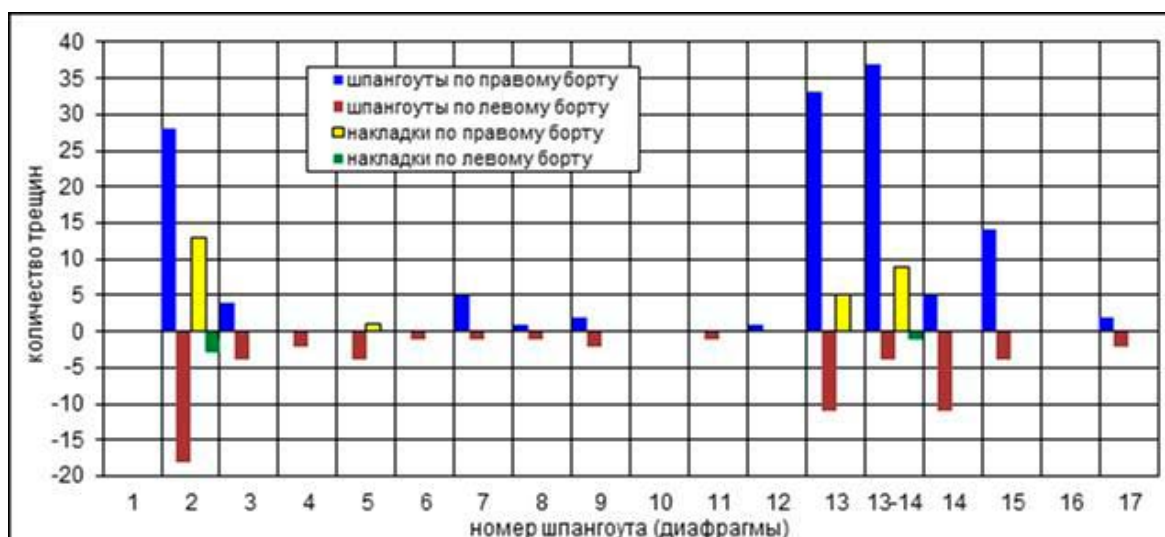


Рис. 2. Гистограмма распределения в продольном направлении хвостовой балки суммарного количества трещин в шпангоутах (диафрагмах) и их накладках по правому и левому бортам

Распределение количества трещин в окружном направлении, выявленных отдельно в шпангоутах (диафрагмах) и их накладках, приведено на гистограмме рис. 3, распределение суммарного количества трещин – на лепестковой гистограмме рис. 4.

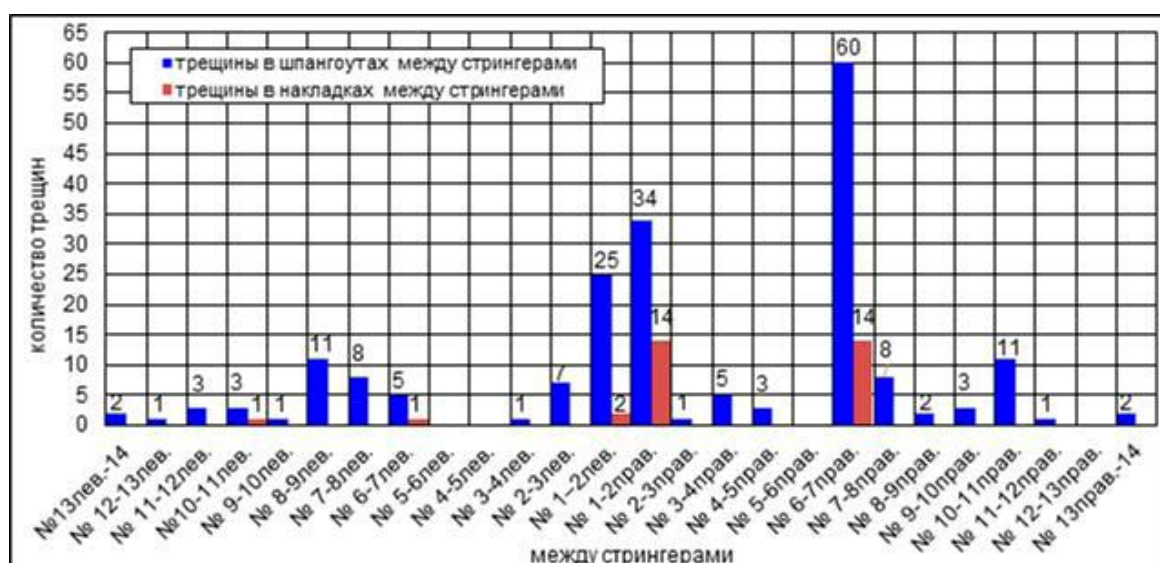


Рис. 3. Гистограмма распределения в окружном направлении суммарного количества трещин в шпангоутах (диафрагмах) и их накладках между стрингерами хвостовых балок

Наибольшее количество трещин выявлено в верхней части шпангоутов хвостовых балок между стрингерами № 2 по правому и левому бортам (75 трещин), а также в зонах шпангоутов по правому борту между стрингерами № 6-7 (74 трещины). Проведенный анализ показал, что значительная часть выявленных трещин в верхней части шпангоутов между стрингерами № 2 по левому и правому бортам приходится на шпангоуты № 2 ХБ и № 3 ХБ, а между стрингерами № 6-7 по правому борту – на шпангоут № 13 ХБ и диафрагму между шпангоутами № 13-14 ХБ.

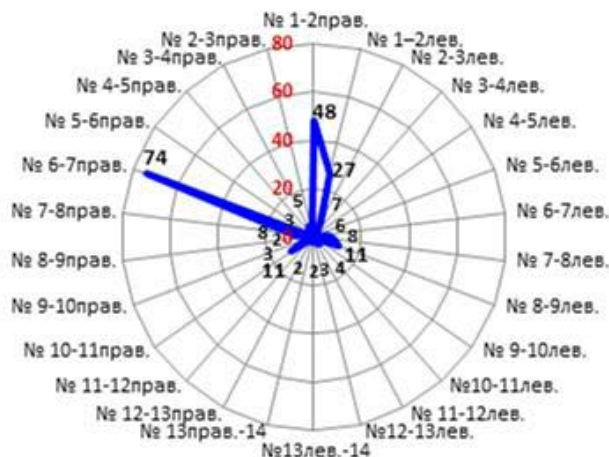


Рис. 4. Лепестковая гистограмма распределения в окружном направлении суммарного количества трещин в шпангоутах (диафрагмах) и их накладках между стрингерами хвостовых балок

По 11 трещин выявлено также в зонах между стрингерами № 8-9 по левому борту (из них 6 – в шпангоуте № 14 ХБ) и между стрингерами № 10-11 по правому борту (10 из которых – в шпангоуте № 15 ХБ). В большинстве остальных зон трещины в шпангоутах, в основном, носят единичный характер. В зонах шпангоутов между стрингерами № 4-6 по левому борту и стрингерами № 5-6 и № 12-13 по правому борту за все время наблюдений не зарегистрировано ни одной трещины.

Анализ распределения эксплуатационных повреждений, вызванных усталостью материала шпангоутов, по наработке с начала эксплуатации

Распределение общего количества трещин в шпангоутах (диафрагмах) и их накладках хвостовых балок по наработке с начала эксплуатации приведено на рис. 5.

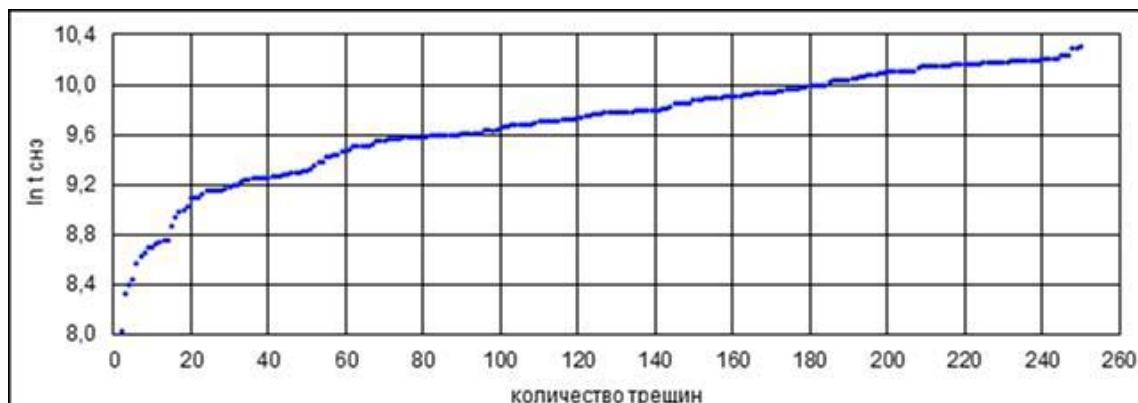


Рис. 5. Точечная гистограмма распределения суммарного количества трещин в шпангоутах (диафрагмах) и их накладках хвостовых балок по наработке СНЭ

На отдельных участках приведенная гистограмма имеет явно выраженный «ступенчатый» характер, который свидетельствует о резком изменении интенсивности образования трещин в шпангоутах. Связано такое изменение может быть, как и в ранее рассмотренном случае изменения интенсивности образования трещин в элементах конструкции концевых балок [2, 3], с изменением напряженного состояния одного из элементов конструкции планера вертолета.

Распределение среднего суммарного количества трещин, выявленных в шпангоутах (диафрагмах) и их накладках, приходящегося на единичную хвостовую балку из числа балок с трещинами, по интервалам наработки СНЭ приведено на рис. 6.

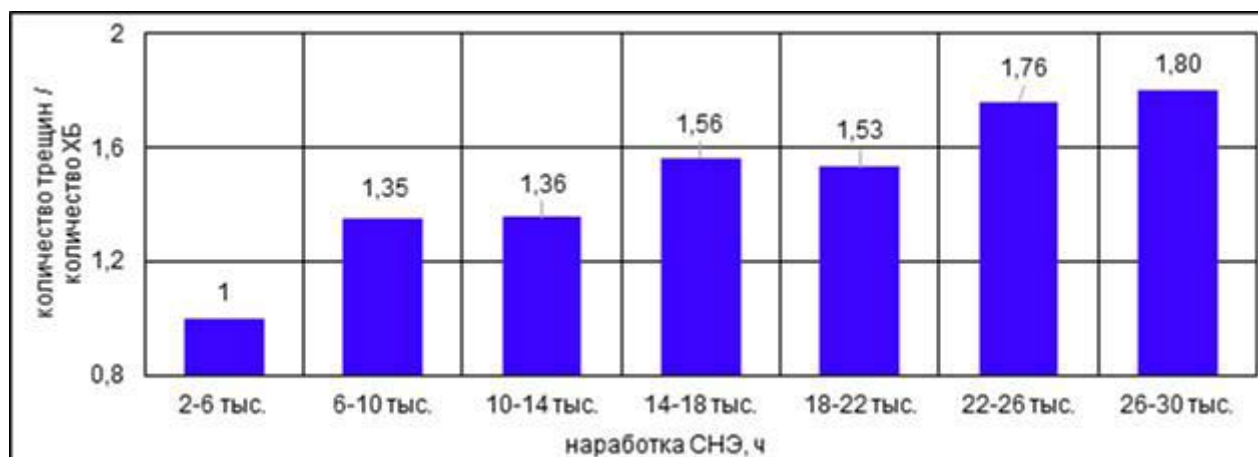


Рис. 6. Гистограмма распределения среднего суммарного количества трещин в шпангоутах (диафрагмах) единичной хвостовой балки по интервалам наработки СНЭ

До наработки СНЭ, равной 6 тыс. часов, в шпангоутах единичной хвостовой балки выявлялось не более одной трещины. По мере увеличения наработки СНЭ происходило и увеличение среднего количества трещин в шпангоутах, достигая при наработках в интервале 26–30 тыс. часов величины 1,8 трещин на одну хвостовую балку.

Проведенный анализ показал, что, начиная с наработки СНЭ 6 тыс. часов, трещины усталостного характера могут выявляться одновременно в нескольких шпангоутах единичной хвостовой балки. Так, например, при наработке СНЭ, равной 9399 часов, трещины одновременно были выявлены в шпангоутах № 2 ХБ, № 15 ХБ и в диафрагме между шпангоутами № 13–14 хвостовой балки вертолета Ми-8Т RA-24152.

Таким образом, начиная с наработки СНЭ, равной 6 тыс. часов, усталостные повреждения единичных хвостовых балок вертолетов типа Ми-8 по признаку выявления трещин в двух и более шпангоутах могут характеризоваться как многоэлементные [11].

Распределение по наработке СНЭ суммарного количества трещин в шпангоутах (и их накладках) № 2ХБ, 13 ХБ, 14 ХБ и в диафрагме между шпангоутами № 13-14 ХБ, в которых выявлено наибольшее их количество, приведено на рис. 7.

По мере увеличения наработки СНЭ в первую очередь выявляются трещины в шпангоутах № 2 ХБ, затем – в шпангоутах № 13 ХБ и в диафрагмах между шпангоутами № 13-14 ХБ, и лишь затем – трещины в шпангоутах № 14 ХБ. После достижения вертолетами наработок СНЭ 18-20 тыс. часов трещины в диафрагмах между шпангоутами № 13-14 ХБ и шпангоутах № 13 ХБ выявляются практически одновременно.

Так же, как и точечная гистограмма распределения суммарного количества трещин в шпангоутах, отдельные точечные гистограммы распределения трещин по наработке СНЭ в каждом из рассматриваемых шпангоутов (диафрагм) при определенных наработках имеют

достаточно явно выраженный «ступенчатый» характер. «Ступеньки», указывающие на изменение интенсивности образования трещин, наиболее характерно проявляются в интервалах наработок 8–9 тыс. часов и 13–14 тыс. часов СНЭ для всех рассматриваемых элементов поперечного силового набора хвостовых балок.

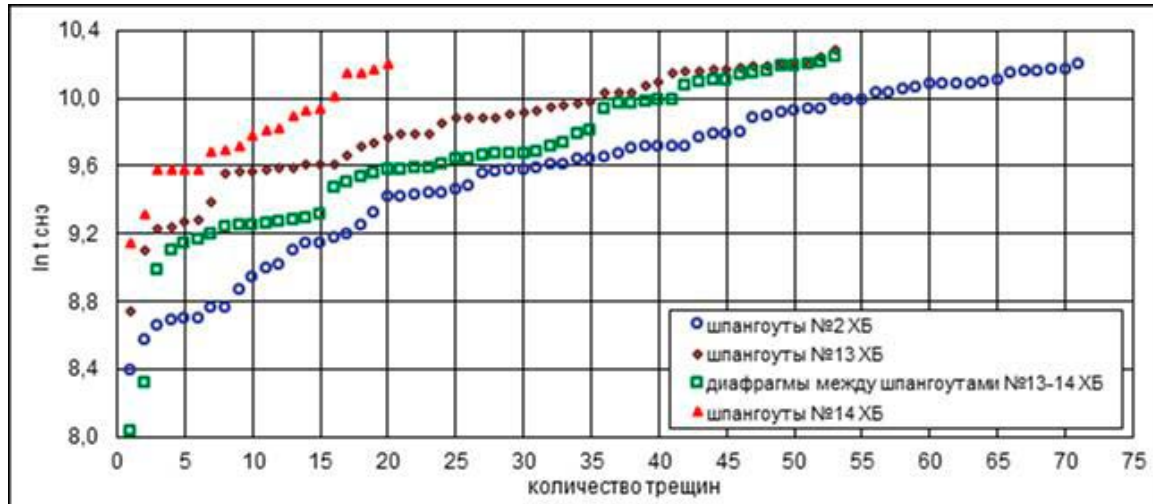


Рис. 7. Точечные гистограммы распределения суммарного количества трещин в шпангоутах № 2 ХБ, 13 ХБ, 14 ХБ и в диафрагме между шпангоутами № 13-14 ХБ по наработке СНЭ

Распределение среднего суммарного количества трещин, выявленных в единичных шпангоутах (и в их накладках), а также в диафрагмах хвостовых балок, по интервалам наработки СНЭ приведено на рис. 8.

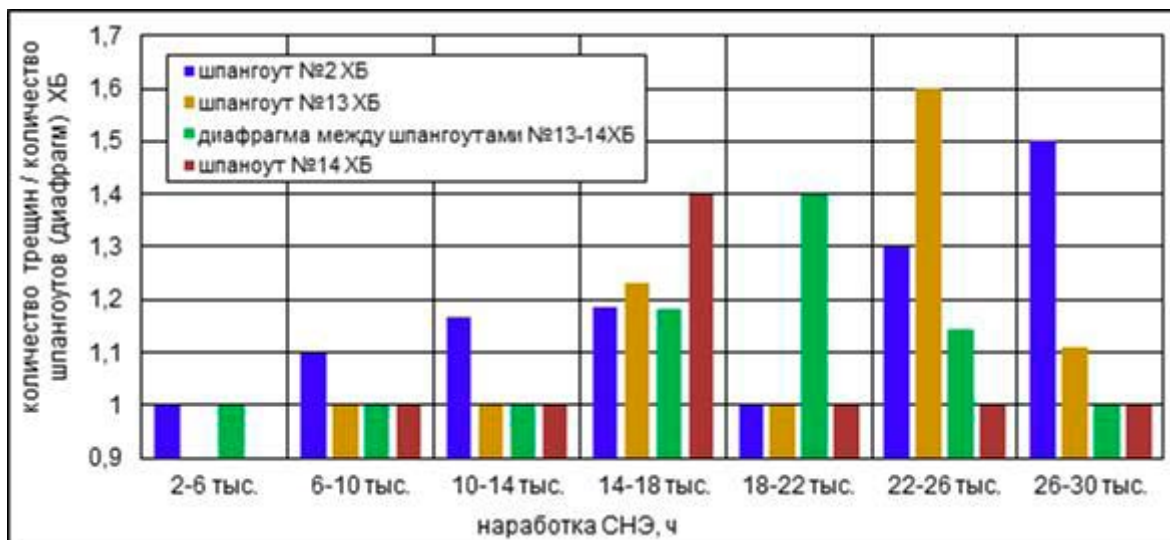


Рис. 8. Гистограммы распределения среднего суммарного количества трещин в единичных шпангоутах (диафрагмах) хвостовых балок по интервалам наработки СНЭ

В интервале наработок СНЭ в пределах 2–6 тыс. часов единичные трещины выявлялись либо в шпангоутах № 2 ХБ, либо в диафрагмах между шпангоутами № 13–14 ХБ. Начиная с наработки СНЭ, равной 6 тыс. часов, трещины выявлялись во всех рассматриваемых шпангоутах

(диафрагмах), при этом количество трещин, выявляемых в шпангоутах № 13 ХБ, № 14 ХБ и диафрагмах между этими шпангоутами, не превышало одной.

При наработках СНЭ, превышающих 14 тыс. часов, среди всех рассматриваемых шпангоутов (диафрагм) имелись такие, в которых количество выявленных трещин было две и более.

Образование двух и более трещин в одном шпангоуте обусловлено конструктивными особенностями шпангоутов хвостовых балок вертолетов типа Ми-8, которые заключаются в следующем. Прилегающие к обшивке полки шпангоутов изготовлены с прорезями для проходящих через них стрингеров. Трещины образуются, в основном, по краю выреза шпангоута под стрингер и развиваются в сторону соседнего с ним выреза либо через заклепки крепления шпангоута к обшивке, либо минуя их. Следовательно, трещины, развивающиеся в различных секторах шпангоутов, разделенных прорезями для стрингеров, или даже в одном секторе навстречу друг другу, можно рассматривать как трещины, развивающиеся в отдельных зонах единичного элемента конструкции (шпангоута или диафрагмы) ХБ.

Таким образом, усталостные повреждения отдельных единичных шпангоутов № 2 ХБ, начиная с наработки СНЭ 6 тыс. часов, а также отдельных единичных шпангоутов № 13 ХБ, № 14 ХБ и диафрагм между ними, начиная с наработки СНЭ 14 тыс. часов, можно характеризовать как повреждения в различных зонах единичного элемента конструкции ХБ.

Выводы

По результатам проведенного исследования установлено следующее.

1. Доработки стыковых шпангоутов № 1 ХБ и № 17 ХБ, заключающиеся в замене материала шпангоутов на сплав АК6, увеличении толщины их стенок (фланцев), а для шпангоута № 1 ХБ дополнительно в увеличении количества отверстий под стыковочные болты и установке сферических шайб под стыковочные болты и их гайки в зоне растяжения позволили полностью устранить условия образования усталостных трещин в стыковых шпангоутах, развивающихся от отверстий под стыковочные болты.

Доработки шпангоутов в зоне установки стабилизатора оказались менее эффективными, до настоящего времени наибольшее количество трещин среди шпангоутов хвостовых балок, наряду со шпангоутами № 2 ХБ, выявляется в шпангоутах № 13 ХБ и № 14 ХБ, а также в диафрагмах, установленных между ними.

2. Большое количество трещин, выявляемых в шпангоуте № 2 ХБ, связано, наиболее вероятно, с изменением напряженного состояния шпангоута после крепления в верхней его части обтекателя антенны АШС-1 радиостанции «Баклан-20». Доработки, направленные на устранение условий образования усталостных трещин в шпангоуте № 2 ХБ вследствие изменения его напряженного состояния, до настоящего времени не проводились.

3. При наработках СНЭ в пределах 6 тыс. часов в единичных шпангоутах № 2 или в диафрагмах между шпангоутами № 13 ХБ и № 14 ХБ выявляются единичные трещины усталостного характера.

При наработках СНЭ более 6 тыс. часов усталостные повреждения хвостовых балок по признаку выявления трещин в двух и более шпангоутах могут характеризоваться как многоэлементные.

При наработках СНЭ более 6 тыс. часов усталостные повреждения шпангоутов № 2 ХБ, а при наработках более 14 тыс. часов шпангоутов № 13 ХБ, № 14 ХБ и диафрагм между ними могут характеризоваться как повреждения в различных зонах единичного элемента конструкции ХБ.

Таким образом, шпангоуты хвостовых балок вертолетов типа Ми-8 характеризуются наибольшей усталостной повреждаемостью вследствие действия виброакустических нагрузок в зонах, сопряженных с внешними агрегатами или элементами конструкции вертолета.

Для уменьшения количества усталостных повреждений в этих зонах необходимо доработать шпангоут № 2 ХБ по месту крепления обтекателя антенны АШС-1, а также

провести дополнительное усиление шпангоута № 13 ХБ и диафрагмы между шпангоутами № 13 ХБ–14 ХБ в зоне крепления пяты под болты регулировочных скоб стабилизатора по правому борту.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ усталостной прочности, живучести и эксплуатационной нагруженности критического по условиям живучести места конструкции фюзеляжей вертолетов семейства Ми-8 (концевая балка по правому борту в районе третьего шпангоута). М.: ОАО «МВЗ им. М.Л. Миля», 19.03.2001. 45 с.
2. Разиньков Ф.Ф., Акопян К.Э. Анализ эффективности доработок, направленных на предотвращение усталостных повреждений элементов конструкции концевых балок вертолетов типа Ми-8 // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2020. № 33. С. 39–49.
3. Разиньков Ф.Ф., Акопян К.Э. Анализ влияния доработок по эксплуатационным бюллетеням на повреждаемость элементов конструкции концевых балок вертолетов типа Ми-8 // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2021. № 35. С. 28–38.
4. Акопян К.Э., Разиньков Ф.Ф., Трофимов Г.М. Проблемы усталостной долговечности конструкции фюзеляжа вертолетов Ми-8 // Прочность конструкций летательных аппаратов. Труды ЦАГИ. 2017. Выпуск 2764. С. 295–297.
5. Потапенко Ю.А., Трофимов Г.М., Разиньков Ф.Ф. Уточнение периодичности осмотра шпангоута № 2 концевой балки вертолета типа Ми-8 // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2016. № 15. С. 92–98.
6. Разиньков Ф.Ф., Трофимов Г.М. Обзор усталостной повреждаемости элементов конструкции концевой балки по результатам оценки технического состояния вертолетов типа Ми-8 // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2016. № 16. С. 89–98.
7. Сбор и систематизация эксплуатационных данных о повреждениях вертолетных конструкций, обусловленных виброакустическим воздействием. Часть 1. Вертолеты типа Ми-8, Ми-8МТВ-1, Ми-8АМТ // Научно-технический отчет о научно-исследовательской работе, шифр «Конверт-2021», № гос. регистрации № 132/203-ПЛГ-2020. ФГУП ГосНИИ ГА, 2020. 290 с.
8. Обобщение опыта летной и технической эксплуатации и ремонта вертолетов Ми-8 за 1982 год (Заключительный) // Отчет № 402/15-Ми-8/33 о научно-исследовательской работе. ГосНИИ ГА, 1983. 82 с.
9. Справка о дефектах по каркасу хвостовой части фюзеляжа, хвостовой и концевой балкам вертолета Ми-8, встретившихся в эксплуатации (по состоянию на конец 1974 г.) // п/я В-2323, 17.12.1974.
10. Заключение № Ф-8МТ-99 по назначенному ресурсу 7000 часов фюзеляжей вертолетов типа Ми-8МТ (по условиям усталостной прочности силовой конструкции фюзеляжа). М.: ОАО «МВЗ им. М.Л. Миля», 25.04.1999. 7 с.
11. Рекомендательный циркуляр РЦ-АП25.571-1А «Оценка допустимости повреждений и усталостной прочности конструкции». ФГУП «ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского», 2015. 107 с.

REFERENCES

1. Analysis of fatigue strength, survivability and operational load of the critical survivability site of the fuselage structure of Mi-8 helicopters (the end beam on the starboard side in the area of the third frame). Moscow. MVZ im. M.L. Milya Publ., 19.03.2001, 45 p. (In Russian)
2. Razinkov F.F., Akopyan K.E. Analysis of the effectiveness of improvements aimed at preventing fatigue damage to the structural elements of the end beams of Mi-8 helicopters. *Nauchnyj vestnik GosNII GA = Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2020, no. 33, pp. 39–49. (In Russian).
3. Razinkov F.F., Akopyan K.E. Analysis of the impact of improvements on operational bulletins on the damage to the structural elements of the end beams of Mi-8 helicopters. *Nauchnyj vestnik GosNII GA = Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2021, no. 35, pp. 28–38. (In Russian).

4. Akopyan K.E., Razinkov F.F., Trofimov G.M. Problems of fatigue durability of the fuselage structure of Mi-8 helicopters. *Prochnost` konstruksij letatel`nykh apparatov. Trudy TSAGI = Strength of aircraft structures. Works of CAHI*, 2017, issue 2764, pp. 295–297. (In Russian).
5. Potapenko Yu.A., Trofimov G.M., Razinkov F.F. Clarification of the frequency of inspection of the frame number 2 of the end beam of the Mi-8 helicopter. *Nauchnyj vestnik GosNII GA = Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2016, no. 15, pp. 92–98. (In Russian).
6. Razinkov F.F., Trofimov G.M. Review of fatigue damage of the end beam structural elements based on the results of the evaluation of the technical condition of Mi-8 helicopters. *Nauchnyj vestnik GosNII GA = Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2016, no. 16, pp. 89–98. (In Russian).
7. Collection and systematization of operational data on damage to helicopter structures caused by vibroacoustic impact. Part 1. Mi-8 helicopters, Mi-8MTV-1, Mi-8AMT. Scientific and technical report on research work, code «Envelope-2021», State registration No. 132/203-PLG-2020. FSUE GosNII GA, 2020, 290 p. (In Russian).
8. Generalization of the experience of flight and technical operation and repair of Mi-8 helicopters for 1982 (Final) / Report No. 402/15-Mi-8/33 on research work. GosNII GA, 1983, 82 p. (In Russian).
9. Certificate of defect on the frame rear fuselage, and the tail end beams of the Mi-8 helicopter encountered in operation (as of end 1974). P/I-2323, 17.12.1974. (In Russian).
10. Conclusion No. F-8 M-99 on the assigned resource of 7000 hours of fuselages of Mi-8MT helicopters (according to the conditions of fatigue strength of the power structure of the fuselage). Moscow. MVZ im. M.L. Milya Publ., 25.04.1999, 7 p. (In Russian).
11. Recommendation circular RC-AP25. 571-1A «Assessment of the admissibility of damage and fatigue strength of the structure». TSAGI named after prof. N. E. Zhukovsky, 2015, 107 p. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Разиньков Федор Федорович, кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника отдела, ФГУП Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, ул. Михалковская, д. 67, корпус 1, Москва, Российская Федерация, 125438; e-mail: razinkov_ff@ncplg.ru.

ABOUT THE AUTHOR

Razinkov Fedor F., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy Head of Department, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Mikhalkovskaya Street, 67, building 1, 125438 Moscow, Russian Federation; e-mail: razinkov_ff@ncplg.ru.

УДК 629.7.064.5

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ОПАСНОСТИ ВСТРЕЧНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

С.М. МУСИН¹, В.А. КАЛИЙ², А.С. ЩУПАКОВ², Н.Б. ХРАМОВ²

¹Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации,
г. Москва, Российская Федерация

²Обособленное конструкторское бюро Уфимского агрегатно-производственного объединения,
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. В данной статье приведена оценка функциональной опасности встречного включения генераторов переменного тока системы электроснабжения переменного тока постоянной частоты воздушного судна типа SSJ. Встречное включение генераторов трехфазного переменного тока характеризуется как глухое (металлическое) короткое замыкание, которое вызывает электрическую дугу с током в дуге более 500 А. Как правило, шина электрического питания бортового оборудования уходит в отказное состояние с полной потерей электропитания подключенного к ней бортового оборудования. Причиной отказного состояния шины, где произошло встречное включение генераторов переменного тока, является практически мгновенное сгорание контактного соединения проводов и коммутационного аппарата вследствие мощной электрической дуги. Встречное включение генераторов переменного тока возможно вследствие механического повреждения контактной системы коммутационного аппарата типа короткого замыкания всех его контактов или поступления на управляющую обмотку ложного управляющего сигнала на подключение второго генератора при работе на шине первого генератора. В зависимости от иерархического уровня шины, на которой произошло встречное включение генераторов переменного тока, возникшая особая ситуация может квалифицироваться от усложненной до катастрофической ситуаций. Оценка функциональной опасности встречного включения генераторов переменного тока системы электроснабжения переменного тока позволяет определить отказобезопасность системы электроснабжения и периодичность, объем и содержание ее технического обслуживания.

Ключевые слова: авиационная безопасность, отказобезопасность системы электроснабжения, система электроснабжения переменного тока, канал генерирования переменного тока, функциональная опасность, оценка функциональной опасности

IDENTIFICATION OF THE FUNCTIONAL HAZARD OF INTERCONNECTING THE GENERATORS OF THE AC POWER SUPPLY SYSTEM

S.M. MUSIN¹, V.A. KALIY², A.S. SHCUPAKOV³, N.B. KHRAMOV³

¹The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russian Federation

²Separate Design Bureau of the Ufa Aggregate Production Association, Moscow, Russian Federation

Abstract. This article provides an assessment of the functional hazard of the opposite switching on of alternators of the AC power supply system of a constant frequency of an aircraft of the SSJ type. The opposite switching on of three-phase alternators is characterized as a dead (metallic) short circuit, which causes an electric arc with a current in the arc of more than 500 A. As a rule, the on-board equipment power bus goes into a failure state with a complete loss of power supply to the on-board equipment connected to it. The reason for the bus

failure state, where the alternating current generators were switched on oppositely, is the almost instantaneous combustion of the contact connection of the wires and the switching device due to a powerful electric arc. Opposite switching on of alternators is possible due to mechanical damage to the contact system of a switching device such as a short circuit of all its contacts or a false control signal arriving at the control winding to connect the second generator when operating on the bus of the first generator. Depending on the hierarchical level of the bus, on which the alternating current generators were switched back on, a special situation that has arisen can be classified from complicated to catastrophic situations. Assessment of the functional hazard of the opposite connection of alternators of the AC power supply system allows determining the fail safety of the power supply system and the frequency, volume and content of its maintenance.

Keywords: aviation safety, fail safety of the power supply system, AC power supply system, AC generation channel, functional hazard, functional hazard assessment

Введение

На воздушных судах установлены системы электроснабжения переменного тока, которые имеют не менее двух каналов генерирования трехфазного переменного тока номинального напряжения 115/200 В постоянной номинальной частоты 400 Гц или переменной частоты в пределах 360-800 Гц [1].

На современных воздушных судах не существует режима параллельной работы генераторов переменного тока. Переключение шин питания по переменному току происходит либо с синхронизацией по времени перехода напряжения фазы через ноль, либо произвольным образом в данный момент времени [2, 3].

При включении генераторов переменного тока на одну шину при несоблюдении условий синхронизации величины напряжения переменного тока, частоты переменного тока и фазы напряжения переменного тока, т.е. встречное включение, происходит короткое замыкание фаз типа глухое (металлическое) короткое замыкание [4].

Так, 7 сентября 2010 года произошел серьезный авиационный инцидент в Ижме. На воздушном судне Ту-154М борт RA-85684 (выпуска сентябрь 1990 г.) отказала система электроснабжения переменного тока с дальнейшим развитием отказа в виде «теплового разгона» аккумуляторных батарей. Воздушное судно осуществило аварийную посадку на вертолетную площадку Аэропорт Ижма [5].

Первопричиной отказа системы электроснабжения по переменному току явилось встречное включение двух генераторов переменного тока вследствие разрушения привода переключающих контактов линейного коммутационного аппарата.

Одной из составляющей общей оценки отказобезопасности воздушного судна является оценка функциональной опасности встречного включения генераторов переменного тока, величина которой зависит от надежности коммутационных устройств, управляющей аппаратуры и встроенного программного обеспечения [4–8].

Постановка задачи

Функциональная опасность встречного включения источников электроэнергии переменного тока постоянной частоты L_GEN, R_GEN, APU_GEN и EXT_GEN системы электроснабжения самолета RRJ-NEW-100 (рис. 1) определяется на шинах L_AC и R_AC:

- по цепи контакторов K_AC_LTIE, K_AC_MTIE, K_AC_RTIE (механический отказ на замыкание контактов, ложный внешний электрический сигнал на замыкание);
- по цепи контакторов K_L_AC_ESS, K_R_AC_ESS (механический отказ на замыкание, ложный внешний электрический сигнал на замыкание) [9, 10, 11];
- по сигналам БКУШ-115 (ложный электрический сигнал, структурная схема на рис. 2).

модуле аппаратных защит (рис. 2). При этом суммарная вероятность возникновения встречного включения не превышает $0,224 \cdot 10^{-6}$.

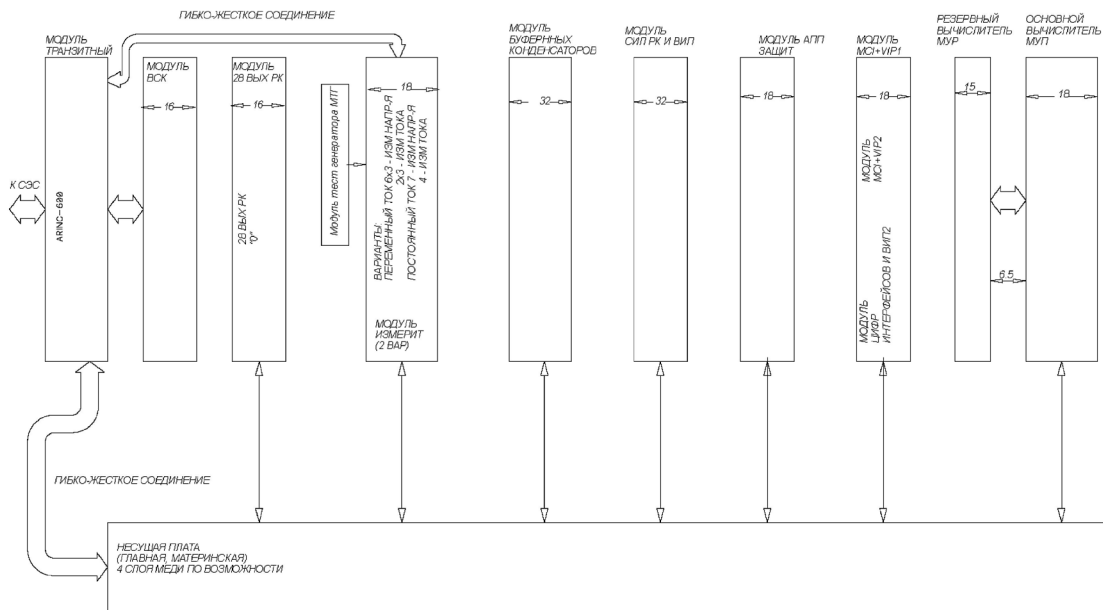


Рис. 2. Структурная схема блока БКУШ-115 системы электроснабжения самолета RRJ-NEW-100

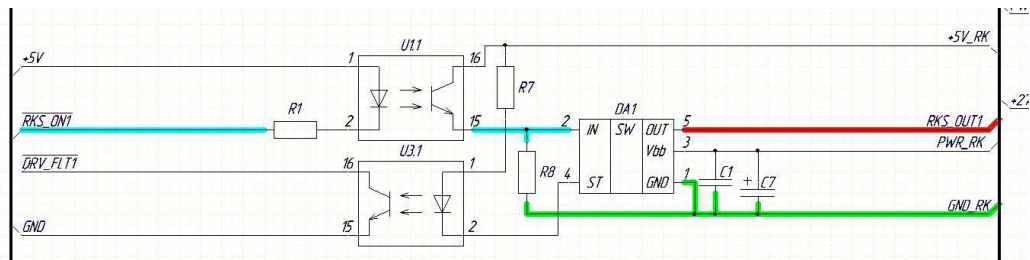


Рис. 3. Цепь включения контактора объединения

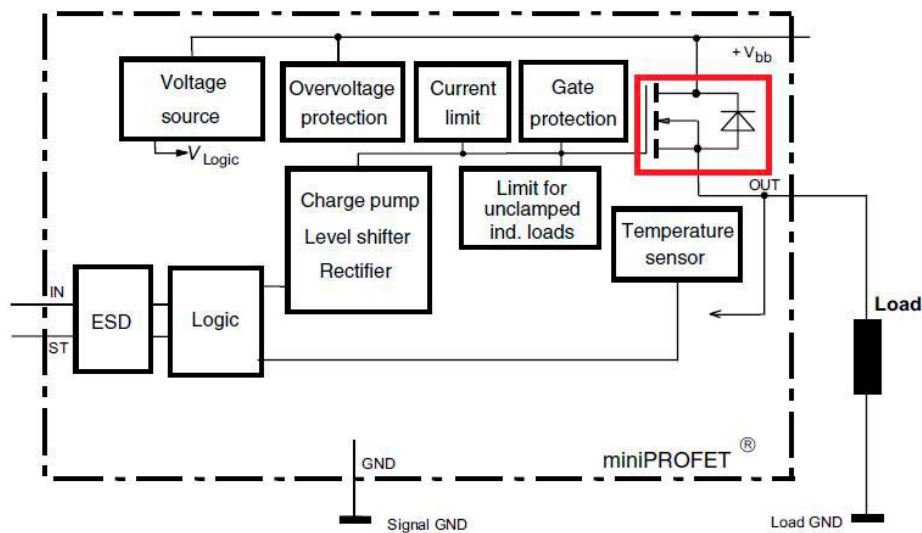


Рис. 4. Блок-схема драйвера DA1

Исключение непреднамеренного срабатывания контактора объединения осуществляет БКУШ по следующему алгоритму: логический сигнал включения контактора объединения вырабатывается модулем управления вычислителем МУП (рис. 2) под кодовым именем «/RKS_ON1» с активным уровнем «0». Сигнал «/RKS_ON1» поступает на автономный модуль аппаратных защит «Модуль АПП Защит», выполненный на управляющих ключах. Данный узел запрещает прохождение сигнала «/RKS_ON1», шунтируя его шину на питание +5В, по наступлению любого из следующих событий:

1. Неисправность БКУШ (ВИП).
2. Неисправность модуля МА3.
3. Событие КЗ на фидере.
4. Перекос на фидере больше уставки.
5. Обрыв фидера.

В отсутствии отказных событий сигнал «/RKS_ON1» поступает на драйвер силовых РК, через развязывающий оптрон U1.1 на электронный ключ DA1 (рис. 3). Силовой ключ DA1 в свою очередь вырабатывает разовую команду «RKS_OUT1», которая подается через транзитный модуль 28 Вых. РК на выход БКУШ. Параллельно разовая команда подается на модуль встроенного контроля ВСК, где проверяется аппаратными средствами адекватность его состояний.

Таким образом, разовая команда объединения «RKS_OUT1» контролируется и дублируется модулями МУП и МУР независимо, блокируется модулем МА3 и контролируется на выходе модулем МВСК.

Оценка вероятности функциональной опасности встречного включения

При отказе только БКУШ-115 (одного или двух блоков) в полете исключается возможность объединения бортов и объединение выходов источников при отказах коммутационных аппаратов в замкнутом состоянии.

Необходимо отметить, что при отказах БКУШ-115 автоматически снимаются управляющие сигналы всех коммутационных аппаратов, т.е. замкнутые контакты размыкаются (приходят в исходное состояние при отсутствии управляющего сигнала). Далее размыкаются контакты коммутационных аппаратов объединения бортов, отключается шина переменного тока питания приемников электроэнергии (потребителей) 3-й категории. Разовые команды, разрешающие замыкание линейных коммутационных аппаратов источников электроэнергии переменного тока, переводятся в пассивное состояние (обрыв). Если к основным шинам переменного тока подключены вспомогательные источники (генератор вспомогательной силовой установки (ВСУ) или наземный источник электроэнергии), то они отключаются.

Вероятность функциональной опасности встречного включения источников электроэнергии переменного тока постоянной частоты при архитектуре системы электроснабжения, указанной на рис. 1, исходя из дерева отказов (рис. 5), составляет $Q_{ФОВВ} = 3,60 \cdot 10^{-14}$ на час полета, что значительно ниже заданной вероятности возникновения катастрофической ситуации, которая составляет $Q_{КС} = 1,0 \cdot 10^{-9}$ на час полета [6, 7].

Примененные в системе электроснабжения воздушного судна типа RRJ коммутационные аппараты имеют назначенный ресурс 5000 циклов (включений) в условиях воздействия внешних факторов для авиации, что соответствует примерно 10,5 лет эксплуатации при среднем годовом налете не более 14 000 часов. В указанных условиях коммутационные аппараты должны проходить контроль с измерением величин напряжения и токов срабатывания и отпускания, величины падения напряжения на контактах, времени срабатывания при подаче номинального сигнала управления на десятом году эксплуатации, либо необходимо иметь информацию о количестве срабатываний, выработке ресурса, и при достижении количества срабатываний 4500, провести указанный контроль с прогнозированием дальнейшего их технического состояния.

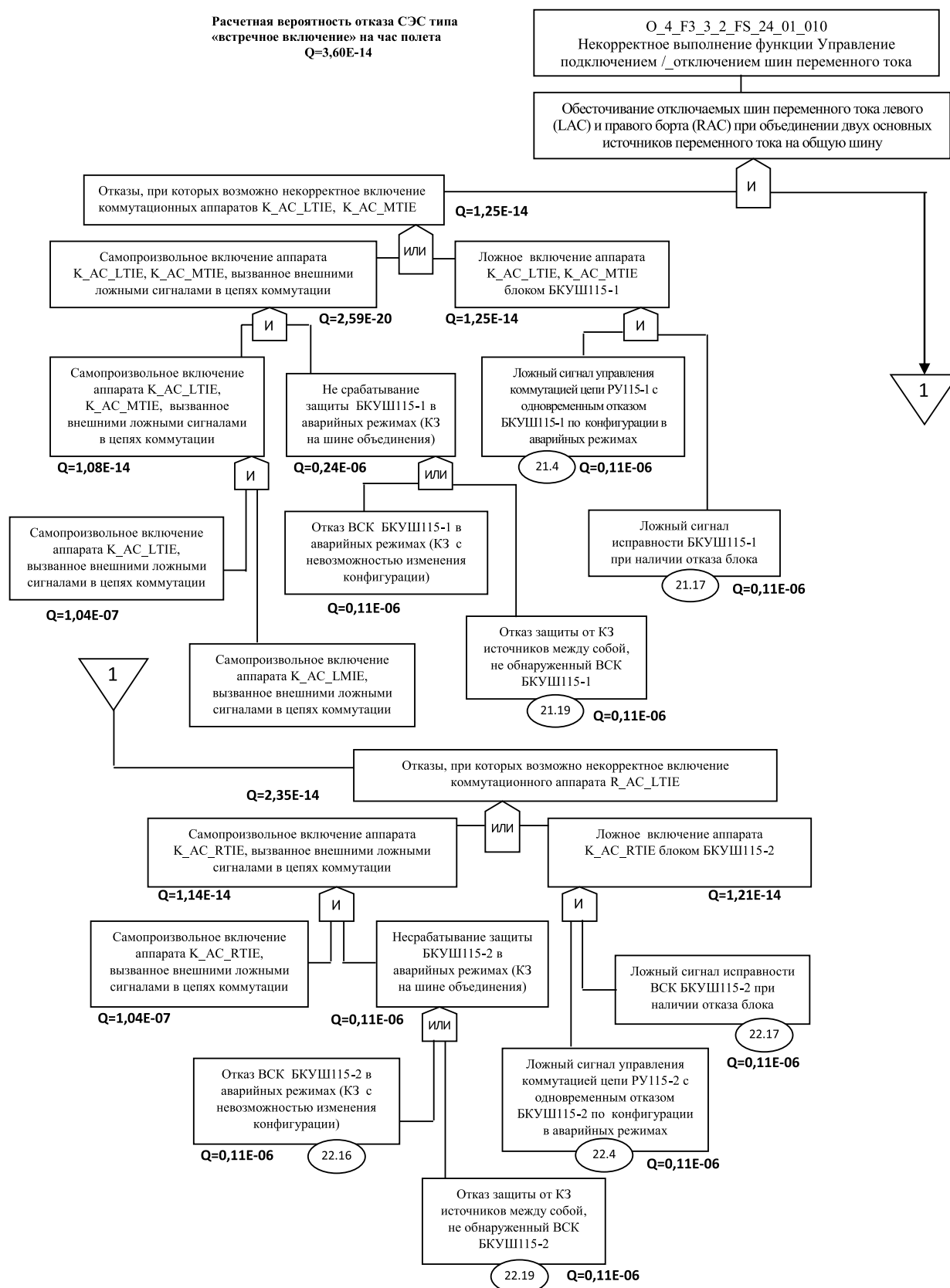


Рис. 5. Дерево отказов, приводящих к функциональной опасности встречного включения источников электроэнергии переменного тока постоянной частоты

Выводы

1. На основании величины оценки вероятности функциональной опасности встречного включения равной $Q_{\text{ФОВВ}} = 3,60 \cdot 10^{-14}$ имеем практически невероятное событие по классификации Авиационных правил АП-25.

2. Коммутационные аппараты системы распределения электроэнергии необходимо подвергать контролю их технического состояния с измерением величин напряжения и токов срабатывания и отпускания, величин падения напряжения на контактах, времени срабатывания при подаче номинального сигнала управления на десятом году эксплуатации, либо необходимо иметь информацию о количестве срабатываний, выработке ресурса, и при достижении количества срабатываний 4500, провести указанный контроль с прогнозированием дальнейшего их технического состояния.

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ Р 54073—2017. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. М.: Стандартиформ, 2018. 33 с.
2. Елисов Л.Н., Филиппов В.Л., Овченков Н.И., Мусин С.М. К вопросу о теории авиационной безопасности // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2019. № 27. С. 109–119.
3. Системы электроснабжения летательных аппаратов: Учебник для слушателей ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина /С.П. Халютин, М.Л. Тюлев, Б.В. Жмуров, С.М. Мусин [и др.]. М.: ВУНЦ ВВС, 2010. 428 с.
4. Левин А.В., Мусин С.М., Харитонов С.А [и др.] Электрический самолет. Концепция и технологии. Уфа: УГАТУ, 2014. 388 с.
5. Мусин С.М., Хлебников А.С. Идентификация короткого замыкания в нагрузке системы генерирования вида переменная скорость – постоянная частота // Авиационная промышленность. 2016. № 3. С. 4–8.
6. Авиационные правила. Часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. МАК. М.: ОАО «АВИАИЗДАТ», 2014. 268 с.
7. Руководство Р-4761 по методам оценки безопасности систем бортового оборудования воздушных судов гражданской авиации. М.: ОАО «АВИАИЗДАТ», 2011. 264 с.
8. Селиванова З.М., Хоан Т.А. Оценка надежности информационно-измерительной системы теплофизических свойств материалов при воздействии дестабилизирующих факторов // Надежность и качество сложных систем, 2016. №4(16). С. 13–19.
9. Мусин С.М., Калий В.А. Электромагнитная совместимость системы электроснабжения самолета Ил-114-300 // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2018. № 24. С. 34–39.
10. Мусин С.М., Калий В.А., Щупаков А.С. Эксплуатационная технологичность авиационных систем распределения электроэнергии // Научный вестник ГосНИИ ГА, 2021. №34(345). С. 25–38.
11. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. М. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 560 с.
12. Александровская Л.Н., Афанасьев А.П., Лисов А.А. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем. М.: Логос, 2001. 208 с.

REFERENCES

1. GOST R 54073–2017. Aircraft and helicopter power supply systems. General requirements and standards for the quality of electricity. Moscow. Standartinform Publ., 2018, 33 p. (In Russian).

2. Elisov L.N., Filippov V.L., Ovchenkov N.I., Musin S.M. On the issue of the theory of aviation security. *Nauchnyj vestnik GosNII GA = Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2019, no. 27, pp. 109–118. (In Russian).

3. *Sistemy ehlektrosnabzheniya letatel'nykh apparatov. Uchebnik dlya slushatelej VVA im.prof. N.E. Zhukovskogo i Yu.A. Gagarina* [Power supply systems for aircraft. The book for students of the VVA named after prof. N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin]. S.P. Khalyutin, M.L. Tyulev, B.V. Zhmurov, S.M. Musin [and others]. Moscow. VUNTS VVS Publ., 2010, 428 p. (In Russian).

4. Levin A.V., Musin S.M., Haritonov C.A [etc.]. *Ehlektricheskij samolet. Kontseptsiya i tekhnologii* [The Electric plane. The concept and technologies]. Ufa. UGATU Publ., 2014, 388 p. (In Russian).

5. Musin S.M., Khlebnikov A.S. Identification of a short circuit in the load of a generating system of the form variable speed – constant frequency. *Aviatsionnaya promyshlennost = Aviation industry*, 2016, no. 3, pp. 4–8. (In Russian).

6. Aviation rules. Part 25. Standards of airworthiness of aircrafts of the transport category. IAC. Moscow. JSC «Aviaizdat», 2014, 268 p. (In Russian).

7. Manual R-4761 on methods of assessing the safety of airborne equipment systems of civil aviation aircraft. Moscow. JSC «Aviaizdat», 2011, 264 p. (In Russian).

8. Selivanova Z.M., Hoan T.A. Assessment of the reliability of the information-measuring system of thermophysical properties of materials under the influence of destabilizing factors. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and Quality of Complex Systems*, 2016, no. 4 (16), pp. 13-19. (In Russian).

9. Musin S.M., Kaliy V.A. Electromagnetic compatibility of system of an electric supply of the plane Silt-114-300. *Nauchnyj vestnik GosNII GA = Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2018, no. 24, pp. 34–39. (In Russian).

10. Musin S.M., Kaliy V.A., Shchupakov A.S. Operational adaptability of aviation power distribution systems. *Nauchnyj vestnik GosNII GA = Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2021, no. 34, pp. 25–38. (In Russian).

11. Pronikov A.S. *Parametricheskaya nadezhnost' mashin* [Parametric reliability of machines]. Moscow. Publishing house of MSTU im. N.E. Bauman Publ., 2002, 560 p. (In Russian).

12. Aleksandrovskaya L.N., Afanasyev A.P., Lisov A.A. *Sovremennye metody obespecheniya bezotkaznosti slozhnykh tekhnicheskikh system* [Modern methods of ensuring the reliability of complex technical systems]. Moscow. Logos Publ., 2001, 208 p. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Мусин Сергей Миргасович, доктор технических наук, профессор, член общества независимых расследователей авиационных происшествий при Международном авиационном комитете, главный специалист, ФГУП Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, ул. Михалковская, д. 67, корпус 1, Москва, Российская Федерация, 125438; e-mail: smusin@tdhc.ru.

Калий Валерий Алексеевич, доктор технических наук, директор Обособленного конструкторского бюро – главный конструктор Уфимского агрегатного производственного объединения, Государственная корпорация «Ростехнология» Российской Федерации, проезд Энтузиастов, 15, корпус 67, Москва, Российская Федерация, 111024, e-mail: vkaliy@tdhc.ru.

Щупаков Алексей Сергеевич, начальник отдела Обособленного конструкторского бюро Уфимского агрегатного производственного объединения, Государственная корпорация «Ростехнология» Российской Федерации, проезд Энтузиастов, 15, корпус 67, Москва, Российская Федерация, 111024; e-mail: Shchupakov@tdhc.ru.

Храмов Николай Борисович, ведущий инженер Обособленного конструкторского бюро Уфимского агрегатного производственного объединения, Государственная корпорация «Ростехнология» Российской Федерации, проезд Энтузиастов, 15, корпус 67, Москва, Российская Федерация, 111024; e-mail: KhramovNBv@tdhc.ru.

ABOUT THE AUTHORS

Musin Sergey M., Doctor of Technical Sciences, Professor, Member of the Society of Independent Investigators of Aircraft Accidents in International Aviation Committee, Chief Specialist, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Mikhalkovskaya Street, 67, building 1, 125438 Moscow, Russian Federation; e-mail: smusin@tdhc.ru.

Kaliy Valery A., Doctor of Technical Sciences, Director of the Separate Design Bureau of the Ufa Aggregate Production Association, the State Corporation «Rustechology» of the Russian Federation, Journey of Enthusiasts, 15, building 67, 111024 Moscow, Russian Federation; e-mail: vkaliy@tdhc.ru.

Shchupakov Alexey S., Chief of Department of the Separate Design Bureau of the Ufa Aggregate Production Association, the State corporation «Rustechology» of the Russian Federation, Journey of Enthusiasts, 15, building 67, 111024 Moscow, Russian Federation; e-mail: Shchupakov@tdhc.ru.

Khramov Nikolay B., Leading Engineer of the Separate Design Bureau of the Ufa Aggregate Production Association, the State corporation «Rustechology» of the Russian Federation, Journey of Enthusiasts, 15, building 67, 111024 Moscow, Russian Federation; e-mail: KhramovNBv@tdhc.ru.

УДК 351.814.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОРГАНОВ ОБСЛУЖИВАНИЯ ВОЗДУШНОГО ДВИЖЕНИЯ

М.В. КУЛАКОВ

*Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Российская Федерация*

Аннотация. В данной статье проанализирована технология взаимодействия органов обслуживания воздушного движения. В рамках анализа были рассмотрены процедуры согласования условий передачи управления воздушным движением между диспетчерами управления воздушным движением. Рассмотрены процесс руления воздушного судна к взлетно-посадочной полосе и процесс взлета воздушного судна. Для отдельно взятых рейсов определены задержки воздушных судов. Построены блок-схемы и сетевые технологические графики взаимодействия органов обслуживания воздушного движения. Непосредственное управление воздушным движением в рамках данной работы осуществляют диспетчеры диспетчерского пункта руления, стартового диспетчерского пункта и диспетчерского пункта круга. Технология взаимодействия органов обслуживания воздушного движения оценивается по эффективности и безопасности полетов. В качестве показателя эффективности в данном исследовании принята величина, равная отношению предполагаемого времени к реальному времени обеспечения движения воздушного судна органами обслуживания воздушного движения. Время движения, заявленное в плане полета, будет различаться в зависимости от аэродрома, взлетно-посадочной полосы, рулежной дорожки, типа воздушного судна и многих других факторов. Поэтому, для определения предполагаемого времени обеспечения движения воздушного судна были использованы статистические данные, показывающие время движения воздушного судна без воздействия внешних факторов. Изучение технологии взаимодействия органов обслуживания воздушного движения производилось в течение 24 месяцев. Массив исследования получен из суточных планов полетов аэропорта Остафьево – номер рейса, тип воздушного судна, время взлета, посадки, входа и выхода в/из сектора ОВД, прохождение воздушным судном различных этапов движения по аэродрому и в полете.

Ключевые слова: обслуживание воздушного движения, воздушное судно, аэродром, пропускная способность, авиаузел, взаимодействие между органами ОВД

RESEARCH OF TECHNOLOGY OF INTERACTION BETWEEN THE AIR TRAFFIC CONTROLLERS

M.V. KULAKOV

Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russian Federation

Abstract. This article analyzes the procedure for the interaction of air traffic controllers. As part of the analysis, procedures were considered for agreeing the terms of the transfer of air traffic control between air traffic controllers. The process of taxiing an aircraft to the runway and the process of aircraft take-off are considered. For individual flights, aircraft delays have been determined. Block diagrams and network technological diagrams of interaction of air traffic controllers units have been built. The air traffic controllers in this work are TAXI, TOWER and RADAR. The technology of interaction of air traffic services units is assessed in terms of flight efficiency and safety. As an indicator of efficiency in this work, a value equal to the ratio of the estimated time to the real time of the provision of aircraft movement by ATC units is taken. The flight times declared in the flight plan will vary depending on the aerodrome, runway, taxiway, aircraft type and many other factors. Therefore,

to determine the estimated time for ensuring the movement of the aircraft, statistical data were used showing the time of movement of the aircraft without the influence of external factors. The work of the processes of interaction of ATCs was carried out within 24 months. The research array was obtained from the daily flight plans of Ostafyevo airport – flight number, type of aircraft, time of take-off, landing, entry and exit to/from the ATC sector, the passage of the aircraft through various stages of movement along the aerodrome and in flight.

Keywords: Air traffic control, aircraft, airfield, capacity, aviation hub, coordination between Air Traffic Controllers

Введение

Технология взаимодействия органов обслуживания воздушного движения (ОВД) при организации воздушного движения (ОрВД) устанавливает порядок организации и осуществления оперативного взаимодействия диспетчеров диспетчерских пунктов (ДП): диспетчерского пункта руления (ДПР), диспетчерского стартового пункта (ДСП), диспетчерского пункта системы посадки (ДПСП), диспетчерского пункта круга (ДПК), диспетчерского пункта подхода (ДПП), районного центра (РЦ), старшего диспетчера смены, руководителя полетов (РП), местного диспетчерского пункта (МДП), вспомогательного стартового диспетчерского пункта (ВСДП) [1, 2, 3].

Материалы и методы

В настоящей работе технология взаимодействия органов ОВД оценивается по эффективности и безопасности полетов ВС.

Эффективность – это связь полученного результата и затраченных ресурсов. В данном исследовании в качестве показателя эффективности принята величина, равная отношению предполагаемого времени к реальному времени обеспечения движения (полета) ВС органами ОВД [4]. Эффективность движения ВС выражается формулой:

$$E = \frac{t_{\text{пред}}}{t_{\text{обесп}}} * 100 \% , \quad (1)$$

где $t_{\text{пред}}$ – время предполагаемого обеспечения движения (полета) ВС;
 $t_{\text{обесп}}$ – фактическое время обеспечения движения ВС (полета).

Эффективность движения ВС наиболее полно отражает задачи по использованию воздушного пространства (ИВП) и соответствует требованиям единой системы организации воздушного движения Российской Федерации.

Максимальная эффективность технологии взаимодействия органов ОВД будет при обеспечении движения ВС согласно поданному плану его полета, т.е. когда $t_{\text{обесп}} = t_{\text{пред}}$.

Аэродром или сектор ОВД исследуется как математическая модель, в которой нам известны время начала – $t_{\text{нач}}$, время окончания обеспечения движения (полета) ВС – $t_{\text{окон}}$ и его продолжительность – $t_{\text{обесп}}$ (рис. 1).



Рис. 1. Модель аэродрома (сектор ОВД)

Время обеспечения движения ВС органами ОВД выражено формулой:

$$t_{\text{обесп}} = t_{\text{окон}} - t_{\text{нач}} , \quad (2)$$

где $t_{\text{обесп}}$ – время взаимодействия органов ОВД в целях обеспечения полета ВС;

$t_{\text{окон}}$ – время окончания обеспечения полета ВС органами ОВД;

$t_{\text{нач}}$ – время начала обеспечения полета ВС органами ОВД.

В общем случае $t_{\text{обесп}}$ можно представить как:

$$t_{\text{обесп}} = t_{\text{пред}} + t_{\text{зад}} , \quad (3)$$

где $t_{\text{зад}}$ – время задержки взлета ВС.

Время движения, заявленное в плане полета, будет различаться в зависимости от аэродрома, ВПП, РД, типа ВС. Поэтому для определения предполагаемого времени обеспечения движения ВС – $t_{\text{пред}}$ были использованы статистические данные, показывающие время движения ВС без воздействия внешних факторов.

Время задержки ВС зависит от многих случайных факторов и выражено формулой:

$$t_{\text{зад}} = \sum_{n=1}^N (x_n) , \quad (4)$$

где x_n – события, оказывающие влияние на время задержки ВС – $t_{\text{зад}}$, такие, как остановка ВС на ПС, смена частоты радиостанции, радиосвязь ЭВС и СДП, ожидание разрешения на взлет от другого сектора ОВД и т.д.

Если отсутствуют факторы, создающие задержку, то тогда время обеспечения движения ВС равно предполагаемому, а показатель эффективности движения ВС равен 100 %:

$$t_{\text{обесп}} = t_{\text{пред}} , \text{ при } x_1; x_2; \dots x_n = 0. \quad (5)$$

Был проведен сбор статистической информации по затраченному времени органами ОВД при организации воздушного движения (ОрВД) ($t_{\text{пред}}$, $t_{\text{обесп}}$, $t_{\text{зад}}$). С помощью собранной информации были определены эффективность взаимодействия органов ОВД Е, и события, создающие задержку (x_n). Выборка исследования составила 2 месяца.

Для отдельно взятых ВС, имеющих максимальную $t_{\text{зад}}$, была применена математическая модель графа, на основе которой были построены таблицы параметров технологических графиков и сетевые технологические графики [5].

Результаты

Рассмотрение технологии взаимодействия органов ОВД при обеспечении вылета ВС необходимо начинать с этапа руления ВС. В зависимости от аэропорта буксировка, запуск двигателей и иногда руление производятся под руководством диспетчера перронного обслуживания (ДПО) или ДПР. Дальнейшее руление всегда происходит под руководством ДПР (рис. 2).

При рулении на предварительный старт (ПС) экипаж воздушного судна (ЭВС), как правило, докладывает о занятии ПС заблаговременно, с целью получить разрешение на дальнейшее руление до полной остановки ВС. Но диспетчер ДПК не имеет право разрешать или запрещать занятие ИС, он должен передать ОВД на СДП. Передача УВД происходит непосредственно на ПС [6–9].

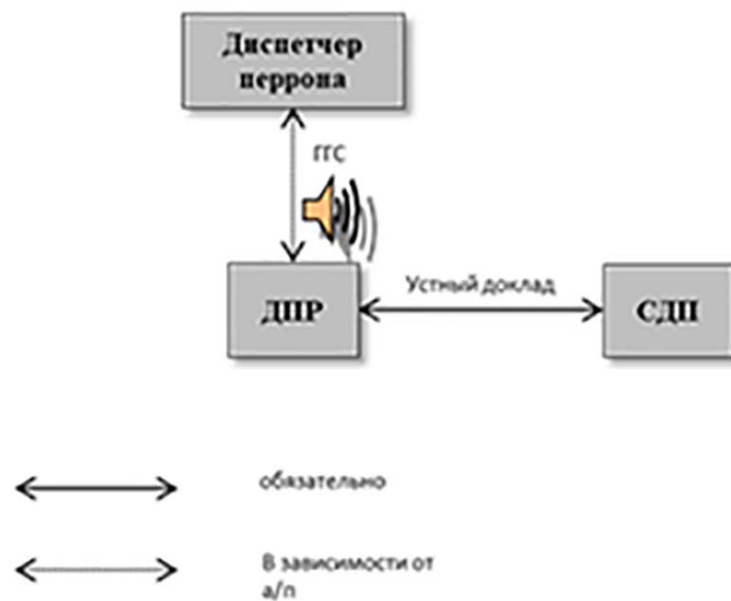


Рис. 2. Схема взаимодействия органов ОВД при рулении ВС перед вылетом

Для оценки эффективности взаимодействия органов ОВД при рулении ВС были произведены хронометрические исследования. Организация рабочих мест (РМ) диспетчеров УВД в зависимости от аэродрома может отличаться [10]. На некоторых аэродромах ДПР и СДП объединены в один пункт диспетчера старта и руления (ПДСР). Рассмотрим на примере аэродрома «Остафьево» процесс руления ВС при такой организации.

Диспетчер УВД ПДСР в одном лице сочетает в себе УВД на этапе запуска, руления и взлета ВС. Нет необходимости переводить ЭВС на частоту работы СДП, согласовывать с диспетчером СДП условия передачи ОВД, а также останавливать ВС на ПС.

Зона ответственности диспетчера УВД ПДСР «Остафьево» позволяет ему разрешить ЭВС занять ИС или выполнять взлет схода сразу после доклада экипажа ВС о готовности, независимо от места нахождения ВС. Алгоритм действий диспетчера ПДСР позволяет исключить затраченное ЭВС время на переключение частоты на радиостанции ВС, лишний радиообмен при переходе на СДП и, самое главное – остановку ВС (рис. 3).

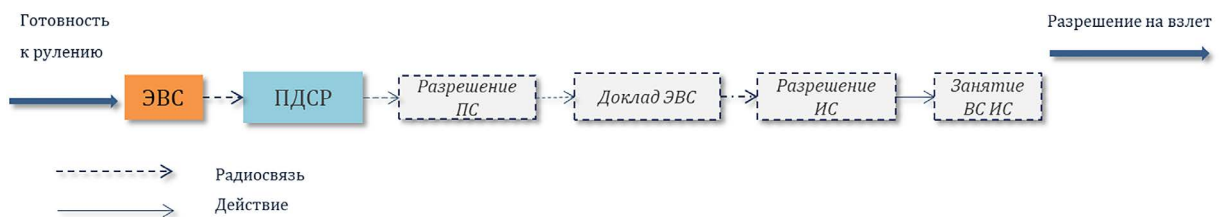


Рис. 3. Алгоритм действий ПДСР при рулении ВС

Для ВС F7X были построены таблица параметров технологического графика (табл. 1) и сетевой график (рис. 4). Исследовались 2 различные работы по эффективности ПДСР. Данные получены в реальных условиях.

Таблица 1

Таблица параметров технологического графика работы диспетчера ПДСР
при рулении ВС F7X

п/п	Наименование работы	Событие		Продолжительность, мин., с
		начало	конец	
1	Руление на ПС	0	1	2 мин.
2	Руление на ИС	1	2	1 мин.

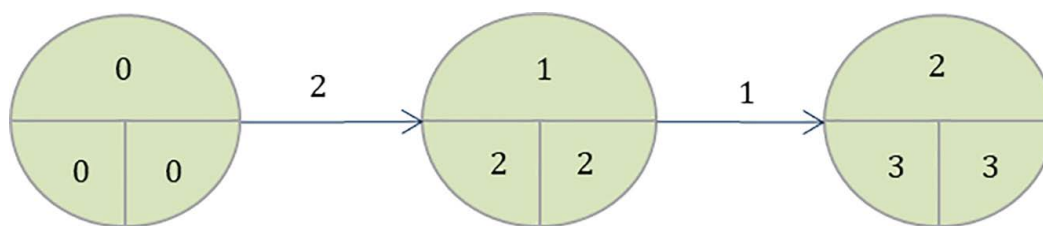


Рис. 4. Сетевой технологический график работы диспетчера ПДСР при рулении ВС F7X

Время обеспечения руления ВС F7X органами ОВД равно (2):

$$t_{\text{обесп}} = t_{\text{окон}} - t_{\text{нач}} = 3 \text{ мин.}$$

А предполагаемое (планируемое) время движения ВС равно:

$$t_{\text{пред}} = t_{\text{обесп}} - t_{\text{зад}} = 3 \text{ мин.} \quad (6)$$

Время задержки ВС F7X определяется по формуле (4):

$$t_{\text{зад}} = \sum_1^n (x_1; x_2; x_3; x_n) = 0 \text{ с,}$$

где x_n – события, оказывающие влияние на время задержки ВС.

Эффективность работы диспетчера УВД ПДСР «Остафьево» (1):

$$E = \frac{t_{\text{пред}}}{t_{\text{обесп}}} * 100 \% = 100 \% .$$

В зависимости от аэродрома или авиаузла схема взаимодействия органов ОВД может отличаться. Процесс согласования условий передачи ОВД зависит от принадлежности секторов ОВД различным центрам ОрВД [11–13]. На рис. 5 представлена одна из возможных схем взаимодействия органов ОВД двух смежных центров ОрВД одного аэроузла при вылете ВС.

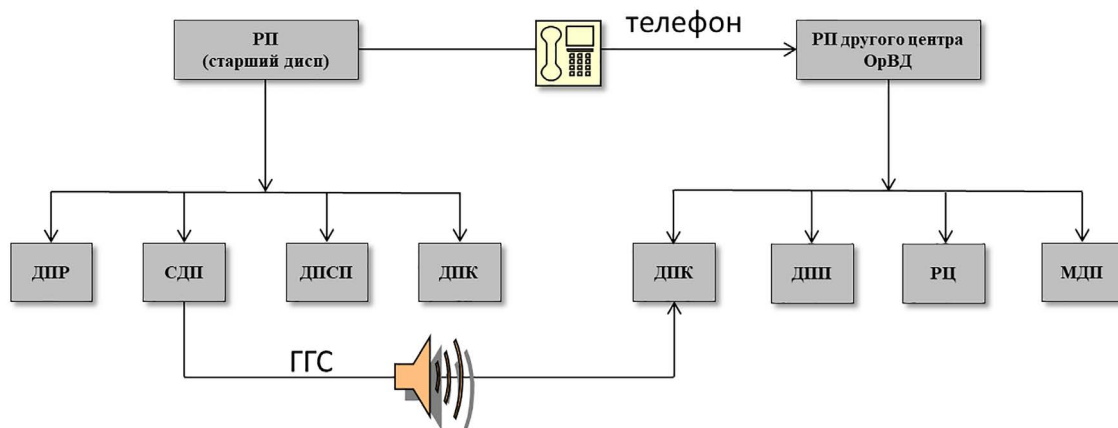


Рис. 5. Схема взаимодействия органов ОВД смежных центров ОрВД при вылете ВС

Первый центр ОрВД представляет из себя аэродром с небольшим собственным воздушным пространством (ВП). Аэродром может принадлежать коммерческой организации, частному лицу, заводу или летному институту. ВС могут относиться к государственной, экспериментальной авиации (ЭА) или гражданской авиации (ГА). На аэродроме осуществляют ОВД, как правило, 4 ДП. ДПК имеет зону ответственности в вертикальной плоскости от 0 до 3000 футов и в горизонтальной плоскости в соответствии с границами сектора ОВД [14, 15, 16].

Второй центр ОрВД несет ответственность за воздушное пространство, окружающее в вертикальной и горизонтальной плоскостях все аэродромы одного аэроузла. Как правило, данным центром ОрВД является ФГУП «Госкорпорация по ОрВД», которая состоит из 4 ДП, осуществляющих ОВД от момента взлета до выхода из горизонтальных границ зоны ответственности [17].

Взаимодействие органов ОВД в части согласования условий передачи ОВД между секторами двух различных центров ОрВД производится между СДП аэродрома и ДПК второго центра ОрВД. Особенностью является то, что ДПК имеет приоритет по ИВП, и диктует, как и, главное, когда разрешать взлет ВС с аэродрома. Рассмотрим на примере аэродрома «Остафьево» эффективность взаимодействия СДП «Остафьево» и ДП Внуково-прилет (рис. 6).

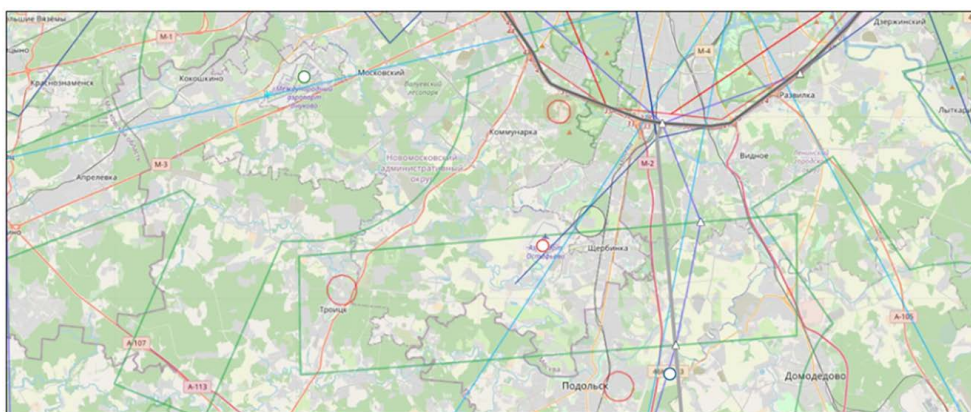


Рис. 6. Взаимное расположение секторов ОВД

Дальний приводной радиомаяк (ДППМ) NW расположен в точке IAF (Initial approach fix) при заходе на посадку во Внуково по STAR. Вследствие преобладающих ветров западного направления рабочий курс ВПП Остафьево, как правило, 254° . Диспетчер Остафьево

осуществляет УВД по высоте до 3000 футов включительно. Первоначальная минимальная высота набора высоты для ВС – это тоже 3000 футов. Прибывающие во Внуково ВС проходят зону ответственности диспетчера «Остафьево» в снижении до высоты 2000 футов [18].

Разберем ситуацию, когда с аэродрома Остафьево вылетает ВС. В среднем самолет достигает высоты 3000 футов на удалении 3-4 км от торца ВПП. При условии, что борт набирает высоту по курсу взлета, он достигнет высоты 3000 футов над ДПРМ NW. Получается, что при одновременном взлете ВС с аэродрома Остафьево и подлете прибывающего во Внуково ВС к ДПРМ NW, есть вероятность нарушения вертикального эшелонирования в соответствии с Федеральными правилами использования воздушного пространства (ФП ИВП) [19].

С целью не допустить нарушения интервала между ВС диспетчер ДП Внуково-прилет дает указание диспетчеру ПДСР Остафьево ждать «окно» на вылет. Время ожидания зависит от количества прибывающих во Внуково ВС [20].

На рис. 7 показан алгоритм действий диспетчера УВД при согласовании условий передачи ОВД.



Рис. 7. Алгоритм действий ПДСР при вылете ВС

Для ВС F7X, имеющего максимальную $t_{зад}$, были построены таблица параметров технологического графика (табл. 2) и сетевой график (рис. 8). Исследовались 2 различные работы по взаимодействию органов ОВД.

Таблица 2

Таблица параметров технологического графика работы взаимодействия ПДСР и ДП Внуково-прилет при вылете F7X

п/п	Наименование работы	Событие		Продолжительность, мин., с
		начало	конец	
1	Согласование с ДПК	0	1	2 мин.
2	Разрешение на взлет	1	2	20 с



Рис. 8. Сетевой технологический график взаимодействия ПДСР и ДП Внуково-прилет при вылете F7X.

Время обеспечения вылета ВС F7X органами ОВД равно (2):

$$t_{обесп} = t_{окон} - t_{нач} = 3 \text{ мин.}$$

Предполагаемое (планируемое) время движения ВС определяется по формуле (6):

$$t_{\text{пред}} = t_{\text{обесп}} - t_{\text{зад}} = 0 \text{ мин. } 20 \text{ с.}$$

Время задержки ВС F7X равно (4):

$$t_{\text{зад}} = \sum_{i=1}^n (x_1; x_2; x_3; x_n) = 2 \text{ мин. } 40 \text{ с}$$

где x_n – события, оказывающие влияние на время задержки ВС: x_1 – указание ждать от ДП Внуково-прилет.

Эффективность взаимодействия ПДСР Остафьево и ДП Внуково-прилет (1):

$$E = \frac{t_{\text{пред}}}{t_{\text{обесп}}} * 100 \% = 11,1 \%$$

Выводы

Выполнено исследование технологии взаимодействия органов ОВД в процессе руления и взлета ВС.

Анализ работы диспетчера ПДСР при рулении ВС показал, что критический путь обеспечения руления ВС составляет 3 минуты. Задержка момента занятия ИС отсутствует. Эффективность работы диспетчера УВД ПДСР «Остафьево» составила $E = 100 \%$. Высокая эффективность обусловлена особенностью организации РМ на аэродроме «Остафьево», позволяющей ЭВС в процессе руления получать дальнейшие разрешения на занятие ИС и на взлет, а также отсутствием необходимости изменять частоту работы ДП.

Анализ технологии взаимодействия органов ОВД Остафьево и Внуково показал, что критический путь обеспечения вылета ВС с аэродрома «Остафьево» составляет 3 минуты. Задержка взлета составляет 2 мин. 40 с. Задержка вызвана следующими факторами: x_1 – ожидание разрешения на взлет от другого сектора ОВД. Эффективность взаимодействия ПДСР Остафьево и ДПК Внуково составила $E = 11,1 \%$. Низкая эффективность обусловлена высокой интенсивностью воздушного движения над воздушной зоной аэродрома «Остафьево», а также конфликтующими схемами в новой структуре воздушного пространства.

Исследование показало, что существующая технология взаимодействия органов ОВД Остафьево и Внуково имеет ряд существенных недостатков, влияющих на пропускную способность аэродрома, расход топлива ВС, а также на безопасность полетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кулаков М.В., Чехов И.А. Анализ технологии взаимодействия органов ОВД на рубежах приема - передачи управления // Научный вестник МГТУ ГА. 2018. № 05. С. 23–33.
2. Берцун В.Н. Математическое моделирование на графах. Томск, 2006. 88 с.
3. Kuznetsova N.B. Transmission of information and communication as a human factor crucial in aircraft maintenance // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2017. № 2. С. 240–246.
4. Степнова А.И. Анализ эффективности программы совместной тренажерной подготовки авиадиспетчеров и пилотов / А.И. Степнова, С.М. Степанов, В.В. Борсоева, В.А. Борсоев // Научный вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22. № 5. С. 32–42. DOI: 10.26467/2079-0619- 2019-22-5-32-42.
5. Козлов А.С. Человеческий фактор и система обеспечения безопасности полетов // Научный вестник МГТУ ГА. 2012. № 182. С. 84–88.

6. Шумилов И.С. Авиационные происшествия. Причины возникновения и возможности предотвращения. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 328 с.
7. Артюхович М.В., Феоктистова О.Г. Роль инженерно-технического персонала в обеспечении безопасности полетов // Научный вестник МГТУ ГА. 2014. № 204. С. 39–43.
8. Золотых В.И. О состоянии безопасности полетов // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2017. № 3 (3). С. 59–67.
9. Плотников Н.И. Ресурсы пилота. Надежность: монография. Новосибирск: ЗАО ИПЦ «АвиаМенеджер», 2013. 264 с.
10. Лушкин А.М. Методика оценивания уровня безопасности полетов по совокупности авиационных событий // Научный вестник МГТУ ГА. 2010. № 162. С. 125–130.
11. Евстигнеев Д.А. Подготовка авиационного персонала в области человеческого фактора: метод. указания по изучению дисциплины. Ульяновск: УВАУ ГА, 2009. 65 с.
12. Борисов В.Е. Определение вероятности безошибочной работы диспетчера / В.Е. Борисов, В.В. Борсоев, С.М. Степанов, А.И. Степнова // Научный вестник МГТУ ГА. 2018. Т. 21, № 3. С. 47-55. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-47-55.
13. Борсоев В.А. Принятие решения в задачах управления воздушным движением. Методы и алгоритмы / В.А. Борсоев, Г.Н. Лебедев, В.Б. Малыгин, Е.Е. Нечаев, А.О. Никулин, Тин Пхон Чжо. Под ред. Е.Е. Нечаева. М.: Радиотехника, 2018. 432 с.
14. Анодина Т.Г., Кузнецов А.А., Маркович Е.Д. Автоматизация управления воздушным движением: учебник для вузов / Под ред. Кузнецова А.А. М.: Транспорт, 1992. 279 с.
15. Зубков Б.В., Рыбалкин В.В. Человеческий фактор и безопасность полетов. М.: МГТУ ГА, 1994. 68 с.
16. Лебедев А.М. Метод расчета ожидаемого предотвращенного ущерба от авиационных происшествий: монография. Ульяновск: УВАУ ГА, 2007. 155 с.
17. Кузьмина Н.М., Ридли М.К. Об автоматическом построении в информационных системах гражданской авиации онтологий предметной области по корпусу текстов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2018. № 21. С. 122–131.
18. Попов Ю.В., Авдеев Н.Н. Кластерный анализ пилотов, которые совершили авиационные события // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2019. № 25. С. 87–93.
19. Далецкий С.С., Далецкий С.В., Плешаков А.И. Терминологическое обеспечение технической эксплуатации гражданской авиационной техники // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2016. № 15. С.40–48.
20. Кошкин Р.П. Математические модели процессов создания и функционирования поисково-аналитических информационных систем гражданской авиации // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2014. № 5. С. 39–49.

REFERENCES

1. Kulakov M.V., Chekhov I.A. Analysis of the technology of interaction of automatic telephone exchange bodies at the boundaries of control transfer and acceptance. *Nauchnyj vestnik MGTU GA = Scientific Bulletin of MSTU CA*, 2018, no. 5, pp. 23–33. (In Russian).
2. Bertsun V.N. *Matematicheskoe modelirovanie na grafakh* [Mathematical simulation on graphs]. Tomsk, 2006. p. 88. (In Russian).
3. Kuznetsova N.B. Transmission of information and communication as a human factor. *Crede Experto: transport, society, education, language*, 2017, no. 2, pp. 240–246.
4. Stepanova A.I., Stepanov S.M., Borsoeva V.V. and Borsoev V.A. Analysis of effectiveness of the program of joined air traffic controllers and pilots training. *Nauchnyj vestnik MGTU GA = Civil Aviation High Technologies*, 2019, vol. 22, no. 5, pp. 32-42. DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-5-32-42. (In Russian).
5. Kozlov A.S. The human factor like the main element in system of safety of flight. *Nauchnyj vestnik MGTU GA = Scientific Bulletin of MSTU CA*, 2012, no. 182, pp. 84-88. (In Russian).
6. Shumilov I.S. *Aviatsionnyye proisshestiya. Prichiny vozniknoveniya i vozmozhnosti predotvrashcheniya* [Aviation accidents. Causes and possibilities of prevention]. Moscow. Izdatelstvo MGTU im. N.E. Bauman, 2006, 328 p. (In Russian).

7. Artyukhovich M.V. and Feoktistova O.G. The role of the technical staff in the flight safety. *Nauchnyj vestnik MGTU GA = Scientific Bulletin of MSTU CA*, 2014, no. 204, pp. 39–43. (In Russian).
8. Zolotykh V.I. On the aviation units flights safety state problem. *Vozdushnokosmicheskiye sily. Teoriya i praktika = Aerospace forces. Theory and practice*, 2017, no. 3 (3), pp. 59–67. (In Russian).
9. Plotnikov N.I. *Resursy pilota. Nadezhnost. Monografiya* [Resources of a pilot. Reliability. Monograph]. Novosibirsk. ZAO IPTS «AviaMenedzher», 2013, 264 p. (In Russian).
10. Lushkin A.M. Method of estimation of flight safety level on set of air events. *Nauchnyj vestnik MGTU GA = Scientific Bulletin of MSTU CA*, 2010, no. 162, pp. 125–130. (In Russian).
11. Evstigneev D.A. *Podgotovka aviatsionnogo personala v oblasti chelovecheskogo faktora: metodicheskiye ukazaniya po izucheniyu distsipliny* [The aviation personnel training in human factor. Training manual]. Ulyanovsk. UVAU GA Publ., 2009, 65 p. (In Russian).
12. Borisov V.E., Borsoeva V.V., Stepanov S.M. and Stepnova A.I. The probability determination of error-free air traffic controller operation. *Nauchnyj vestnik MGTU GA = Civil Aviation High Technologies*, 2018, vol. 21, no. 3, pp. 47–55. DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-47-55. (In Russian).
13. Borsoyev V.A., Lebedev G.N., Malygin V.B., Nechaev E.E., Nikulin A.O. and Tin Pkhon Chzho. *Prinyatie resheniya v zadachakh upravleniya vozdushnym dvizheniyem. Metody i algoritmy* [Decision making in tasks of the air traffic control. Methods and algorithms], Moscow. Radiotekhnika Publ., 2018, 432 p. (In Russian).
14. Anodina T.G., Kuznetsov A.A. and Markovich E.D. *Avtomatizatsiya upravleniya vozdushnym dvizheniyem* [Automation of air traffic control]. Moscow. Transport Publ., 1992, 280 p. (In Russian).
15. Zubkov B.V. and Rybalkin V.V. *Chelovecheskiy faktor i bezopasnost' poletov* [Human factor and flight safety]. Moscow. MGTU GA Publ., 1994, 68 p. (In Russian).
16. Lebedev A.M. *Metod rascheta ozhidaemogo predotvrashchennogo ushcherba ot aviatsionnykh proisshествij. Monografiya* [The method of calculating the expected avoided damage from the accident. Monography]. Ulyanovsk. UVAU GA Publ., 2007, 155 p. (In Russian).
17. Kuzmina N.M., Ridley M.K. About automatic construction in information systems of civil aviation ontology of the subject field on the corps of texts. *Nauchnyj vestnik GosNII GA = Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2018, no.21, pp. 122–131. (In Russian)
18. Popov Yu.V., Avdeev N.N. The cluster analysis of pilots who made aviation events. *Nauchnyj vestnik GosNII GA = Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2019, no.25, pp. 87–93. (In Russian).
19. Daletskiy S.S., Daletskiy S.V., Pleshakov A.I. Terminology the technical usage of civil aircraft. *Nauchnyj vestnik GosNII GA = Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2016, no. 15, pp. 40–48. (In Russian)
20. Koshkin R.P. Mathematical models of processes of creation and functioning of search and analytical information systems of civil aviation. *Nauchnyj vestnik GosNII GA = Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2014, no. 5, pp. 39–49. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Кулаков Михаил Викторович, инструктор УТЦ, Московский государственный технический университет гражданской авиации, б-р Кронштадтский, дом 20, Москва, Российская Федерация, 125493; Диспетчер УВД, ЛИИ им. М.М. Громова, ул. Гарнаева, дом 2а, Московская обл., г. Жуковский, Российская Федерация, 140180; e-mail: mihail-sev@mail.ru.

ABOUT THE AUTHOR

Kulakov Mikhail V., Instructor, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Kronshtadtsky blvd, 20, 125493, Moscow, Russian Federation; Air Traffic Controller, Gromov FRI, Garnaeva Street, 2a, Moscow district, 140180, Zhukovsky, Russian Federation; e-mail: mihail-sev@mail.ru.

УДК 629.735.072.8

ПРОБЛЕМАТИКА ОЦЕНКИ ИМИТАЦИИ АКСЕЛЕРАЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ПОЛНОПИЛОТАЖНЫМИ АВИАЦИОННЫМИ ТРЕНАЖЕРАМИ

В.С. ДЕГТЯРЕВ

*Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Российская Федерация*

Аннотация. Данная статья посвящена проблематике оценки характеристик имитации акселерационных эффектов современными полнопилотажными тренажерами, на этапе проведения сертификационных испытаний данных устройств. Данная проблема существует из-за применения метода субъективной оценки, при проведении сертификационных испытаний акселерационных эффектов устройств имитации полета. Такой вид оценки подразумевает использование пилотов испытателей или пилотов, имеющих большой опыт полетов на имитируемом типе ВС, для оценки возможностей полнопилотажного авиатренажера по воспроизведению акселерационных эффектов полета в различных условиях по сравнению с настоящим ВС. Но, из-за недостаточной точности данного метода, вызванного наличием субъективизма в методике оценки, и не точностью оценки прироста перегрузки по каждой из осей человеческим мозгом, встает вопрос о необходимости разработки новой методики оценки имитации акселерационных эффектов. В статье рассмотрена новая методика оценки возможностей полнопилотажных авиационных тренажеров по имитации акселерационных эффектов при помощи созданного в Московском государственном техническом университете гражданской авиации программного обеспечения, вкупе с применением возможностей современных носимых устройств и выносных акселерометров. Также в статье рассмотрена законодательная база, применяемая в Российской Федерации и за рубежом, для сертификации авиационных тренажеров. Широко рассмотрена проблематика проведения сертификационных испытаний технических средств обучения, применяемых в учебных центрах. Сделаны выводы о необходимости создания методики проведения испытаний устройств имитации акселерационных эффектов полнопилотажных авиационных тренажеров. Даны рекомендации о необходимости приведения сертификационного законодательства к международным стандартам.

Ключевые слова: субъективная оценка, имитация акселерационных эффектов, безопасность полетов, методика оценки, технические средства обучения, техника пилотирования, полнопилотажный тренажер, сертификация, гражданская авиация, обучение летного состава

PROBLEMATICS OF EVALUATING THE SIMULATION OF ACCELERATION EFFECTS BY FULL-FLIGHT AVIATION SIMULATORS

V.S. DEGTYAREV

Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russian Federation

Abstract. This article is devoted to the problems of evaluating the characteristics of imitation of acceleration effects by modern full-flight simulators, at the stage of certification tests of these devices. This problem exists due to the use of the subjective assessment method during conduction of certification tests of the acceleration effects of flight simulation devices. This type of assessment involves the use of test pilots or pilots with extensive experience of flying on a simulated aircraft type to assess the capabilities of a full-flight exercise aircraft to reproduce the acceleration effects of flight in various conditions on a real aircraft. But, due to the lack

of accuracy of this method, caused by the presence of subjectivity in the evaluation method, and bad accuracy of estimating the increase in g-loads on each of the axes by the human brain, the question arises about the need to develop a new methodology for evaluating such effects. The article considers a new method for evaluating the capabilities of full-flight flight simulators to simulate acceleration effects using software created at the Moscow State Technical University of Civil Aviation, coupled with the use of the capabilities of modern wearable devices and remote accelerometers. The article also considers the legislative framework used in the Russian Federation and abroad for the certification of aviation simulators. The problems of conducting certification tests of training devices used in training centers are widely considered. Conclusions are drawn about the need for a methodology for testing devices for simulating the acceleration effects of full-flight flight simulators. Recommendations are given on the need to bring the certification legislation to international standards.

Keywords: subjective assessment, simulation of acceleration effects, flight safety, assessment methodology, technical training tools, piloting technique, full-flight simulator, certification, civil aviation, flight crew training

Введение

Для проведения качественной подготовки летного состава гражданской авиации в настоящее время широко используются полнопилотажные авиационные тренажеры. Такие устройства получили широкое распространение в авиационной сфере благодаря наличию у них большого числа преимуществ перед подготовкой на воздушном судне. С помощью полнопилотажных авиационных тренажеров (далее устройства имитации полета – УИП), в настоящее время, можно снизить общую стоимость обучения, переучивания на новые типы воздушных судов, а также поддержания квалификации летного состава, проводить сложные виды тренировок с имитацией различных отказов авиационной техники и сложных метеоусловий [1].



Рис. 1. Полнопилотажный тренажер самолета (УИП) [2]

В целях проведения сертификационных испытаний современных УИП, международная организация гражданской авиации (ИКАО) разработала и выпустила документ Дос 9625. В документе Дос 9625 ИКАО «Руководство по критериям квалификационной оценки авиационных тренажеров» Часть 1 – Самолеты 4-е изд., не определена конкретная методика для сертификации

УИП, а лишь даны общие положения и понятия, рекомендованные к применению, при разработке национальных сертификационных правил. Каждое государство – член ИКАО обязано разработать на их основе свои национальные правила сертификации УИП.

В настоящее время в нашей стране действуют ФАП 226, ФАП 46, НГАТ 93. Данные документы, как и Doc 9625, при проведении сертификации УИП, на этапе испытаний имитационных характеристик акселерационных эффектов, используют метод субъективной оценки [3].

Субъективная оценка – это оценка имитационных характеристик акселерационных эффектов полнопилотажного тренажера, проводимая пилотами-испытателями или пилотами из наиболее опытных (имеющих большой налет на имитируемом типе ВС) [4, 7]. При проведении такого рода оценки, пилоты выполняют испытательную программу на УИП в течение нескольких часов и дают оценку имитации акселерационных эффектов УИП, основываясь на своих субъективных ощущениях.

При проведении квалификационных испытаний устройств имитации полета, точная экспертная оценка моделирования воздействия на пилотов акселерационных воздействий является важной и сложной задачей [5]. Данная экспертная оценка является необходимым условием для присвоения УИП квалификационного уровня и определения возможности выполнения с его помощью утвержденного перечня учебных задач, при подготовке летного состава.

Данный вид оценки, хотя и принят законодательно, но является очень неточным по причине наличия субъективизма и различий в восприятии акселерационных эффектов разными индивидами [1].

Медицинские исследования показали, что величина прироста перегрузки ощущается по-разному, не только разными индивидами, но и сильно зависит от оси, по которой перегрузка прирастает (к боковой перегрузке человек более чувствителен, чем к вертикальной и продольной). Например, прирост вертикальной перегрузки начинает ощущаться индивидами от величины 0,15 до 0,3 g, а боковой уже со значения 0,1 g.

Такая ситуация дает повод говорить о необходимости разработки нового, более точного метода для проверки имитации акселерационных эффектов УИП и необходимости ухода от субъективной оценки [6].

Также необходимо отметить, что в настоящее время уже разработаны УИП нового поколения, способные имитировать попадания в сложные пространственные положения (далее – СПП). Пример такого устройства изображен на рис. 2. Данное УИП носит название «DESDEMONA» – сокращенно от disorientation demonstrator (демонстратор СПП).



Рис. 2. УИП DESDEMONA

Данное устройство имитации полета нового поколения представляет собой кабину экипажа, закрепленную в трехосевом подвесе, с возможностью вращения по каждой из осей на 360° , с возможностью центробежного вращения данного подвеса на радиусе от трех до восьми метров, а также возможностью вертикального движения в диапазоне трех метров и обладает следующими техническими характеристиками (табл.1).

Таблица 1

Технические характеристики УИП DESDEMONA [1]

	Отклонение от центра	Радиус	Подъем	Рысканье	Крен	Тангаж
Изменение позиции	360°	± 4 м	± 1 м	360°	360°	360°
Скорость изменения позиции	155 °/с	$3,2$ м/с	2 м/с	180 °/с	180 °/с	180 °/с
Ускорение	45 °/с ²	$4,9$ м/с ²	$4,9$ м/с ²	90 °/с ²	90 °/с ²	90 °/с ²

Такая конфигурация данного УИП дает возможность длительной имитации ускорений силой до 3 g, направленных вдоль любой желаемой оси. В то время как применяемые в данное время устройства имитации полета высшей категории D (FAA) или категории 7 (ICAO), для создания и имитации перегрузки используют платформу Гью-Стюарта (рис. 1), которая может наклоняться на угол до 45 градусов и по принципу своей работы способна имитировать только кратковременный прирост перегрузки силой до 0,9 g.

Такие УИП, как DESDEMONA, предназначены для тренировки летных экипажей по выводу ВС из СПП и более углубленной подготовки по этой тематике. Применение метода субъективной оценки при проведении сертификационных испытаний имитации акселерационных эффектов таких устройств будет совершенно неприемлемым, так как их технические характеристики позволяют воспроизводить длительные разнонаправленные перегрузки, которые человеческий мозг сравнить с испытываемыми на ВС будет просто не в состоянии.

Основная часть

В Московском государственном техническом университете гражданской авиации было разработано и опробовано в реальных условиях на ВС и УИП программное обеспечение для носимых устройств, работающих на базе операционной системы Android, способное записывать графики прироста перегрузки по трем осям, при выполнении эволюций в полете, на воздушном судне и УИП. Данное программное обеспечение способно не только записывать графики прироста перегрузки по трем осям, но и сравнивать графики, полученные на воздушном судне и устройстве имитации полета, с расчетом коэффициента подобия имитации акселерационных эффектов реальному ВС, по каждой из осей. Специально разработанный алгоритм записи и сравнения выполняет десять измерений величины прироста перегрузки в секунду по каждой из осей и сравнивает каждое значение, полученное на ВС, со значением, полученным на устройстве имитации полета при выполнении одних и тех же эволюций в сходных условиях [1, 8].

Данное ПО названо «Flight Accelerometer» и написано на языке программирования JAVA, для операционной системы Android версии 4.0.3 и выше при помощи интегрированной среды разработки «Android Studio» версия 3.4.1 (компания «Google»), комплекта разработчика «Java Development Kit» (компания Oracle).

Выбор языка Java был сделан из-за кроссплатформенных возможностей Java Virtual Machine, которые дают возможность с минимальными трудозатратами и изменениями кода расширить количество операционных систем, пригодных для работы с данным ПО.

Разработанное ПО, при записи графиков прироста перегрузки, может использовать, как внутренний акселерометр мобильного устройства, в качестве датчика ускорений, так и любой другой, подключенный к устройству акселерометр, в том числе и удаленный. ПО зарегистрировано в Роспатенте и на него получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020611212.

Возможность использования внутренних акселерометров мобильного устройства была рассмотрена создателями ПО из-за их высоких технических характеристик. Большинство современных мобильных телефонов оснащено электронными акселерометрами, которые выполняют в этих устройствах в основном развлекательные функции, но являются компактными, точными и надежными. В то же время эти электронные акселерометры имеют большой динамический диапазон, малые габариты и хорошую чувствительность.

Высокая выходная чувствительность, хорошее соотношение сигнал/шум и широкая полоса пропускания дают возможность измерять прирост перегрузки действующей как на ВС, так и на пилотов внутри УИП по трем осям с точностью до 0,01 g [9]. Заявленная точность чувствительности акселерометров мобильных устройств составляет от 0,01 g до 0,0005 g в зависимости от производителя и модели устройства. Применение таких точных измерительных устройств приведет к уменьшению погрешности измерений в 30–50 раз по сравнению с методом субъективной оценки.

Построение графиков прироста перегрузки в реальном времени, их запись и сравнение с «идеальными» графиками, полученными на ВС, дают возможность расчета коэффициента подобия УИП и ВС в автоматическом режиме, при помощи мобильных устройств, используемых в данном случае в качестве вычислителя.

В данном случае коэффициент подобия можно определить, как коэффициент, полученный методом сравнения прироста перегрузки на ВС и УИП, при выполнении одних и тех же эволюций в автоматическом режиме, при одинаковых условиях и выраженный в процентах.

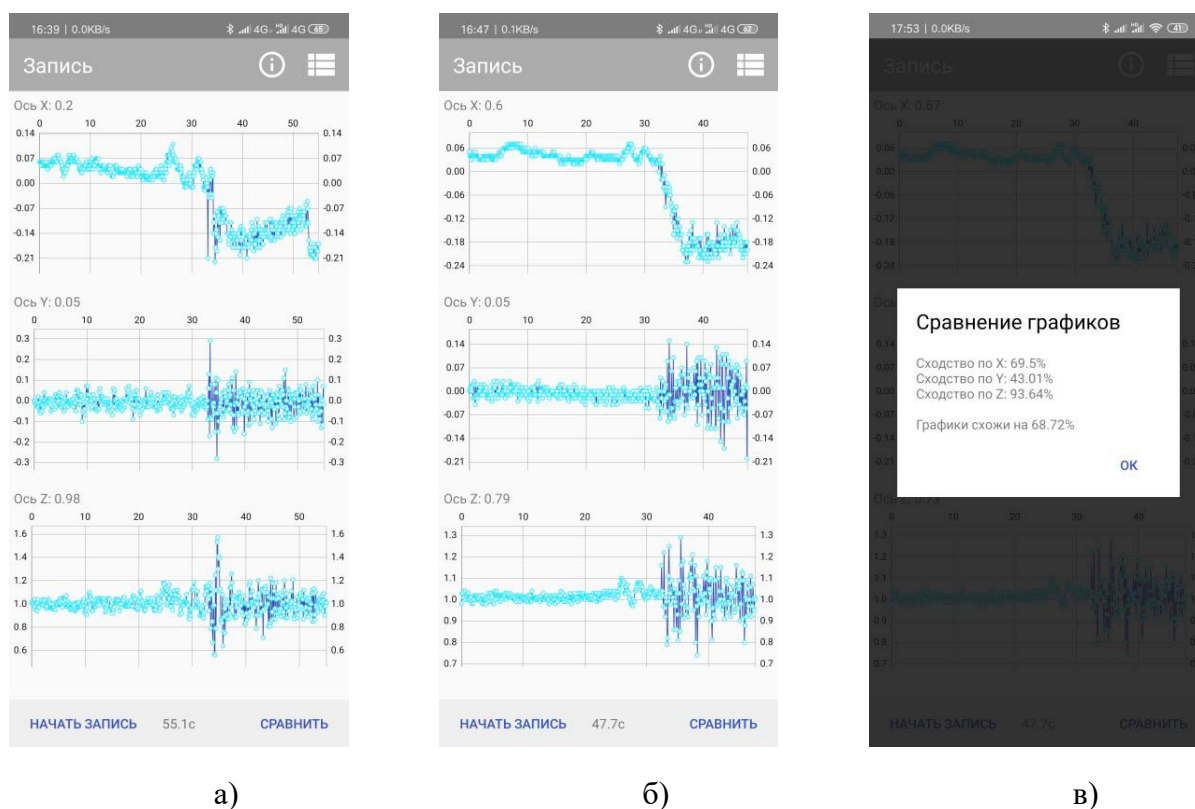


Рис. 3. Графики прироста перегрузки при выполнении посадки на ВС Боинг-747-400 – а) и полнопилотажном тренажере Боинг-747-400 в автоматическом режиме – б), при сходных условиях; результаты сравнения полученных графиков с рассчитанным коэффициентом подобия – в)

При проведении испытаний работоспособности программного обеспечения автором были проведены 72 испытания на воздушных судах Боинг-737/747/777, Як-52 и авиационных тренажерах данных типов ВС в учебных центрах Lufthansa (Франкфурт), Boeing Training Center (Москва) и Авиационном учебном центре компании «Аэрофлот» (Москва). Испытания проводились, как в автоматическом режиме (с использованием автопилота), так и в ручных режимах пилотирования, на разных этапах полета. На самолете Як-52 испытания проводились с выполнением фигур простого, сложного и высшего пилотажа, для опробования работы ПО и мобильных устройств в условиях воздействия больших знакопеременных перегрузок и оценки влияния перегрузок на точность их записи.

По результатам проведенных испытаний на разных режимах полета, сделаны выводы о работоспособности всех функций созданного ПО и возможности его применения в целях сертификации полнопилотажных авиационных тренажеров в части проверки имитационных характеристик акселерационных эффектов. Однако для применения в практике авиационной деятельности указанное ПО в последующем должно будет пройти сертификацию как программное обеспечение, применяемое при измерениях [10–12].

На рисунках 3 и 4 приведены примеры графиков, полученных при проведении испытаний данного ПО. Из графиков рис. 3 видно, что УИП Боинг-747 недостаточно точно имитирует прирост перегрузки по боковой и перпендикулярной оси, при заходе на посадку (графики более плавные, чем на ВС), что и привело к снижению показателя коэффициента имитационных характеристик акселерационных эффектов по данным осям.

На графиках рис. 4 также видна недостаточная имитация акселерационных эффектов на УИП по перпендикулярной оси и виден небольшой всплеск по продольной оси на конечном этапе торможения, что и привело к понижению коэффициента имитации акселерационных характеристик.

Испытания, показанные на рис. 3 и 4, проводились при выполнении посадки с высоты 400 футов до скорости 80 узлов (скорость отключения реверса на большинстве современных ВС) при одинаковых внешних условиях, массах, положениях механизации и режимах работы автоматики. Испытания показали, что коэффициент имитации акселерационных эффектов данных УИП равен 68 %, что является достаточно высоким показателем, учитывая точность проведенных измерений.

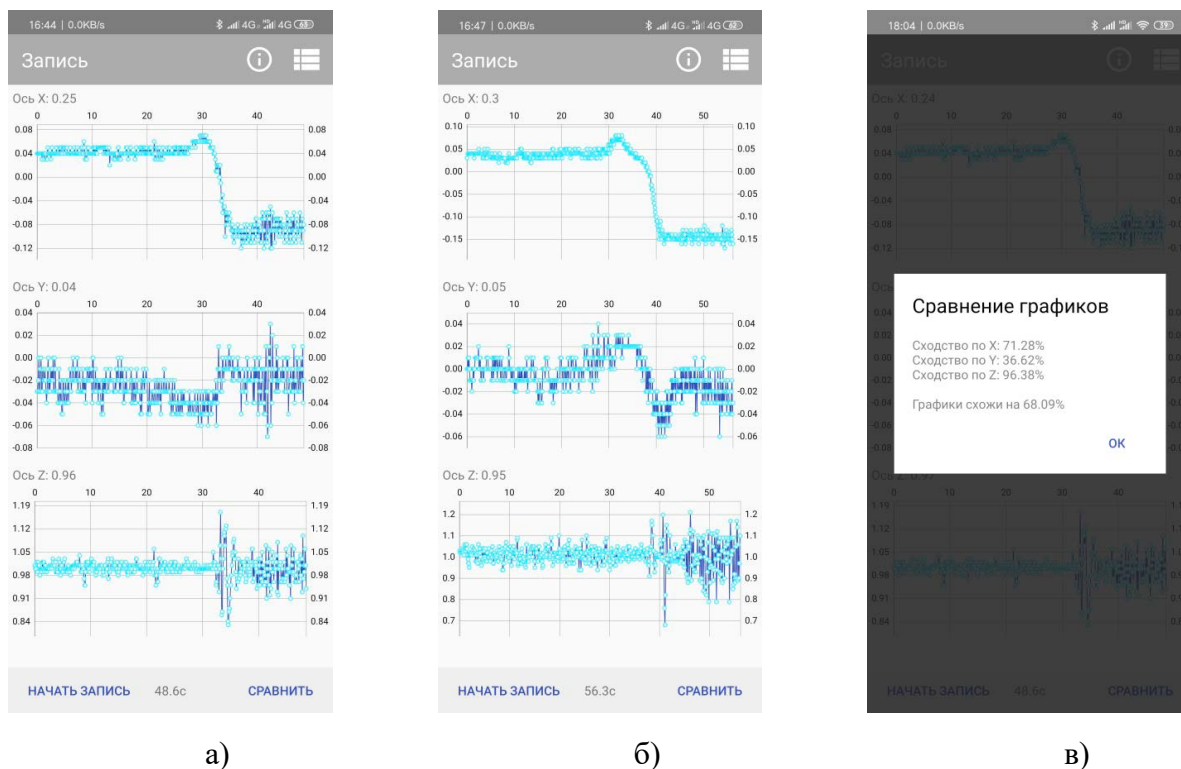


Рис. 4. Графики прироста перегрузки при выполнении посадки на УИП – а) и ВС Боинг-737-800 – б) при сходных условиях; результаты сравнения полученных графиков – в)

Применение данного ПО имеет несколько технических ограничений:

1. Время начала и окончания записи графиков прироста перегрузки, при выполнении эволюций на ВС и УИП, должно совпадать для получения более точных результатов измерений и минимизации методической погрешности.
2. Устройство измерения перегрузки (акселерометр) должно быть закреплено параллельно строительной оси ВС, примерно на 35 см ниже глаз пилота (рекомендация ИКАО).
3. Для уменьшения влияния шума измеритель должен быть надежно закреплен в кабине.
4. Устройство должно размещаться одинаково относительно осей симметрии и центра тяжести на ВС и УИП, для достижения высокой точности измерений.
5. Акселерометр должен быть откалиброван перед проведением испытаний, согласно инструкции по калибровке акселерометра для мобильного устройства, либо инструкции по калибровке выносного акселерометра (в случае использования такового).

Для целей осуществления подобного рода испытаний, в рамках диссертационного исследования автора, была разработана специальная методика их проведения, которая позволяет минимизировать возможные методические ошибки при проведении сертификации и способствует повышению точности проводимых испытаний. Данная методика подразумевает проведение испытаний на ВС и УИП с полной имитацией реальных внешних условий среды, массы ВС, режима работы двигателей. Методика разделяет этапы полета на руление, взлет, эволюции, выполняемые в полете, посадку и пробег. Для каждого этапа описаны правила выполнения испытаний, время начала и окончания испытания, скорости, высоты, режимы, массы ВС и положение механизации, а также условия внешней среды. Также определено необходимое количество проводимых испытаний на каждом этапе полета в автоматическом режиме (когда это возможно) для уменьшения методической погрешности измерений.

Выводы

Все вышесказанное дает возможность утверждать, что в результате проведенной научной работы получено новейшее программное обеспечение, способное записывать и сравнивать графики прироста перегрузки по трем осям на воздушном судне и устройствах имитации полета, при выполнении одних и тех же эволюций и, сравнивая полученные графики, рассчитывать коэффициент подобия имитации акселерационных характеристик авиационного тренажера реальному ВС [1, 13].

Проведенные испытания подтвердили полную работоспособность всех функций полученного ПО.

Разработанное программное обеспечение после проведения его сертификации в качестве ПО, применяемого при измерениях, вместе с методикой проведения сертификационных испытаний, могут быть:

- имплементированы в действующую нормативно-правовую базу (федеральные авиационные правила);
- использованы для замены метода субъективной оценки, при проведении сертификационных испытаний устройств имитации полета;
- использованы для сертификации перспективных типов УИП, способных имитировать попадания в СПП.

Применение полученных результатов научной работы на практике приведет к увеличению точности проводимых испытаний и позволит сделать сертификационный процесс более прозрачным и справедливым для всех его участников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дегтярев В.С., Машошин О.Ф., Кулаков М.В. Проблематика сертификации современных и перспективных авиатренажеров // *Инновации в гражданской авиации*. 2018. № 1. С. 84–89.
2. Бешчев Ю.И. Концепция построения специализированных компьютерных тренажеров для летного и инженерно-технического состава модернизируемых и перспективных ЛА // *Авиация и транспорт*. 2001. № 7. С. 26–36.
3. Щербак В.В. Методика синтеза технических средств обучения, применяемых в системе переподготовки персонала на новое воздушное судно гражданской авиации.: дис. . канд. техн. наук : В. В. Щербак. М., 2016. С. 11–56.
4. Бодрунов С.Д. Авиационное тренажеростроение в России, история, современное состояние, перспективы развития // *Тренажерные технологии и симуляторы: Сборник докладов конференции*. СПб., 2002. С. 4–12.
5. Попов О.С., Третьяков А.В. Задачи построения компьютерных систем обучения для пилотов гражданской авиации. // *Авиакосмическое приборостроение*, 2003. № 9. С. 38–40.
6. Прошкина Л.А. Повышение качества авиационных тренажеров на основе учета человеческого фактора / Л.А. Прошкина, В.Н. Прошкин // *Приоритетные научные направления: от теории к практике*. 2016. № 24–2. С. 119–126.
7. Литвиненко, А.А. Анализ состояния российского рынка авиационных технических средств обучения / А.А. Литвиненко // *Авиатренажеры, учебные центры и авиаперсонал-2012: IV Междунар. конф.* М.: Динамика, 2012. С. 5–8.
8. Рухлинский В.М., Куминова А.П. Проблема безопасности полетов, связанная со снижением роли экипажа в пилотировании ВС, и переход к автоматизированным полетам // *Научный вестник ГосНИИ ГА*. 2018. № 22 (333). С. 91–101.
9. Найда В.А. Организационно-методические аспекты внедрения в учебный процесс авиационных тренажеров западного производства // *Научный вестник МГТУ ГА*. 2013. № 197 (11). С. 94–96.
10. Богоявленский А.А. Аттестация испытательного оборудования узлов и агрегатов авиационной техники // *Научный вестник МГТУ ГА*. М., 2014. № 199 (1). С. 126–133.
11. Богоявленский А.А., Боков А.Е. Аттестация программного обеспечения специальных СИ на воздушном транспорте // *Мир измерений*. 2012. № 11. С. 14–22. DOI 10.35400/1813-8667-2012-11-14-22.
12. Богоявленский А.А., Боков А.Е. Ермолаева О.Л., Матюхин К.Е. О сертификации программного обеспечения средств измерений и информационно-измерительных систем, применяемых в гражданской авиации // *Труды ГосНИИ ГА*. М., 2010. Вып. 311. С. 86–90.
13. Деревянчук Д.М., Деревянчук Н.В. Методы автоматического расчета режимов разгона и торможения в авиационных тренажерах // *Методы и средства измерения в системах контроля и управления: Труды международной конференции*. Пенза, 2002. С. 150–151.

REFERENCES

1. Degtyarev V.S., Mashosin O.F., Kulakov M.V. Problems of certification modern and future aviation simulators. *Innovatsii v grazhdanskoj aviatsii = Innovation in Civil Aviation*, 2018, no. 1, pp. 84–89. (In Russian).
2. Beshchev Yu.I. Conception of construction spatial simulators of modern and future aircraft for pilots and engineers. *Aviatsiya i transport = Aviation and transport*, 2001, no. 7, pp. 26–36. (In Russian).
3. Shcherbak V.V. *Metodika sinteza tekhnicheskikh sredstv obucheniya, primenyaemykh v sisteme perepodgotovki personala na novoe vozdushnoe sudno grazhdanskoj aviatsii. Diss...kand. tekhn. nauk* [Methods of technical tools creation, that used in civil aviation staff trainings system. Cand. techn. sci. diss.], 2016, pp. 11–56. (In Russian).

4. Bodrunov S.D. Aviation simulators construction in Russia, history, nowadays and future. *Trenazhernye tekhnologii i simulyatory. Sbornik dokladov konferentsii* [Simulator technologies and simulators. Collection of conference reports]. St. Petersburg, 2002, pp. 4–12. (In Russian).
5. Popov O.S., Tretyakov A.V. Construction of education computer systems for civil aviation pilots. *Aviakosmicheskoe priborostroenie = Aero and space instrument construction*, 2003, no. 9, pp. 38–40. (in Russian).
6. Proshkina L.A., Proshkin V.N. Quality improvement of simulators on the basis of human factor. *Prioritetnye nauchnye napravleniya, ot teorii k praktike = Priority scientific areas from theory to practice*, 2016, no. 24–2, pp. 119–126. (In Russian).
7. Litvinenko A.A. The analisys of simulators market condition in Russia. *Aviatrenazhery, uchebnye tsentry i aviapersonal-2012. IV Mezhdunarodnaya konferentsiya* [Flight simulators, training centres and air staff. IV International conference]. Moscow, 2012, pp. 5–8. (In Russian).
8. Rukhlinskiy V.M., Kuminova A.P. Problem of flight safety, connected with degradation of crew role in piloting, and transition to automatic flights. *Nauchnyy vestnik MGTU GA = Scientific Bulletin of MSTU CA*, 2018, no 22 (333), pp. 91–101. (In Russian).
9. Naida V.A., Yablonskiy S.N. Organization and metodic aspects of modern western constructed simulators integration in study process. *Nauchnyy vestnik MGTU GA = Scientific Bulletin of MSTU CA*, 2013, no 197 (11), pp. 94–96. (In Russian).
10. Bogoyavlensky A.A. Certification of test equipment, components and assemblies of aviation technology. *Nauchnyy vestnik MGTU GA = Scientific Bulletin of MSTU CA*, 2014, no. 199 (1), pp. 126–133. (In Russian).
11. Bogoyavlenskiy A.A., Bokov A.E. Certification of software for special MS in air transport. *Mir izmerenij = Measurement world*, 2012, no. 11, pp. 14–22. DOI 10.35400/1813-8667-2012-11-14-22. (In Russian).
12. Bogoyavlensky A.A., Bokov A.E. Ermolaeva O.L., Matyukhin K.E. On software certification of measuring instruments and measuring systems used in civil aviation. *Trudy GosNII GA = Proceedings of GosNII GA*, 2010, no. 311, pp. 86–90. (In Russian).
13. Derevyanchuk D.M., Derevyanchuk N.V. Methods of automatic calculations on accelerations and decelerations in aviation simulators. *Metody i sredsra izmereniya v sistemakh kontrolya i upravleniya. Trudy mezhdunarodnoj konferentsii* [Methods and measurement tools in control and action systems. Proceedings of international conference]. Penza, 2002, pp. 150–151. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Дегтярев Вячеслав Сергеевич, старший преподаватель кафедры двигателей ЛА механического факультета, Московский государственный технический университет гражданской авиации, (командир воздушного судна Боинг-777, авиакомпания «АЗУР Эйр»), Кронштадтский бульвар, д. 20, Москва, Российская Федерация, 125993; e-mail: glider_34@mail.ru.

ABOUT THE AUTHOR

Degtyarev Vyacheslav S., Senior Teacher of the Department of Aircraft Engines, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Boeing-777 Aircraft Commander, AZUR airlines, Kronshtadkiy blvd., 20, 125993 Moscow, Russian Federation; e-mail: glider_34@mail.ru.

УДК 656.7.022

ОЦЕНКА ПРАКТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБСЛУЖИВАНИЯ ПОТОКА ЗАЯВОК В СТАНДАРТНЫХ И ЭКСТРЕННЫХ СИТУАЦИЯХ ПРИ ПОМОЩИ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА

Г.Н. ЛЕБЕДЕВ¹, В.Б. МАЛЫГИН², Д.А. МИХАЙЛИН¹, А.В. РУМАКИНА¹

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва, Российская Федерация

²Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. В статье решается задача оценки эффективности планирования маршрутов групповых полетов в режиме обслуживания заявок при отсутствии регулярного расписания. Установить расписание подобных полетов невозможно в связи со слабым прогнозированием потребностей в заявках на перевозки, поэтому необходим расчетный механизм, позволяющий в короткое время адаптировать возникшую ситуацию под привычные для формализации условия задачи. Рассматривается применение мультипликативной формы интегральной штрафной функции, учитывающей эксплуатационные затраты, которые зависят от времени простоя свободных летательных аппаратов, а также (в отличие от известных подходов) максимальное время ожидания заявок в очереди. Установлено, что в случае случайного размещения заявок по всей обслуживаемой площади выигрыш в сокращении штрафной функции невелик вследствие назначения обслуживания примерно половины перевозок под «давлением» заказчика и не зависит от планируемых действий. В случае планирования кратковременных перевозок при обслуживании в локальных зонах чрезвычайных ситуаций предполагается сокращение времени ожидания обслуживания оперативных заявок на 15-20 % по сравнению с известным методом планирования маршрутизации с использованием «жадного» алгоритма. Решение может производиться перебором как непомерно большого, так и малого количества возможных вариантов. В работе представлен пример практической оценки эффективности, на которую оказывают влияние упомянутые критерии эксплуатационного характера и срочность исполнения, выраженные весовыми коэффициентами. Решением задачи является единственный вариант в пользу эффективного преодоления экстренной ситуации, который получен с помощью использования генетического алгоритма. В приведенных примерах динамические приоритеты, принятые на основе мультипликативной формы, формируют частные критерии для ранжирования заявок на каждом шаге планирования. Предлагаемый математический аппарат имеет перспективы внедрения.

Ключевые слова: многомерная маршрутизация, групповые полеты, генетический алгоритм (ГА), штрафная функция, динамический приоритет, система обслуживания заявок

ASSESSING THE PRACTICAL EFFECTIVENESS OF SERVICING THE FLOW OF APPLICATIONS IN STANDARD AND EMERGENCY SITUATIONS USING GENETIC ALGORITHM

G.N. LEBEDEV¹, V.B. MALYGIN², D.A. MIKHAILIN¹, A.V. ROUMAKINA¹

¹Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

²Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russian Federation

Abstract. The article solves the task of assessing the effectiveness of planning group flight routes in application service mode in the absence of a regular schedule. It is not possible to establish a schedule of such

flights due to poor forecasting of the requirements for applications for transport, so a calculation mechanism is required to adapt the situation to the usual conditions for formalization in a short time. The most convenient mathematical device in this case is the application of a multiplier form of integral penalty function, considering the operating costs that depend on the downtime of free aircraft, as well as (as opposed to known approaches) the maximum waiting time for applications in the queue. It has been established that in the case of accidental placing of applications throughout the service area, the gain in reducing the penalty function is not great due to the appointment of about half of the transport by the customer and does not depend on planning actions. In the case of short-term transportation planning for service in local emergency zones, it is expected to reduce the waiting time for operational applications by 15-20 % compared to the known method of routing planning using a «greedy algorithm». Due to the variety of tasks to be solved, the solution can be done by busting an exorbitant number of possible solutions. The paper provides a specific example of a practical performance assessment, influenced by these criteria of operational nature and urgency of execution, which are expressed by weights. Solving this problem is the only option in favor of effectively overcoming an emergency, which is obtained using a genetic algorithm. In this example, dynamic priorities are based on a multiplier form that forms the private criteria for ranking applications at every step of the planning. The proposed mathematical apparatus has prospects for implementation.

Keywords: multidimensional routing, group flights, genetic algorithm (GA), penalty function, dynamic priority, the system of the maintenance of the claims

Введение

Планирование оптимальных маршрутов групповых полетов беспилотной, а также малой авиации является актуальной многокритериальной задачей. Предметом исследований является оценка эффективности генетического алгоритма при многомерной маршрутизации при условии наличия зональной навигации на основе спутниковой системы GNSS. Традиционно при планировании реализации заявок на обслуживания рассматриваются только свободные каналы, роль которых в данной задаче выполняют летательные аппараты (ЛА). Эффективность маршрутизации можно заметно повысить, применив алгоритм целераспределения заявок в сочетании с генетическим алгоритмом. Такое сочетание позволяет рассматривать каналы обслуживания как возможные для реализации заявок не только в свободном, но и в занятом состоянии [1,8].

Принципиально канал обслуживания представляет собой систему ряда характеристик, включая длительность обслуживания текущей заявки [4]. В данной работе процесс реализации заявки представляет собой выполнение полета по перевозке людей, почты и груза летательными аппаратами. Целью данной работы является формирование подхода к многомерной маршрутизации полетов ЛА по заявкам, основанном на сочетании генетического алгоритма с распределением поступающих заявок между свободными и занятыми ЛА, состояние которых на каждом шаге планирования известно.

Постановка задачи

1. Считается, что заявки на использование воздушного пространства (ИВП) возникают случайным образом [5, 12] и представляют собой пуассоновское распределение случайной величины. Число n этих заявок превышает число N летательных аппаратов.

2. Пункты назначения в соответствии с заявками располагаются случайным образом согласно Закону Пуассона [5], либо располагаются в отдельных районах с большой плотностью.

3. Каждая заявка характеризуется известными параметрами: номером заявки m , координатами X_i, Z_i начального i -го пункта вылета и координатами X_j, Z_j конечного j -го пункта

прилета, а также временем ожидания их обслуживания τ_m в общей очереди для обеспечения приоритета.

4. Задано число N летательных аппаратов и текущие значения их координат X_i, Z_i либо на стоянке, либо в полете в любой текущий момент времени.

5. Требуется сформировать эффективный подход к многомерной маршрутизации ЛА [2, 3], основанный на сочетании генетического алгоритма (ГА) с операцией распределения целей на каждом шаге приоритетных заявок между свободными и занятыми ЛА, и оценить эффективность предложенного подхода в сравнении с известными алгоритмами маршрутизации.

Предлагаемый подход к решению задачи и оценке его эффективности

В задачах обслуживания заявок на групповые полеты по перевозке пассажиров, почты и грузов при отсутствии регулярного расписания вследствие слабой предсказуемости объемов перевозок наиболее эффективное планирование перевозок достигается при использовании генетического алгоритма с целераспределением заявок как между свободными, так и занятыми ЛА [2, 3]. Такой подход включает:

– формирование первоначальной «элиты» многомерных маршрутов при неоднократном использовании разных вариантов критерия назначения первоочередных заявок на каждом шаге маршрутизации с помощью следующего динамического приоритета (P_j), включая нормированные значения параметров

$$P_j = \max_{j=1 \dots N} \left[\frac{r_{\min}}{r_{ij}} + m_1 \right] \left[\frac{\tau_j}{\tau_{\max}} + m_2 \right], \quad (1)$$

где: r_{ij} – расстояние от начала маршрута по j -й заявке до расчетного промежуточного пункта i -го маршрута;

$r_{\min}$ – минимальное расстояние между пунктами;

τ_j – время ожидания заявки в очереди;

$\tau_{\max}$ – максимально допустимое время ожидания;

m_1 и m_2 – весовые коэффициенты значимости сомножителей (чем меньше значение m_1 , тем важнее первый сомножитель при условии, что $m_1 + m_2 = 1$).

– множество сформированных маршрутов M разбивается на ряд блоков, содержащих минимум две или более заявок, после чего, в результате их «скрещивания» и частичных перестановок, образуется расширенное множество «потомков». Завершающей операцией является генетический отбор лучшего решения с помощью интегральной штрафной функции J_v оценки его эффективности, учитывающей зачастую противоречивые интересы исполнителей и заказчиков

$$J_v = \min_{v=1 \dots MN} \left[\left(\max_{i=1 \dots N} \frac{\eta_i}{T_{\max}}(v) + m_3 \right) \left(\frac{\sum_{i=1}^N L_i(v)}{L_{\max}} + m_4 \right) \right], \quad (2)$$

где: J_v – интегральная штрафная функция;

v – номер варианта решения после «скрещивания» и «мутации»;

$T_{\max}$ – максимальное время ожидания выполнения заявки;

$L_{\max}$ – максимальная суммарная длина пути всех ЛА;

$L_i(v)$ – длина пути каждого маршрута в i -м варианте;

$\max \eta_i(v)$ – максимальное время нахождения заявки в очереди в v -м варианте.

Целью работы является оценка практической эффективности планирования полетов авиации с использованием генетического алгоритма совместно с алгоритмом целераспределения заявок в сравнении с известными подходами планирования авиаперевозок.

В качестве основного инструмента решения задачи используется компьютерное моделирование. Вначале рассмотрим известный подход к многомерной маршрутизации группового полета, основанный на использовании «жадного» алгоритма [14], сущность которого состоит в следующем. В качестве первого выбирается любой анализируемый ЛА и ему для обслуживания назначается ближайший пункт. Затем, с сохранением права первоначального выбора выбирается другой ЛА и для него из того же множества заявок назначается «свой» ближайший пункт [6–8]. Если пункты при первом и втором выборе не совпадают, процесс целераспределения продолжается. В противном случае возникает конфликтная ситуация, и выбранный пункт принадлежит тому ЛА, который ближе. Таким образом, для каждого ЛА будут назначены «свои» пункты, однако маршруты их перелетов могут пересекаться, что при полете на одной высоте снизит его безопасность и приведет к увеличению длины суммарного пути.

Блок-схема компьютерной модели «жадного» алгоритма представлена на рис. 1. На любом шаге k планирования моделируется «случайный» момент для других вариантов исходных данных [11, 12].

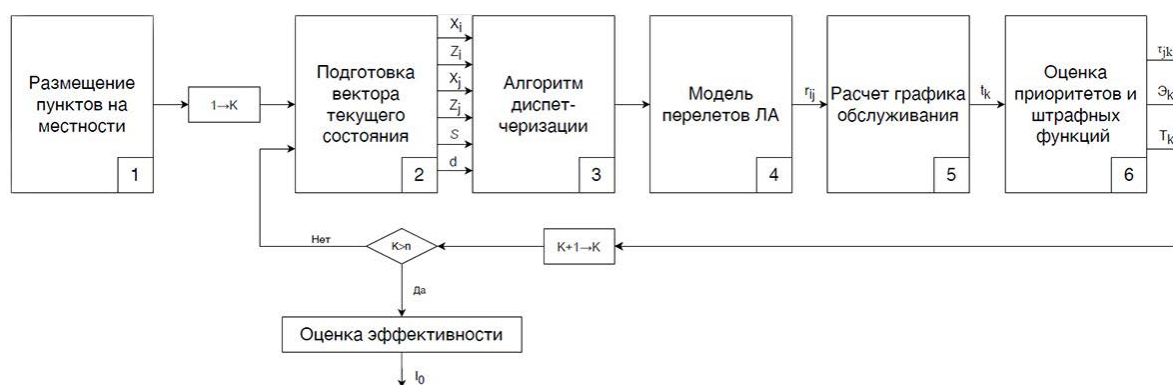


Рис. 1. Блок-схема компьютерного моделирования системы обслуживания заявок в режиме «воздушного такси»

Разработанная программа моделирования позволяет анализировать различные алгоритмы диспетчеризации, а также определять на каждом шаге число свободных заявок и число свободных и занятых ЛА. В результате на выходе получается количественная оценка штрафных функций, необходимых для учета интересов как заказчиков, так и исполнителей.

Пример 1. Маршрутизация при обслуживании заявок на перелеты по заданной траектории. Решается задача маршрутизации группового полета трех ЛА из пункта вылета в пункт прилета (всего 24 пункта) в соответствии с заявками на площади 250 км² как показано на рис. 2. Изначально поступило 12 заявок, в каждой указаны координаты пункта вылета X_p, Z_p и соответствующий ему пункт прилета X_j, Z_j как показано в табл. 1. Размещение всех 24 пунктов на территории соответствует пуассоновскому распределению случайной величины и носит неравномерный характер [13]. Изначально ЛА расположены в пунктах с координатами $X_A = 50, Z_A = 50; X_B = 150, Z_B = 50; X_C = 50, Z_C = 150$.

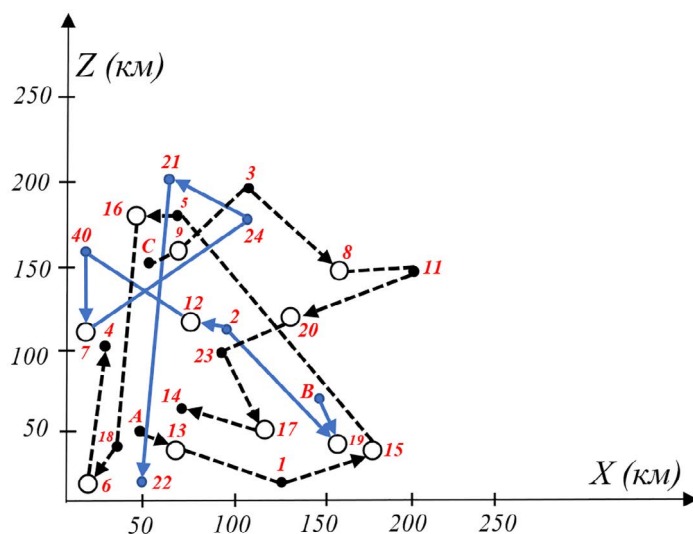


Рис. 2. Картина расположения обслуживаемых пунктов на заданной территории
Знак О — пункт вылета согласно заявке.

Считаем, что поступление заявок подчиняется пуассоновскому распределению, а время ожидания в общей очереди неодинаково [9, 10], но известно τ_j (табл. 2).

Таблица 1

Исходные данные пунктов вылета и прилета

№ заявки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
№ пункта вылета	6	7	8	9	12	13	15	16	17	19	20	21
$X_{i(км)}$	10	20	170	70	80	70	190	50	120	160	130	70
$Z_{i(км)}$	10	110	130	150	120	20	30	170	50	30	120	200
№ пункта прилета	4	24	11	3	10	1	5	18	14	2	23	22
$X_{j(км)}$	30	90	200	150	10	130	70	50	70	100	120	60
$Z_{j(км)}$	120	170	140	180	160	10	170	0	70	120	150	10

Таблица 2

Время ожидания выполнения заявок

J	6	7	8	9	12	13	15	16	17	19	20	21
$\tau_{j \text{ мин}}$	152	150	149	148	146	130	120	90	87	84	80	68

Для решения задачи маршрутизации воспользуемся формулой (1) для двух вариантов назначения динамических приоритетов $\eta_1 = 0,2$ и $\eta_2 = 0,8$. На первом шаге $k = 1$ имеется три ЛА и 12 заявок с соответствующими характеристиками (табл. 1). Выбрав заявки с наибольшим временем ожидания τ_j и наименьшим расстоянием, получаем заявки 6 и 13 для первого

ЛА₁(6; 13), соответственно для ЛА₂(13; 15; 19) и ЛА₃(5; 9; 16). Расчеты показывают, что в «элиту» попали заявки 13; 19; 9 соответственно для пунктов 1, 2, 3 (табл. 1). На втором и последующих шагах один из трех ЛА освобождается раньше других, и расчеты производятся с учетом этого обстоятельства. Так, при $k = 2$ первым освобождается ЛА₁, для которого 7 является следующей заявкой ($ЛА_1^2 - 7$). Аналогичным образом определяются заявки для ($ЛА_2^3 - 12$), ($ЛА_3^4 - 8$). В табл. 3 представлены варианты выбранных маршрутов при $\eta_1 = 0,2$ (рис. 1).

Таблица 3

Оптимальная конфигурация маршрутов при $\eta_1 = 0,2$

ЛА ₁	А	13	1	15	5	16	18	6	4
ЛА ₂	В	19	2	12	10	17	24	21	22
ЛА ₃	С	9	3	8	11	20	23	17	14

Аналогичным образом производим расчеты при $\eta_2 = 0,8$. Данные сводим в табл. 4.

Таблица 4

Оптимальная конфигурация маршрутов при $\eta_1 = 0,8$

ЛА ₁	А	6	4	7	24	12	10	21	22
ЛА ₂	В	17	14	16	18	13	1	19	2
ЛА ₃	С	9	3	8	11	20	23	15	5

Существенные различия в результатах табл. 3 и 4 говорят о принципиальной возможности применения генетического алгоритма для решения подобных задач, поскольку первоначальная «элита» содержит разных «предков», имеющих неодинаковые свойства. Для осуществления генетического отбора разобьем каждый маршрут на два блока – начало и конец, принадлежащих двум заявкам. Затем для каждого ЛА произведем скрещивание четырех блоков по принципу «каждый блок объединен с каждым из оставшихся», в результате общее число перестановок образует 9 вариантов. С помощью выражения (2) выберем один из 9 вариантов с минимальным значением штрафной функции, при этом зададимся значениями $T_0 = \tau_0 = 30$ мин, примерно соответствующим минимальному времени ожидания выполнения заявки при равенстве интересов спроса и предложения. С учетом показателей максимального времени ожидания и суммарной длины маршрутов T_{max} и L_{max} произведем вычисления по каждому из 9 вариантов. В результате для всех ЛА₁, ЛА₂, ЛА₃ сформированы новые маршруты, отличающиеся от значений в табл. 3 и 4.

Таблица 5

Оптимальная конфигурация маршрутов при генетическом отборе

ЛА ₁	А	6	4	7	24	17	14	15	5
ЛА ₂	В	12	10	21	22	13	17	19	2
ЛА ₃	С	9	3	8	11	20	23	15	18

Применение генетического алгоритма в данной задаче показало:

- для варианта 1 – для всех трех маршрутов максимальное время ожидания составило $T_{max} = 187$ из всех 12 значений, а длина пути соответственно $L_1 = 27, L_2 = 29, L_3 = 30$. Среднее значение эксплуатационных затрат $T_{cp} = 29$, а интегральная штрафная функция $J_v = 13020$;
- для варианта 2: $T_{max} = 165, T_{cp} = 34, J_v = 12500$;
- при генетическом отборе: $T_{max} = 155, T_{cp} = 36, J_v = 11470$.

Пример 2. Планирование кратковременных перелетов малой авиации при эвакуации вследствие чрезвычайной ситуации. Рассматривается случай, при котором местоположение заявок на обслуживание сосредоточено не по всей территории обслуживания, а в ее локальных местах. В частности, рассматривается случай эвакуации при наводнении (рис. 3).

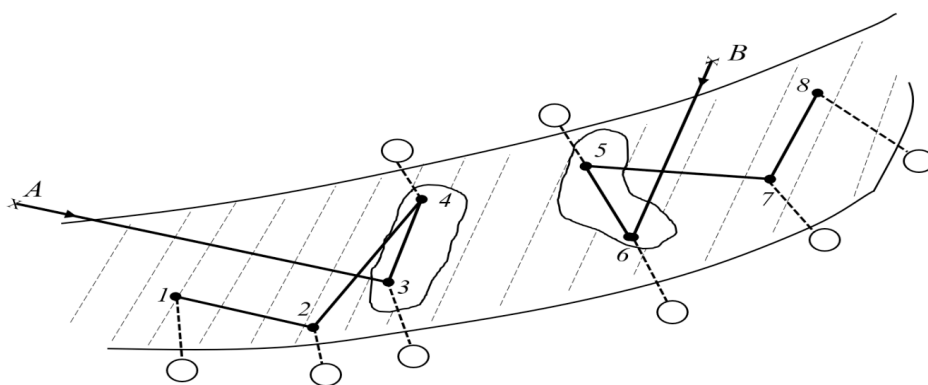


Рис. 3. Картина расположения наземных пунктов в районе наводнения

Расстояние между обслуживаемыми пунктами на порядок больше длины пути до базы сосредоточения эвакуированного населения. Картина расположения наземных пунктов в районе наводнения показана на рис. 3. В точках А и В указаны места стоянок двух ЛА перед вылетом. Знаком О – пункты прилета в безопасное место, пунктиром – кратковременные перелеты при эвакуации, непрерывными линиями – планируемые при маршрутизации перелеты с учетом обслуживания восьми пунктов.

Наибольшую опасность представляют пункты 3...6, находящиеся на островах. Максимальное расстояние между этими пунктами не превышает 50 км. Расстояние до пунктов эвакуации не более 10 км. Все координаты (X_j, Y_j) пунктов и стоянок известны. Принимаем скорость полета 120 км/ч или 2 км/мин.

Не менее существенной информацией в исходных данных решаемой задачи является время ожидания τ_j каждой заявки в очереди для эвакуации, зависящей от степени опасности. Значения τ_j для восьми заявок представлены в табл. 6.

Таблица 6

Данные по времени ожидания в очереди на эвакуацию

j	1	2	3	4	5	6	7	8
τ_j (мин)	10	20	100	75	70	100	40	50

Согласно предлагаемому подходу, решение задачи состоит в следующем:

– в условиях предпочтения сокращения эксплуатационных затрат при $m_i = 0,2$ по выражению 2 производится маршрутизация для двух ЛА $i=1,2$, в результате чего оценивается интегральная штрафная функция для первого случая;

– аналогичным образом для второго случая оценивается интегральная штрафная функция при $m_i = 0,8$ с приоритетным учетом интересов скорейшего перемещения людей в безопасное место;

– в связи с возникновением «элиты» из вариантов маршрутизации с помощью генетического отбора путем скрещивания и перестановок выявляется более эффективное решение для третьего случая и оценивается его эффективность.

При этом в каждом случае для $i = 1$ и одновременно для $i = 2$ с помощью формулы (1) для приоритета Π_j выбирается очередной пункт маршрута полета одного и другого ЛА, для чего, согласно вышесказанному, нужно задать значения $R_{min} = 20$ км, $\tau_{max} = 100$ мин.

Рассмотрим $m_i = 0,2$ и $i = 1$. Последовательное использование динамического приоритета Π_j при одновременном назначении пунктов для ЛА₁ и ЛА₂ позволило сформировать первый маршрут:

$$A-1-2-3-4, \quad (3)$$

который совпадает с результатами действий «жадного» алгоритма, выбирающего при вылете из пункта А очередной ближайший пункт (рис. 2.). Маршрут 3 характеризуется двумя параметрами: длиной пути $L_1=120$ км и $\tau_1=140$ мин. Планирование полета для второго ЛА ($i = 2$) определяет маршрут:

$$B-8-7-6-5, \quad (4)$$

что также соответствует действиям «жадного» алгоритма при вылете из пункта В. Маршруту (4) соответствуют параметры $L_2=190$ км, $\tau_2=148$ мин.

Исходя из полученных характеристик маршрутов 2 и 3, можно оценить интегральную штрафную функцию по формуле:

$$J_0 = \left[\max\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) + 20 \right] \left[\frac{L_1+L_2}{2v} + 20 \right] = 16490, \quad (5)$$

где $\frac{L_1+L_2}{2v}$ – штрафное время средних эксплуатационных затрат, а значения τ_1 и τ_2 определяются не только временем ожидания заявок до вылета, но и дополнительным временем полета ЛА от i -го начального пункта до обслуживаемого j -го пункта. В частности, в первом случае имеем: $\tau_1 = 150$, $\tau_2 = 148$.

При аналогичных действиях во втором случае формируются следующие маршруты со своими штрафными параметрами:

$$\begin{aligned} & \text{– для } i = 1, A-4-3-2-1, L_1 = 140 \text{ км, } \tau_1 = 140 \text{ мин;} \\ & \text{– для } i = 2, B-5-6-7-8, L_2 = 160 \text{ км, } \tau_2 = 145 \text{ мин.} \end{aligned} \quad (6)$$

Характер полученных маршрутов (6) указывает на то, что их вид в точности соответствует режиму назначения пунктов, принятому в теории массового обслуживания заявок по принципу «первым пришел – первым обслужен». Для оценки эффективности этого принципа для нашей задачи определим вторую интегральную штрафную функцию

$$J_0 = \left[\max\left(\frac{140}{145}\right) + 20 \right] \left[\frac{140+160}{4} + 20 \right] = 15840. \quad (7)$$

В третьем случае находим компромиссное решение между «жадным» алгоритмом и правилом приоритетного обслуживания заявок с максимальным временем ожидания, используя для этого операции скрещивания и перестановок на основе генетического алгоритма. Для этого разобьем каждый маршрут на два блока, содержащих два пункта, в результате чего получим: для $i = 1$, 1–2, 3–4, 4–3, 2–1, а для $i = 2$, 8–7, 6–5, 5–6, 7–8.

Таким образом удалось сформировать новые маршруты, не совпадающие с предыдущими:

- для $i = 1$, А–3–4–2–1, $L_1 = 130$ км, $\tau_1 = 125$ мин,
- для $i = 2$, В–6–5–7–8, $L_2 = 200$ км, $\tau_2 = 130$ мин.

(8)

С помощью полученных параметров маршрутов (8) получаем третью интегральную штрафную функцию:

$$J_0 = \left[\max \left(\frac{125}{130} \right) + 20 \right] \left[\frac{130+200}{4} + 20 \right] = 15700. \quad (9)$$

При сравнении результатов, полученных в трех вариантах маршрутизации, очевидно, что при генетическом отборе максимальное время ожидания сократилось на 11 % по сравнению с наилучшим показателем при незначительном увеличении эксплуатационных затрат, что имеет меньший приоритет при эвакуации населения.

В заключение необходимо отметить, что, несмотря на относительную простоту оптимизации из-за малой размерности решаемых задач, генетический алгоритм оказался эффективнее за счет следующих факторов:

- низкая трудоемкость вычислений за счет рационального выбора первоначальной «элиты» и ограниченного числа вариантов при комбинировании не самих элементов, а малого числа блоков при их «скрещивании»;
- результаты улучшения качества планирования становятся известными уже на первых шагах эволюции, а не в их конце, как это происходит при полном переборе всех вариантов.

Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотрена задача многомерной маршрутизации полетов летательных аппаратов при обслуживании заявок «по вызову» в условиях повышенной навигационной точности, обеспечивающей полную осведомленность о текущем местоположении ЛА на стоянках и в воздухе.

2. Предложен подход к решению задачи, основанный на сочетании генетического алгоритма с групповым целераспределением заявок между маршрутами, который учитывает не только свободные, но и занятые ЛА, находящиеся ближе к пункту прилета.

3. Установлено, что за счет удачного формирования первоначальной «элиты» маршрутов с помощью специального мультипликативного критерия и их последующего скрещивания в генетическом алгоритме, повышение эффективности планирования обеспечивается за малое число «шагов эволюции».

4. Главное отличие используемой в генетическом отборе интегральной штрафной функции состоит в том, что одним из показателей является не среднее, а максимальное время ожидания любой заявки в очереди, которое минимизируется при выборе окончательного варианта. Это соответствует принципу гарантированного результата как наиболее приемлемого для заказчика (особенно в экстренных ситуациях).

5. Разработанная компьютерная программа моделирования процессов появления и обслуживания заявок, а также расчеты при оптимизации многомерных маршрутов позволяют

оценить итоговое значение минимизируемых штрафных функций, различать режимы «простоя» ЛА на стоянках и «пиковые» режимы с ожиданием выполнения заявок в очереди.

6. Показано, что в случае пуассоновского распределения заявок по всей площади обслуживаемой территории положительный эффект от оптимизации маршрутов невелик вследствие влияния заказчика в половине случаев на реализацию своей заявки независимо от планирования.

7. В случае экстренного обслуживания пунктов, сосредоточенных в отдельных значимых участках территории, установлено существенное улучшение качества маршрутизации. При этом максимальное время ожидания выполнения заявок сократилось на 15–20 % по сравнению с известным методом маршрутизации с помощью «жадного» алгоритма.

*Работа выполнена при материальной поддержке РФФИ
(грант 19-08-00010 и грант 20-08-00652)*

ЛИТЕРАТУРА

1. Соболев Е.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Наука, 1981. 110 с.
2. Луговая А.В., Коновалов А.Е. Совместное принятие решения о потоках прилета и вылета ВС при организации воздушного движения // Научный вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20. № 4. С. 8–15.
3. Лебедев Г.Н., Малыгин В.Б. Формирование частных критериев эффективности А-CDM с учетом интересов участников процесса принятия решений в динамической обстановке // Научный вестник МГТУ ГА. 2019. № 23. С. 53–64.
4. Саати Т.Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. Перевод с английского Е.Г. Коваленко. Под редакцией И.Н. Коваленко и Р.Д. Когана. М.: Советское радио, 1965. 510 с.
5. Михайлин Д.А., Аллилуева Н.В., Руденко Э.М. Сравнительный анализ эффективности генетических алгоритмов маршрутизации полета с учетом их различной вычислительной трудоемкости и многокритериальности решаемых задач // Труды МАИ. 2017. №98. <http://trudymai.ru/published.php?ID=90386>.
6. Алиев Т.И. Основы моделирования дискретных систем. СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. 363 с.
7. Евдокименков В.Н., Красильщиков М.Н., Себряков Г.Г., Ляпин Н.А. Алгоритмы и программно-математическое обеспечение бортовой компоненты распределенной системы интеллектуального управления группой беспилотных летательных аппаратов // Методы и модели искусственного интеллекта и их приложения в компьютерной лингвистике, нейрофизиологических исследованиях и медицине. Фундаментальные проблемы группового взаимодействия роботов: материалы научных сессий. 2019. С. 141–143.
8. Гончаренко В. И., Лебедев Г. Н., Румакина А.В. Модификация метода ветвей и границ для двумерной маршрутизации координированного полета группы летательных аппаратов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Том 17. № 11. С. 783–791.
9. Ким Н.В., Крылов И.Г. Групповое применение беспилотного летательного аппарата в задачах наблюдения // Труды МАИ. 2012. № 62. <http://mai.ru/upload/iblock/bbb/grupповое-primeneniye-bespilotnogo-letatel'nogo-apparata-v-zadachakh-nablyudeniya.pdf>.
10. Андреев М.А., Миллер А.Б., Миллер Б.М., Степанян К.В. Планирование траектории беспилотного летательного аппарата в сложных условиях при наличии угроз // Теория и системы управления. 2012. № 2. С. 166–176.
11. Гончаренко В.И., Рожнов А.В., Теплов Г.И. Планирование и координация маршрутов полета беспилотных авиационных систем в интересах организации и оценки качества систем подвижной связи // Распределенные компьютерные и телекоммуникационные сети: управление, вычисление, связь: материалы 21-й Международной научной конференции (DCCN-2018, Москва). М.: РУДН, 2018. С. 220–229.

12. Ozlem Sahin Meric. Optimum Arrival Routes for Flight Efficiency // *Journal of Power and Energy Engineering*. 2015. No. 3. P. 449–452.

13. Ребров В.А., Рудельсон Л.Е., Черникова М.А. Модель сбора и обработки заявок на полеты в задаче планирования авиарейсов // *Теория и системы управления*. 2007. № 3. С. 97–111.

14. Левин А.В. Жадные методы – Алгоритм Дейкстры // *Алгоритмы. Введение в разработку и анализ*. Introduction to The Design and Analysis of Algorithms. М.: Вильямс, 2006. С. 189–195.

REFERENCES

1. Sobol E.M., Statnikov R.B. *Vybor optimal'nykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriyami* [Selection of the optimum parameters in the tasks with many criteria]. Moscow, Nauka Publ., 1981, 110 p (In Russian).

2. Lugovaya A.V., Konovalov, A.E. Collaborative decision-making on arrival and departure flows during air traffic. *Nauchnyj vestnik MGTU GA = Scientific Herald of MSTU CA*, 2017, v. 20, no. 4. pp. 8–15. (In Russian).

3. Lebedev G., Malygin V. Creating private criteria for A-CDM effectiveness to consider the interests of decision-making participants in a dynamic environment. *Nauchnyj vestnik MGTU GA = Civil Aviation High Technologies*, 2019, no. 23, pp.53–64. (In Russian).

4. Saati T.L. *Ehlementy teorii massovogo obsluzhivaniya i ee prilozheniya* [Elements of the queuing theory and its application]. Transfer from English E.G. Kovalenko. Edited by I.N. Kovalenko and R.D. Kogan. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1965, 510 p. (In Russian).

5. Mikhailin D., Alliluyeva N., Rudenko E. Comparative analysis of the effectiveness of genetic flight routing algorithms, considering their different computational laboriousness and multi-criteria of tasks to be solved. *Trudy MAI = Works of MAI*, 2017, no. 98. <http://trudymai.ru/published.php?ID=90386>. (In Russian).

6. Aliev T.I. *Osnovy modelirovaniya diskretnykh system* [Bases of the simulation of discrete systems]. St. Petersburg. SPb GU ITMO Publ., 2009, 363 p. (In Russian).

7. Evdokimenkov V.N., Krasilschikov M.N., Sebyakov G.G., Lyapin N.A. Algorithms and mathematical programmed software of an airborne component of the distributed system for intellectual control with the group of unmanned flying vehicles. *Metody i modeli iskusstvennogo intellekta i ikh prilozheniya v komp'yuternoy lingvistike, nejrophysiologicheskikh issledovaniyakh v meditsine. Fundamental'nye problemy gruppovogo vzaimodejstviya robotov. Materialy nauchnykh sessij* [Methods and the model of the artificial intellect and their application in the computer linguistics, neurophysiological studies, and medicine. Fundamental problems of group interaction of the robots: the materials of scientific sessions]. 2019, pp.141–143. (In Russian).

8. Goncharenko V. I., Lebedev G. N., Roumakina A. V. Modification of the Integer Branch and Bound Method for Solving of a Two-Dimensional Routing Task of an Aircraft Group's Coordinated Flight. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie = Mechatronics, Automation, Control*, 2016, vol. 17, no. 11, pp. 783–791. (In Russian).

9. Kim N.V., Krylov I.G. Group application of an unmanned flying vehicle in the tasks of observation. *Trudy MAI = Works of MAI*, 2012, no. 62. <http://mai.ru/upload/iblock/bbb/gruppovoe-primenenie-bespilotnogo-letatel'nogo-apparata-v-zadachakh-nablyudeniya.pdf>. (In Russian).

10. Andreev M.A., Miller A.B., Miller B.M., Stepanyan K.V. Planning the trajectory of unmanned flying vehicle under difficult conditions with the presence of the threats. *Teoriya i sistemy upravleniya = Theory and control systems*, 2012, no. 2, pp. 166–176. (In Russian).

11. Goncharenko V.I., Rozhnov A.V., Teplov G.I. Planning and the coordination of the flight courses of pilotless aviation systems in the interests of organization and estimation of the quality of the systems of mobile service. *Raspredelennye komp'yuternye i telekommunikatsionnye seti. Upravlenie, vychislenie, svyaz'. Materialy 21 Mezhdunarodnoj nauchnoj konferentsii* [The distributed computer and telecommunication networks: control, calculation, the connection. The materials of 21 international scientific conference (DCCN-2018, Moscow). Moscow, RUDN Publ., 2018, pp. 220–229. (In Russian).

12. Ozlem Sahin Meric. Optimum Arrival Routes for Flight Efficiency. Journal of Power and Energy Engineering, 2015, no. 3, pp. 449–452.

13. Rebrov V.A., Rudelson L.E., Chernikova M.A. Model of collection and working of flight notifications in the planning problem of air flights. *Teoriya i sistemy upravleniya = Theory and control systems*, 2007, no. 3, pp. 97–111. (In Russian).

14. Levin A.V. *Zhadnye metody – Algoritm Dejkstry* [Greedy methods – Algorithm Deixtry]. Introduction to The Design and Analysis of Algorithms. Moscow. Williams Publ., 2006, pp.189–195. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Лебедев Георгий Николаевич, доктор технических наук, профессор кафедры систем автоматического и интеллектуального управления, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, 4, Москва, Российская Федерация, 125993; e-mail: kaf301@mail.ru.

Малыгин Вячеслав Борисович, начальник тренажерного центра кафедры управления воздушным движением, Московский государственный технический университет гражданской авиации, Кронштадтский бульвар, 20, Москва, Российская Федерация, 125993; e-mail: mbv898@ya.ru.

Михайлин Денис Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры систем автоматического и интеллектуального управления, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, 4, Москва, Российская Федерация, 125993; e-mail: kaf301@mail.ru.

Румакина Алена Владимировна, старший преподаватель кафедры систем автоматического и интеллектуального управления, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, 4, Москва, Российская Федерация, 125993; e-mail: kaf301@mail.ru.

ABOUT THE AUTHORS

Lebedev Georgy N., Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Systems of Automatic and Intellectual Management, Moscow Aviation Institute (National Research University), Volokolamskoe highway 4, 125993 Moscow, Russian Federation; e-mail: kaf301@mail.ru.

Malygin Vyacheslav B., Head of the Training Center of the Chair of Air Traffic Control, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Kronstadt avenue, 20, 125993 Moscow, Russian Federation; mbv898@ya.ru.

Mikhailin Denis V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Systems of Automatic and Intellectual Management, Moscow Aviation Institute (National Research University), Volokolamskoe highway, 4, 125993 Moscow, Russian Federation; e-mail: kaf301@mail.ru.

Roumakina Alena V., Senior Lecturer of the Department of Systems of Automatic and Intellectual Management, Moscow Aviation Institute (National Research University), Volokolamskoe highway, 4, 125993 Moscow, Russian Federation; e-mail: kaf301@mail.ru.

УДК 629.73.01

НОВЫЙ ПОДХОД К РЕАЛИЗАЦИИ ПРИНЦИПОВ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Д.С. ВАВИЛОВ^{1,2}, В.Н. ЕВДОКИМЕНКОВ², А.В. КАН^{1,2}, В.В. КРОПОВА³,
Н.Б. ТОПОРОВ^{1,2}, В.С. ШАПКИН¹

¹ *Национальный исследовательский центр «Институт им. Н.Е. Жуковского»,
г. Москва, Российская Федерация*

² *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва, Российская Федерация*

³ *Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем,
г. Москва, Российская Федерация*

Аннотация. В статье рассматривается новый подход к расширенной концепции функционального проектирования на основе анализа располагаемого в настоящее время информационного базиса, который может быть использован при формировании соответствующих проблемно-ориентированных баз знаний. Данный информационный базис включает в себя приоритетные цели и задачи развития авиационной техники, формализованное представление целевых задач, а также взаимосвязь функциональных требований и технических решений, используемых при создании перспективных образцов. Вопросы представления знаний и используемых методов оперирования ими к настоящему времени в достаточной степени проработаны. Предложена архитектура автоматизированной системы функционального проектирования авиационной техники (АТ) как системы поддержки принятия решений, включающей три относительно независимых функциональных блока, также представляющих собой систему поддержки принятия решений (СППР). При этом в зависимости от масштабности проводимых исследований функционал СППР функционального проектирования (ФП) АТ может использоваться в полной мере, если речь идет о проведении комплексных исследований по формированию требований к перспективной технике, ее рациональному составу и функционально-техническому облику, или частично, когда решается только задача выбора рационального варианта технических решений из располагаемого их перечня при проектировании АТ в соответствии с заданным (ранее сформированным) техническим заданием.

Ключевые слова: авиационная техника, функциональное проектирование, система поддержки принятия решений, автоматизированные системы, база знаний, альтернативы, сложная техническая система, перспективные образцы

A NEW APPROACH TO IMPLEMENTATION OF THE IDEA OF FUNCTIONAL DESIGN PRINCIPLES

D.S. VAVILOV^{1,2}, V.N. EVDOKIMENKOV², A.V. KAN^{1,2}, V.V. KROPOVA³,
N.B. TOPOROV^{1,2}, V.S. SHAPKIN¹

¹ *National Research Center «Institute named after N.E. Zhukovsky», Moscow, Russian Federation*

² *Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation*

³ *State Research Institute of Aviation Systems, Moscow, Russian Federation*

Abstract. The article considers a new approach to the extended concept of functional design based on the analysis of the currently available information base, which can be used in the formation of appropriate problem-

oriented knowledge bases. This information basis includes the priority goals and objectives of the development of aviation technique, a formalized representation of the objectives, as well as the relationship of functional requirements and technical solutions used in the creation of promising models. The issues of knowledge representation and the methods used to operate on them have been sufficiently worked out to date. The architecture of the automated system of functional design of aviation technique as a decision support system is proposed, which includes three relatively independent functional blocks, also representing a decision support system (DSS). At the same time, depending on the scale of the research carried out, the functional of the DSS FP AT can be used in full if it is a question of conducting complex studies on the formation of requirements for promising technique, its rational composition and functional and technical appearance, or partially, when only the problem of choosing a rational variant of technical solutions from their available list is solved when designing AT in accordance with a given (previously formed) technical task.

Keywords: aviation technique, functional design, decision support system, automated systems, aviation engineering, functional design, decision support system, automated systems, knowledge base, alternatives, complex technical system, promising samples

Введение

На современном этапе научно-технологического развития авиационной отрасли особую актуальность приобретает необходимость принятия управленческих решений, направленных на повышение эффективности научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Новые технологии авиастроения создаются для улучшения характеристик перспективной авиационной техники. Однако желательные направления этого улучшения и количественное его измерение определяются на уровне надсистем, т.е. систем более высокого уровня, – авиатранспортной системы в гражданской сфере и воздушно-космических сил в военной сфере. В свою очередь, эти системы являются подсистемами, выполняющими определенные функции, соответственно, в единой транспортной системе (где воздушный транспорт является лишь одним из видов транспорта) и в вооруженных силах страны (где воздушно-космические силы являются лишь одним из видов). Их характеристики и выполняемые ими функции в системах более высокого уровня иерархии должны соответствовать рациональному месту авиации в национальной экономике и национальной обороне.

Из сказанного следует, что требуются новые подходы к реализации технологии проектирования перспективных образцов авиационной техники. В данном случае речь идет о новом подходе к реализации принципов функционального проектирования сложных технических систем (СТС).

Общие положения

В настоящее время общепризнанным является подход к формированию облика перспективных образцов техники (в данном случае – авиационной техники) на основе выбора наилучшего (в соответствии с принятой системой критериев) варианта на сформированном множестве альтернативных вариантов разрабатываемого образца.

В этой связи правомерен вопрос о полноте множества альтернатив, а в случае обеспечения этой полноты за счет рассмотрения всех возможных сочетаний значений определяющих параметров – о физической возможности и целесообразности (с точки зрения затрачиваемых человеческих и машинных ресурсов) переработки такого объема информации.

Другими словами, актуальной и практически значимой становится задача разработки такого метода (способа, алгоритма, процедуры) генерации альтернатив [1], в результате применения которого порождалось бы, с одной стороны, обозримое (по трудоемкости исследований) множество вариантов, а с другой стороны, это множество могло бы считаться представительным (представительная выборка) [2] с точки зрения состоятельности получаемых

в конечном итоге результатов, их адекватности прогнозируемым целям, задачам, условиям создания и применения авиационной техники (АТ).

Процесс генерации альтернатив, обладающих указанными выше свойствами (ограниченность, представительность), может быть декомпозирован на два подпроцесса, различающихся содержанием выполняемых операций.

Во-первых, речь идет о генерации возможных комбинаций технических решений, определяющих облик проектируемого образца АТ; во-вторых, – о проектировании образца АТ на базе технических решений, включенных в состав рассматриваемой комбинации. Первую составляющую процесса генерации альтернатив можно отнести к этапу проектирования АТ, который попадает под определение «функциональное проектирование».

Поскольку разными авторами даются различные трактовки понятия «функциональное проектирование», в данном случае под функциональным проектированием будем понимать процесс управляемой генерации возможных (с точки зрения реализации функциональных требований к образцу АТ) комбинаций технических решений, каждой из которых соответствует альтернативный вариант проектируемого образца АТ. При этом количество комбинаций ограничено в силу направленности процедуры их формирования. Направленность определяется задачами, для решения которых предполагается использовать проектируемый образец АТ, приоритетными направлениями развития вида АТ, к которому принадлежит разрабатываемый образец, существующими и перспективными технологиями (техническими решениями) реализации функциональных требований к АТ.

Информационный базис, на основе которого выстраивается процедура функционального проектирования

Представляется целесообразным при реализации концепции функционального проектирования использовать тот в большей или меньшей степени проработанный задел, который имеется в области понимания [3, 4]:

- целей, приоритетных направлений, задач создания научно-технического задела (НТЗ) в области гражданского и военного авиастроения;

- целевых задач, возлагаемых на авиацию в интересах обеспечения обороны и безопасности страны, а также решения жизненно важных для страны проблем в гражданской сфере;

- взаимосвязи требований к функциональным качествам АТ и технических, и технологических решений, за счет которых эти качества могут быть обеспечены.

Рассмотрим далее, как существующие наработки в указанных областях могут быть использованы в процессе реализации функционального подхода к проектированию АТ.

Приоритетные требования и задачи развития авиационной техники. В ходе совместной работы группы экспертов, включавшей представителей научно-исследовательских организаций прикладной науки, промышленности и военных научных организаций, были сформулированы, обоснованы, утверждены основные цели, приоритетные направления, задачи развития авиации в гражданской и военной сферах, а также целевые показатели развития и необходимая для страны динамика поэтапного изменения значений этих показателей.

В частности, для гражданской авиации в качестве основных целей создания НТЗ были определены: безопасность полетов, комфортность, экономическая и физическая доступность, экологичность, т.е. соответствие АТ российского производства перспективным экологическим требованиям. Приоритетными направлениями достижения, например, такой цели как безопасность являются: повышение наработки на отказ, обеспечение достоверного контроля состояния воздушных судов бортовыми средствами, достижение высокого уровня ситуационной осведомленности экипажа о фактических условиях полета и др.

Итак, речь идет об информации, которая может быть использована в качестве фильтра для отсеивания заведомо неперспективных направлений формирования альтернативных вариантов разрабатываемого образца АТ. Понятно, что эта информация со временем может уточняться и детализироваться. Важным является тот факт, что, как показывает практика, определенные позиции могут быть сформулированы, обоснованы, согласованы и приняты на экспертном уровне.

Для того, чтобы быть использованными в рамках будущей автоматизированной системы функционального проектирования АТ, сведения о целях создания НТЗ, приоритетных направлениях и задачах по достижению поставленных целей, интегральных показателях уровня достижения этих целей должны быть единообразно формализованы и представлены в соответствующей базе знаний.

Формализованное представление целевых задач. Элементарные операции. Несмотря на большое разнообразие целевых задач, решаемых и гражданской, и военной авиацией (мониторинг, разведка, доставка грузов, перевозка пассажиров и т.д.), по типу выполняемых действий (элементарных операций или микроопераций): техническое обслуживание, взлет/посадка, загрузка/выгрузка, набор высоты/снижение, горизонтальный полет и т.д. – целевые задачи отличаются только составом элементарных операций из заданного (предварительно сформированного) их перечня. Эти элементарные операции должны быть реализованы в ходе выполнения каждой конкретной целевой задачи. Другими словами, каждая целевая задача представляется как некоторая макрооперация, включающая в качестве составных частей стандартизованные микрооперации.

Для чего нужен переход от привычных формулировок решаемых задач к их представлению в виде макроопераций, формируемых на базе стандартного набора элементарных операций? С каждой элементарной формально описанной операцией в соответствующем программном комплексе могут быть связаны в случае необходимости вычислительные модули и модули, оперирующие с ограничениями и приоритетными требованиями, речь о которых шла ранее. Таким образом осуществляется привязка решаемых целевых задач к базам знаний и программному обеспечению будущей автоматизированной системы функционального проектирования АТ. Представленная в виде формализованной макрооперации целевая задача становится объектом обработки средствами автоматизированной системы.

Взаимосвязь функциональных требований и технических решений. Третьей составляющей информационного базиса является описание того, за счет каких технических решений может быть реализовано то или иное функциональное требование к перспективному образцу АТ. Например, требование расширения условий базирования, которое хотя и в силу разных причин актуально и для гражданской, и для военной авиации, связано с реализацией технических решений, направленных, в частности, на обеспечение короткого или вертикального взлета и посадки, что, в свою очередь, может обеспечиваться за счет использования таких способов реализации этих решений, как уменьшение взлетной массы (массы конструкции, массы топлива), увеличение тяги двигателей, применение сложной механизации крыла и др. При этом возможно множество «вложенных» уровней, что должно найти отражение как в базе знаний [5], на основании которой формируется соответствующий набор технических решений, так и в базе расчетных модулей, с использованием которых определяется реализуемость технических решений при разработке образца АТ.

Система информационно-аналитической поддержки процесса функционального проектирования авиационной техники

Принимая во внимание сказанное выше, в состав автоматизированной системы, поддерживающей технологию функционального проектирования, целесообразно включить три проблемно-ориентируемые системы поддержки принятия решений (СППР), а именно:

– систему поддержки принятия решений, информационно-программные средства которой обеспечивают преобразование любой целевой задачи, поступающей на ее вход, в формализованное представление в виде набора элементарных операций из числа тех, что представлены в базе знаний (СППР формирования макроопераций или СППР ФМО);

– систему поддержки принятия решений, информационно-программные средства которой обеспечивают сопоставление каждой сформированной в СППР ФМО макрооперации соответствующего набора функциональных требований из числа представленных в базе знаний (СППР формирования функциональных требований или СППР ФФТ);

– систему поддержки принятия решений, информационно-программные средства которой обеспечивают сопоставление сформированному в СППР ФФТ набору функциональных требований множество альтернативных вариантов комбинаций технических решений, с одной стороны, позволяющих запустить процесс проектирования образца АТ, а с другой стороны, различающихся выбором из числа предусмотренных в системе конкретных технических решений для реализации каждого функционального требования (СППР формирования комбинаций технических решений или СППР ФТР).

Системы СППР ФМО, СППР ФФТ, СППР ФТР являются составляющими функционально- и пространственно- распределенной системы поддержки процесса функционального проектирования АТ (СППР ФП АТ), состав и структура которой представлены на рис. 1.



Рис. 1. Состав и структура системы поддержки процесса функционального проектирования АТ

Назначение СППР ФП АТ – обеспечить формирование ограниченного, т.е. доступного для анализа с точки зрения привлекаемых ресурсов, числа комбинаций технических решений, позволяющих квалифицированно сформировать множество альтернативных вариантов проектируемого образца АТ, среди элементов которого с большой долей уверенности следует ожидать присутствия искомого наилучшего варианта. Уверенность в достижимости желаемого результата в обозримое время в условиях всегда ограниченных ресурсов основывается, как уже говорилось, на содержании самой процедуры поиска решения.

Для оценки значений целевых показателей для каждого из сформированных с привлечением комплекса моделей проектирования альтернативных вариантов разрабатываемого

образца АТ могут использоваться как экспертные методы, так и моделирующие комплексы оценки эффективности целевого применения АТ, стоимости жизненного цикла, рисков реализации проектов создания АТ.

Общая схема проведения исследований по формированию рационального варианта проектируемого образца АТ представлена на рис 2.

Помимо СППР ФП АТ в состав интегрированной распределенной среды проектирования и моделирования АТ по крайней мере должны быть включены:

- комплекс моделей проектирования ЛА;
- комплекс моделей функционирования и оценки целевой эффективности либо группировки авиационных боевых комплексов (АБК), если речь идет о военной авиации, либо парка воздушных судов (ВС) гражданской авиации;
- комплекс моделей оценки стоимости жизненного цикла АТ;
- комплекс моделей оценки рисков создания АТ.

Построению и реализации указанных комплексов посвящен целый ряд работ, в том числе и изложенные в [6–10].

Представленная на рис. 2 схема исследований с известной долей приближения отражает сложившуюся к настоящему времени технологию внешнего (концептуального) проектирования АТ и призвана показать место и роль СППР ФП АТ в общем комплексе исследований, связанных с созданием новой техники.



Рис. 2. Место и роль СППР ФП АТ в общем комплексе исследований, связанных с созданием новой техники

Функционал СППР ФП АТ в полной мере может быть использован именно в контуре внешнего проектирования АТ, когда фактически формируются и требования к АТ, и функционально-технический облик АТ, удовлетворяющий сформированным требованиям.

Если техническое задание на создание нового образца АТ сформировано и задано к исполнению, функционал СППР ФП АТ может быть использован лишь частично, а именно, в части, касающейся СППР ФТР.

Выводы

Таким образом, предложена расширенная трактовка понятия «функциональное проектирование». Помимо этапа формирования альтернативных вариантов технических решений, обеспечивающих создание перспективных образцов АТ в соответствии с заданными тактико-техническими требованиями, процесс функционального проектирования дополнен этапом формирования требований к создаваемой технике.

Процесс формирования требований к новой технике остается в настоящий момент наименее формализованным и в силу этого наименее автоматизированной составной частью общего комплекса исследований, направленных на обоснование приоритетных направлений развития АТ и формирование функционально-технического облика как перспективных образцов АТ, так и парка АТ в целом. Сложившаяся ситуация обусловлена тем, что проблема формирования требований к перспективной технике относится к классу слабоструктурированных проблем принятия решения и для ее решения оказывается недостаточным применение традиционно используемых в авиастроении подходов. Круг таких методик, методов, процедур должен быть расширен и прежде всего в него должен быть включен такой инструментарий исследований как системы, базирующиеся на знаниях и методах манипулирования знаниями.

Дано обоснование реализуемости расширенной концепции функционального проектирования на основе анализа располагаемого в настоящее время информационного базиса, который может быть использован при формировании соответствующих проблемно-ориентированных баз знаний. Вопросы представления знаний и используемых методов оперирования ими к настоящему времени в достаточной степени проработаны.

Предложена организация автоматизированной системы функционального проектирования АТ как системы поддержки принятия решений, включающей три относительно независимых функциональных блока, также представляющих собой СППР. При этом в зависимости от масштабности проводимых исследований функционал СППР ФП АТ может использоваться в полной мере, если речь идет о проведении комплексных исследований по формированию требований к перспективной технике, ее рациональному составу и функционально-техническому облику, или частично, когда решается только задача выбора рационального варианта технических решений из располагаемого их перечня при проектировании АТ в соответствии с заданным (ранее сформированным) техническим заданием.

ЛИТЕРАТУРА

1. Топоров Б.П., Горлов В.М. Проблемы формирования рационального облика и типажа сложных технических систем, функционирующих в условиях конфликта и неопределенностей // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: труды IV Международной конференции. Самара, 2002.
2. Гермейер Ю.Б. Введение в теорию исследования операций. М: Наука, 1971. 384 с.
3. Жеребин А.М., Кропова В.В. Приемлемые решения при синтезе сложных технических систем на этапе внешнего проектирования // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2018. № 1 (163). С. 40–43.
4. Дутов А.В., Сыпало К.И., Топоров Н.Б. Управление созданием научно-технического задела в авиастроении с использованием ситуационного моделирования // Полет. 2018. № 11. С. 77–86.
5. Сыпало К.И., Медведский А.Л., Казаринов Г.Г., Кан А.В. Методика формирования состава и структуры системы баз знаний // «АВИАЦИЯ И КОСМОНАВТИКА – 2017»: сборник трудов конференции. Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет). М.: Люксор, 2017.
6. Самойлович О.С. Формирование облика самолета в системе автоматизированного проектирования. М.: Воениздат, 1980.

7. Кропова В.В., Топоров Н.Б. Интегрированная среда моделирования и оценки эффективности ЛА // *Авиационные системы в XXI веке: сборник трудов юбилейной научно-технической конф.* Том 1. М.: ФГУП ГосНИИАС, 2006. С. 539–547.

8. Топоров Н.Б. Принципы и особенности технологии создания комплексов моделирования и поддержки принятия решений в области совершенствования технического оснащения государственной авиации // «Авиационные системы в XXI веке»: сборник трудов юбилейной всероссийской научно-технической конференции (Москва, 26-27 мая 2016 г.). М.: ФГУП ГосНИИАС, 2017. С. 124–129.

9. Евдокименков В.Н., Красильщиков М.Н. Концептуальная математическая модель информационно-управляющего поля как среды функционирования смешанных групп ЛА // *Полет*. 2010. № 7. С. 20–29.

10. Будзко В.И., Хорошилов А.А., Демин С.С., Кан А.В., Михайлин И.С., Шапкин В.С. Принципы, методы и технологии создания экспертной информационной системы оценки результативности научно-технического задела в области авиационной деятельности // *Научный вестник ГосНИИ ГА*. 2020. № 30. С. 67–77.

REFERENCES

1. Toporov B.P., Gorlov V.M. Problems of forming a rational appearance and type of complex technical systems operating in conditions of conflict and uncertainty. *Problemy upravleniya i modelirovaniya v slozhnykh sistemakh. Trudy IV Mezhdunarodnoj konferentsii* [Problems of control and modeling in complex systems». Proceedings of the IV International Conference]. Samara, 2002. (In Russian).

2. Germeyer Yu.B. *Vvedenie v teoriyu issledovaniya operatsij* [Introduction to the theory of operations research]. Moscow, Nauka Publ., 1971, 384 p. (In Russian).

3. Zherebin A.M., Kropova V. V. Acceptable solutions for the synthesis of complex technical systems at the stage of external design. *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologij = Bulletin of Computer and Information Technologies*. 2018, no. 1 (163), pp. 40–43. (In Russian).

4. Dutov A.V., Sypalo K.I., Toporov N.B. Management of the creation of a scientific and technical reserve in the aircraft industry using situational modeling. *Polet = Flight*, 2018, no. 11, pp. 77–86. (In Russian).

5. Sypalo K. I., Medvedsky A. L., Kazarinov G. G., Kan A.V. Methods of forming the composition and structure of the knowledge base system. «*Aviatsiya i kosmonavtika-2017*». *Sbornik trudov konferentsii* [Aviation And Cosmonautics-2017». Proceedings of the conference]. Moscow Aviation Institute (National Research University). Moscow, Luxor Publ., 2017. (In Russian).

6. Samojlovich O.S. *Formirovanie oblika samoleta v sisteme avtomatizirovannogo proektirovaniya* [The formation of the appearance of the aircraft in the computer-aided design system]. Moscow, Voenizdat Publ., 1980. (In Russian).

7. Kropova V.V., Toporov N.B. An integrated simulation environment and evaluation of the effectiveness of aircraft. *Aviatsionnye sistemy v XXI veke. Sbornik trudov yubilejnoj nauchno-tekhneskoj konferentsii. Tom 1.* [Aviation system in the XXI century. The proceedings of the anniversary scientific and technical conference. Volume 1]. Moscow, GosNIIAS Publ., 2006, pp.539–547. (In Russian).

8. Toporov N.B. The principles and features of technology of creation complex modeling and decision support in the field of improvement of technical equipment of the state aircraft. *Aviatsionnye sistemy v XXI veke. Sbornik trudov yubilejnoj vserossijskoj nauchno-tekhneskoj konferentsii*. [The Aviation system in the XXI century. Proceedings of the anniversary all-Russian scientific conference (Moscow, 26-27 may 2016). Moscow, GosNIIAS Publ., 2017, pp. 124–129. (In Russian).

9. Evdokimenkov V.N., Krasilshchikov M.N. A conceptual mathematical model of information-control field as the operation environment of mixed groups of aircraft. *Polet = Flight*, 2010, no. 7, pp. 20–29. (In Russian).

10. Budzko V.I., Khoroshilov A.A., Demin S.S., Kan A.V., Mikhailin I.S., Shapkin V.S. Principles, methods and technologies of creating an expert information system for evaluating the effectiveness of scientific

and technical reserve in the field of aviation activity. *Nauchnyj vestnik GosNII GA = Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2020, no. 30, pp. 67–77. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Вавилов Денис Сергеевич, начальник отделения «Ситуационное моделирование и системное проектирование авиационных систем» проектного комплекса «Ситуационное моделирование и интегрированные системы авиационных комплексов», старший преподаватель, МАИ ФГБУ Национальный исследовательский центр «Институт им. Н.Е. Жуковского», ул. Викторенко, д. 7, корп. 12, Москва, Российская Федерация, 123519; e-mail: vavilovds@nrczh.ru.

Евдокименков Вениамин Николаевич, доктор технических наук, заведующий кафедрой, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Волоколамское ш., д. 4, Москва, Российская Федерация, 123519; e-mail: vnevdokimenkov@gmail.com.

Кан Анна Владимировна, кандидат технических наук, начальник аналитического отдела департамента координации и сопровождения программ, ФГБУ Национальный исследовательский центр «Институт им. Н.Е. Жуковского», ул. Викторенко, д. 7, корп. 12, Москва, Российская Федерация, 123519; e-mail: avkan@nrczh.ru.

Кропова Валентина Владимировна, кандидат технических наук, начальник лаборатории ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», ул. Викторенко, д. 7, Москва, Российская Федерация e-mail: vvkropova@gosniias.ru.

Топоров Николай Борисович, доктор технических наук, директор проектного комплекса, заведующий кафедрой МАИ, ФГБУ Национальный исследовательский центр «Институт им. Н.Е. Жуковского», ул. Викторенко, д. 7, корп. 12, Москва, Российская Федерация, 123519; e-mail: toporovnb@nrczh.ru.

Шапкин Василий Сергеевич, лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, заслуженный работник транспорта РФ, доктор технических наук, профессор, первый заместитель генерального директора, ФГБУ Национальный исследовательский центр «Институт им. Н.Е. Жуковского», Правительство Российской Федерации, ул. Викторенко, д. 7, корп. 12, Москва, Российская Федерация, 123519; e-mail: shapkinvs@nrczh.ru.

ABOUT THE AUTHORS

Vavilov Denis S., Head of the Department «Situational Modeling and System Design of Aviation Systems» of the project complex «Situational Modeling and Integrated Systems of Aviation Complexes», Senior Lecturer of the National Research Center «Zhukovsky Institute», Viktorenko Street, 7, building 12, 123519 Moscow, Russian Federation; e-mail: vavilovds@nrczh.ru.

Evdokimenkov Veniamin N., Doctor of Technical Sciences, Head of the Department, Moscow Aviation Institute (National Research University), Volokolamskoe Highway, 4, 125993, Moscow, Russian Federation; e-mail: vnevdokimenkov@gmail.com.

Kan Anna V., Candidate of Technical Sciences, Head of the Analytical Department of the Department of Program Coordination and Support, National Research Center «Zhukovsky Institute», Viktorenko Street, 7, building 12, 123519 Moscow, Russian Federation; e-mail: avkan@nrczh.ru.

Kropova Valentina V., Candidate of Technical Sciences, Head of the Laboratory of the Federal State Unitary Enterprise «State Research Institute of Aviation Systems», Viktorenko Street, 7, 123519 Moscow, Russian Federation e-mail: vvkropova@gosniias.ru.

Toporov Nikolay B., Doctor of Technical Sciences, Director of the project complex, Head of the Department of MAI, FSBI National Research Center «Zhukovsky Institute», Viktorenko Street, 7, 123519 Moscow, Russian Federation; e-mail: toporovnb@nrczh.ru.

Shapkin Vasily S., Winner of the Russian Federation Government Award for Science and Technology, Honored Transport Worker of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor, First Deputy General Director, The National Researcher Center «Zhukovsky Institute», Government of the Russian Federation, Viktorenko Street, 7, building 12, 123519 Moscow, Russian Federation; e-mail: shapkinvs@nrczh.ru.

УДК 330.42:658.563

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАНЕВРИРОВАНИЯ РЕСУРСАМИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ АВИАСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

С.С. ДЕМИН, В.А. ВДОВИН, О.А. АФАНАСЬЕВА, В.В. КАЛАЧАНОВ

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
г. Москва, Российская Федерация*

Аннотация. В статье предложен новый подход к решению задачи повышения эффективности процессов обеспечения технологической оснасткой цехов авиастроительного предприятия или предприятия по ремонту и обслуживанию авиационной техники за счет включения процедуры маневрирования ресурсами в состав системы оперативного планирования работы подразделений инструментального хозяйства. Подход основан на координации оперативных планов работы складских служб и производственных подразделений инструментального хозяйства между собой и их согласовании с производственной программой основных цехов. В статье представлен математический аппарат процедуры, который включает модель идентификации проблемной ситуации при оценке обеспеченности производства технологической оснасткой и выбор соответствующей схемы расчетов. Для подготовки решений разработан комплекс математических моделей, включающий модели перераспределения складских запасов готовой оснастки, распределения ожидаемых поставок, а также управления движением заказов, нацеленных на наиболее полное использование готовой или уже находящейся в процессе изготовления оснастки, с целью минимизации отклонений по номенклатуре, объемам и срокам подачи оснастки в цеха-потребители. Целесообразность внедрения процедуры маневрирования в систему плановых расчетов продиктована необходимостью поиска резервов интенсификации использования ресурсов инструментального хозяйства в условиях ограниченности мощностей инструментальных цехов и динамичности потребности основного производства в технологической оснастке на этапе освоения новой техники, характерных для предприятий авиастроения.

Ключевые слова: инструментальное хозяйство предприятия, технологическая оснастка, процедура маневрированию ресурсами, комплекс математических моделей, оценка потребности, контроль обеспеченности, перераспределение запасов оснастки, распределения ожидаемых поставок, управление движением заказов

SIMULATING MANEUVERING PROCESSES RESOURCES FOR TOOL MANAGEMENT AIRCRAFT INDUSTRY ENTERPRISES

S.S. DEMIN, V.A. VDOVIN, O.A. AFANASIEVA, V.V. KALACHANOV

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

Abstract. The article proposes a new approach to solving the problem of increasing the efficiency of processes for providing technological equipment for aircraft manufacturing enterprises by including the procedure for maneuvering resources in the system of operational planning of work of the tooling farm. The approach is based on coordination of operational work plans of warehouse services and production divisions of the tooling farm among themselves and their coordination with the production program of the main workshops. The article presents the mathematical apparatus of the procedure, which includes a model for identifying a problem situation when assessing the availability of technological equipment for production and selecting the appropriate calculation scheme. To prepare solutions, a complex of mathematical models has been developed that includes models for

redistributing stocks of finished tooling, distributing expected deliveries, and managing the movement of orders aimed at making the most complete use of finished or already in the process of manufacturing tooling, in order to minimize deviations in the nomenclature, volumes, and delivery times of tooling to consumer workshops. The expediency of introducing the maneuvering procedure into the system of planned calculations is dictated by the need to search for reserves for intensifying the use of resources in conditions of limited capacity of tool shops and dynamic needs of the main production in industrial equipment at the stage of mastering new plane technology, typical for aircraft manufacturing enterprises.

Keywords: tooling farm of the enterprise, the industrial equipment, procedure for maneuvering resources, complex of mathematical models, requirement assessment, control of sufficiency, redistributing stocks of tooling, distributing expected deliveries, managing the movement of orders

Введение

Российская промышленность является одним из самых наукоемких секторов экономики, а авиапредприятия принадлежат к наиболее высокотехнологичной сфере с огромным количеством задействованных высококвалифицированных кадров.

Говоря об особенностях авиационной промышленности, следует отметить, что производственные предприятия отличаются от других характерными особенностями применяемой техники и технологий, используемых предметов труда, подготовкой рабочей силы. Данные предприятия выпускают чрезвычайно широкий круг изделий – десятки тысяч наименований и сотни тысяч типоразмеров – от простейших до сложнейших, состоящих из множества деталей и узлов, отличающихся высочайшей точностью изготовления.

Производственный процесс авиастроительного предприятия характеризуется относительно высокой сложностью, многостадийностью, многооперационностью, многообразием методов обработки, разнообразием используемых материалов и энергоносителей. Это требует применения разнообразного обрабатывающего оборудования, инструментов и оснастки, средств механизации и автоматизации производства. Технологические процессы отличаются достаточно высокой трудоемкостью и длительностью производственных циклов изготовления машин [1].

В таких областях как оперативное планирование, управление загрузкой производства и отражение хода выполнения работ часто используются информационные системы собственной разработки и технически устаревшие решения, что напрямую влияет на сроки выполнения заказов и себестоимость продукции.

Примером может служить программа для автоматизации расчета резервов сокращения сроков технологической подготовки производства на стадии проектирования технологической оснастки. Ускорение хода разработки конструкции оснастки может быть достигнуто путем моделирования, выявления и использования технологических резервов на данной стадии [2].

Актуальность технологического перевооружения предприятий авиастроения [3] диктуется влиянием, которое оказывает уровень оснащенности производственных процессов, протекающих в подразделениях предприятия, на его экономические показатели [4]. В целях решения данной проблемы акцент делается на моделирование информационных процессов и автоматизированную обработку данных, внедрение информационных систем на высокотехнологичных предприятиях авиастроения [5]. При этом основное внимание в теоретических исследованиях и практических разработках уделяется решению задач прогнозирования расхода и управления запасами технологической оснастки, оперативного планирования инструментального производства [6 – 9].

Вместе с тем, децентрализация запасов оснастки, расширение ее применяемости за счет унификации технологических процессов изготовления продукции, наличие партий, находящихся в незавершенном производстве инструментальных цехов, создают на авиационных заводах предпосылки для маневрирования данными видами ресурсов инструментального хозяйства [10].

Цель маневрирования – устранение или сокращение отклонений в обеспеченности производственного процесса оснасткой путем их компенсации за счет использования ресурсов, сосредоточенных в запасах основных цехов и в заделах инструментального производства.

Особую значимость для решения задачи сокращения отклонений, возникающих при перегрузке инструментальных цехов заказами на изготовление оснастки в период освоения новых изделий, имеет маневрирование запасами. Удовлетворение потребности планового месяца в этом случае возможно за счет передачи части готовой оснастки или переадресации ожидаемых поставок из цехов, имеющих излишки оснащения, цехам, в которых наблюдается «дефицит». Кроме того, за счет передачи излишков, ускорения выпуска оснастки, находящейся в незавершенном производстве, появляется возможность частичного или полного устранения «дефицита», обусловленного рассогласованием требуемых и ожидаемых сроков поставок.

Подготовка и реализация маневра требует включения в процедуру оперативного планирования деятельности инструментального хозяйства (ИНХ) комплекса расчетов, обеспечивающих обоснование решений по следующим направлениям:

- перераспределение запасов готовой оснастки между цехами;
- распределение ожидаемых поставок оснастки;
- управление движением заказов на оснастку, находящихся в незавершенном производстве.

Модель идентификации проблемной ситуации

Исходным моментом при подготовке решений по маневрированию является установление и оценка отклонений в обеспеченности программы работы в основных цехах различными типоразмерами оснастки.

Для оценки величины и типа отклонений предусматриваются расчеты (табл. 1) по параметрам, характеризующим уровень запасов оснастки в цехах-потребителях авиапредприятий.

Таблица 1

Модель идентификации проблемной ситуации при оценке обеспеченности производства технологической оснасткой на авиапредприятиях

Уровень агрегирования отклонений		Тип отклонения	
во времени	в пространстве	дефицит	излишки
по плановому периоду в целом	цех	фактические отклонения	
		$\Delta_{kj}^-(\max) = P_{kj}^{\max} - U_{kj},$ при $P_{kj}^{\max} > U_{kj}$ $\Delta_{kj}^-(\min) = P_{kj}^{\min} - U_{kj},$ при $P_{kj}^{\min} > U_{kj}$	$\Delta_{kj}^+(\max) = U_{kj} - P_{kj}^{\max},$ при $P_{kj}^{\max} \leq U_{kj}$ $\Delta_{kj}^+(\min) = U_{kj} - P_{kj}^{\min},$ при $P_{kj}^{\min} \leq U_{kj}$
		ожидаемые отклонения (с учетом поставок)	
		$\Omega_{kj}^-(\max) = P_{kj}^{\max} - (U_{kj} + n_{kj}^{z1}),$ при $P_{kj}^{\max} > U_{kj} + n_{kj}^{z1}$ $\Omega_{kj}^-(\min) = P_{kj}^{\min} - (U_{kj} + n_{kj}^{z1}),$ при $P_{kj}^{\min} > U_{kj} + n_{kj}^{z1}$	$\Omega_{kj}^+(\max) = (U_{kj} + n_{kj}^{z1}) - P_{kj}^{\max},$ при $P_{kj}^{\max} \leq U_{kj} + n_{kj}^{z1}$ $\Omega_{kj}^+(\min) = (U_{kj} + n_{kj}^{z1}) - P_{kj}^{\min},$ при $P_{kj}^{\min} \leq U_{kj} + n_{kj}^{z1}$

Продолжение таблицы 1

		фактические отклонения	
		$\Delta_{k(\max)}^- = \sum_j \Delta_{kj(\max)}^-$, $\forall_j, \exists \{\Delta_{kj(\max)}^-\}$ $\Delta_{k(\min)}^- = \sum_j \Delta_{kj(\min)}^-$, $\forall_j, \exists \{\Delta_{kj(\min)}^-\}$	$\Delta_{k(\max)}^+ = \sum_j \Delta_{kj(\max)}^+$, $\forall_j, \exists \{\Delta_{kj(\max)}^+\}$ $\Delta_{k(\min)}^+ = \sum_j \Delta_{kj(\min)}^+$, $\forall_j, \exists \{\Delta_{kj(\min)}^+\}$
	завод	ожидаемые отклонения (с учетом поставок)	
		$\Omega_{k(\max)}^- = \sum_j \Omega_{kj(\max)}^-$, $\forall_j, \exists \{\Omega_{kj(\max)}^-\}$ $\Omega_{k(\min)}^- = \sum_j \Omega_{kj(\min)}^-$, $\forall_j, \exists \{\Omega_{kj(\min)}^-\}$	$\Omega_{k(\max)}^+ = \sum_j \Omega_{kj(\max)}^+$, $\forall_j, \exists \{\Omega_{kj(\max)}^+\}$ $\Omega_{k(\min)}^+ = \sum_j \Omega_{kj(\min)}^+$, $\forall_j, \exists \{\Omega_{kj(\min)}^+\}$
на отдельных интервалах планового периода	цех	$\delta_{kj(\max)}^-(t) = P_{tkj}^{\max}(C_{bk}^z) - U_{kj}$, при $P_{tkj}^{\max}(C_{bk}^z) > U_{kj}$ $\delta_{kj(\min)}^-(t) = P_{tkj}^{\min}(C_{bk}^z) - U_{kj}$, при $P_{tkj}^{\min}(C_{bk}^z) > U_{kj}$	$\delta_{kj(\max)}^+(t) = P_{tkj}^{\min}(C_{bk}^z) - U_{kj}$, при $P_{tkj}^{\min}(C_{bk}^z) \leq U_{kj}$ $\delta_{kj(\min)}^+(t) = U_{kj} - P_{tkj}^{\max}(C_{bk}^z)$, при $P_{tkj}^{\max}(C_{bk}^z) \leq U_{kj}$
	завод	$\delta_k^-(\max)(t) = \sum_j \delta_{kj}^-(\max)(t)$, $\forall_j, \exists \{\delta_k^-(\max)(t)\}$ $\delta_k^-(\min)(t) = \sum_j \delta_{kj}^-(\min)(t)$, $\forall_j, \exists \{\delta_k^-(\min)(t)\}$	$\delta_k^+(\max)(t) = \sum_j \delta_{kj}^+(\max)(t)$, $\forall_j, \exists \{\delta_k^+(\max)(t)\}$ $\delta_k^+(\min)(t) = \sum_j \delta_{kj}^+(\min)(t)$, $\forall_j, \exists \{\delta_k^+(\min)(t)\}$

По тексту и в таблице использованы следующие обозначения:

$P_{kj}^{\max}, P_{kj}^{\min}$ – верхняя и нижняя границы величины потребности цехов в оснастке;
 U_{kj} – уровень фактического запаса оснастки в цеховых кладовых;
 n_{kj}^{z1} – размеры ожидаемых поставок оснастки в цеха завода;
 C_{ek}^z – ожидаемые сроки поставки (выпуска) оснастки из инструментальных цехов;
 $P_{tkj}^{\max}(C_{ek}^z), P_{tkj}^{\min}(C_{ek}^z)$ – верхняя и нижняя границы величины потребности цехов в оснастке (согласно графику расхода на момент поставки);
 k – код типоразмера оснастки;
 j – номер цеха-потребителя оснастки.

Важным условием правильной оценки обеспеченности цехов оснасткой является учет изменений уровня запасов в течение планового периода за счет их пополнения партиями, поступающими из производственных подразделений инструментального хозяйства. В связи с этим выделяются расчеты, в основе которых лежат данные об имеющемся и ожидаемом состоянии запасов инструментально-расдаточных кладовых:

- расчет значений фактических (на момент планирования) отклонений в обеспеченности ($\Delta_{kj(\min)}$; $\Delta_{kj(\max)}$);
- расчет значений ожидаемых (с учетом поставок) отклонений в обеспеченности ($\Omega_{kj(\min)}$; $\Omega_{kj(\max)}$).

В зависимости от знака разностей, полученных в результате вычислений, определяется тип имеющих место отклонений. Так отрицательные значения отклонений, рассчитанных

относительно установленных границ требуемой величины потребности, свидетельствуют о наличии «дефицита» оснастки. Положительные значения отклонений возникают в случае, когда имеют место излишки оснастки, фактические (в запасах) или ожидаемые (при пополнении запасов).

Различие знаков полученных разностей $\{ \Delta_{kj}^+(\min) \wedge \Delta_{kj}^-(\max) \}$ говорит о том, что уровень обеспеченности оснасткой находится в пределах допуска, установленного при расчете потребности.

Указанные расчеты дают возможность установить количественные характеристики отклонений в обеспеченности по плановому периоду в целом. Однако, они не позволяют отслеживать «неявные отклонения», механизм образования которых связан с рассогласованием ожидаемых и требуемых сроков поставки заказанной оснастки в цеха-потребители.

Для выявления и количественной оценки «неявного дефицита» оснастки осуществляется вычисление требуемых сроков подачи оснастки в цеха-потребители, в которых наблюдается нехватка оснастки. Расчет выполняется на основе графика расхода оснастки в цехах и предполагает установление допустимого диапазона сроков подачи с учетом вероятностного характера процесса потребления оснастки:

$$C_{kj}^{\Pi}(\min) = t (P_{tkj}^{\max} \geq U_{kj}) \quad , \quad (1)$$

$$C_{kj}^{\Pi}(\max) = \begin{cases} t(P_{tkj}^{\min} \geq U_{kj}), & t < d_T^K \\ d_T^K, & t \geq d_T^K \end{cases} \quad (2)$$

Тогда срок подачи оснастки должен лежать в интервале, удовлетворяющем требованиям всех цехов-потребителей, границы которого определяются выражениями:

$$C_K^{\min} = \min_j \{ C_{kj}^{\min} \} \quad , \quad (3)$$

$$C_K^{\max} = \min_j \{ C_{kj}^{\max} \} \quad , \quad (4)$$

где $C_{kj}^{\Pi}(\min)$, $C_{kj}^{\Pi}(\max)$ – ранний и поздний допустимые сроки пополнения запасов в j -м цехе, соответственно;

$C_K^{\min}$, $C_K^{\max}$ – ранний и поздний требуемые сроки выпуска и подачи средств оснащения в цеха основного производства, соответственно;

t – дата исчерпания запаса U_{kj} в j -м цехе завода согласно графику потребления оснастки $P_{tkj}^{\min}$, $P_{tkj}^{\max}$;

d_T^K – дата окончания планового месяца.

В случае, если ожидаемый срок подачи оснастки не удовлетворяет условию $\{ C_K^{\min} \leq C_{BK}^Z \leq C_K^{\max} \}$, то вычисляются значения «неявного дефицита» (δ_{kj}^-) или временных излишков (δ_{kj}^+) по формулам, приведенным в таблице 1. При этом, если размеры «неявного дефицита», агрегированные по цехам завода, не превышают величины временных излишков, то создается реальная возможность компенсации отклонений за счет частичного перераспределения запасов готовой оснастки.

Модели маневрирования ресурсами

Дальнейший ход расчетов строится с учетом результатов анализа отклонений. Если значение фактического «дефицита» по предприятию не превышает суммарных излишков, которые имеют место в кладовых отдельных цехов, то отклонения в обеспеченности могут быть ликвидированы исключительно за счет наличных запасов готовой оснастки.

В частности, при соблюдении условия $\{\Delta_{k(\max)}^+ \geq \Delta_{k(\min)}^-\}$ наличные запасы достаточны для удовлетворения потребностей всех цехов-потребителей с учетом максимального требуемого уровня обеспеченности. Это позволяет сформировать решения на основе прямого перераспределения запасов. Размеры поставок, обеспечивающих компенсацию «дефицита», определяются его величиной в соответствующих цехах:

$$n_{kj}^+ = \Delta_{k(\max)}^- \cdot \quad (5)$$

Аналогичным образом задача решается в случае, когда существующая нехватка оснастки полностью компенсируется за счет ожидаемой доставки из цехов инструментального производства. При сроках поставки, удовлетворяющих требуемому диапазону $\{C_k^{\min} \leq C_{\text{вк}}^z \leq C_k^{\max}\}$, и размерах ожидаемой поставки, обеспечивающих выполнение условия $\{\Delta_{k(\max)}^+ + n_k^z \geq \Delta_{k(\min)}^-\}$, величина поставки в конкретные цеха также определяется количеством недостающей оснастки:

$$n_{kj}^{+(z)} = \Delta_{k(\max)}^- \cdot \quad (6)$$

Если размеры ожидаемой поставки (n_k^z) превышают потребность $n_k^z > \sum_j n_{kj}^{+(z)}$, то появляется возможность сократить перегрузку инструментального цеха за счет дробления партии, находящейся в незавершенном производстве. Для этого определяются размеры ее составляющих, используемой части (n_k^{z1}) и остатка (n_k^{z2}):

$$n_k^{z1} = \sum_j n_{kj}^{+(z)} \cdot \quad (7)$$

$$n_k^{z2} = n_k^z - n_k^{z1} \cdot \quad (8)$$

Остаточная часть партии включается в номенклатуру следующего месяца, а новые сроки выпуска выделенных элементов партии рассчитываются с учетом длительности цикла выполнения соответствующего объема работ ($T_{\text{цос.к}}^{z1}$, $T_{\text{цос.к}}^{z2}$):

$$C_{\text{вк}}^{z1} = d_T^H + T_{\text{цос.к}}^{z1} - 1 \cdot \quad (9)$$

$$C_{\text{вк}}^{z2} = d_T^K + T_{\text{цос.к}}^{z2} \cdot \quad (10)$$

Выполнение указанной операции нацелено на выравнивание загрузки инструментальных цехов по календарным периодам. На достижение такого результата направлен и перенос сроков завершения работ по оснастке, находящейся в изготовлении, когда потребность полностью удовлетворяется за счет маневрирования наличными запасами.

Рассмотренные случаи прямого распределения ресурсов предполагают наличие (фактическое или ожидаемое) запасов, гарантирующих безотказное обслуживание

производственного процесса оснасткой во всех цехах-потребителях с высокой заданной вероятностью. Характер расчетов меняется, если количество оснастки, подлежащее распределению, не позволяет достичь максимального требуемого уровня обеспеченности по всем цехам, но достаточно для удовлетворения потребности в пределах установленного допуска: $\sum_j P_{kj}^{\min} \leq \sum_j P_{kj} \leq \sum_j P_{kj}^{\max}$.

Границы данной ситуации выражаются через отклонения в обеспеченности цехов оснасткой в виде логического условия:

$$\{(\Delta_{k(\max)}^+ < \Delta_{k(\max)}^-) \wedge (\Delta_{k(\min)}^+ \geq \Delta_{k(\min)}^-)\} \vee \{(\Omega_{k(\max)}^+ < \Omega_{k(\max)}^-) \wedge (\Omega_{k(\min)}^+ \geq \Omega_{k(\min)}^-)\}.$$

Очевидно, что подготовка решений в этом случае должна осуществляться в условиях ограниченности возможностей удовлетворения потребностей производства за счет наличных запасов и ожидаемых поставок оснастки и требует проведения дополнительных исследований, связанных с поиском оптимальных решений, обеспечивающих эффективное маневрирование ресурсами ИНХ.

Всякое распределение оснастки в этом случае сопряжено с определенным риском возникновения отказов в обслуживании производственного процесса, который для каждого цеха-потребителя определяется функциями риска (Q_{kj}). Их конкретные характеристики устанавливаются при расчете потребности. В общем виде:

$$Q_{kj} = \begin{cases} 0, & X_{kj} > P_{kj}^{\max} \\ Q_{kj}(X_{kj}), & P_{kj}^{\min} \leq X_{kj} \leq P_{kj}^{\max} \\ 1, & P_{kj}^{\min} > X_{kj} \end{cases}, \quad (11)$$

где X_{kj} – количество k -й оснастки, выделяемой j -му цеху;
 $Q_{kj}(X_{kj})$ – вероятность возникновения отказа в обслуживании производственного процесса при наличии k -й оснастки в j -м цехе в количестве X_{kj} ;
 $P_{kj}^{\min}, P_{kj}^{\max}$ – количество оснастки, соответствующее граничным значениям допустимого диапазона изменения величины потребности.

Вероятность возникновения срывов в обслуживании оснасткой характеризует уровень обеспеченности производства конкретными типоразмерами оснастки по каждому цеху-потребителю. Тогда уровень обеспеченности и, соответственно, эффективность решения по распределению оснастки могут быть охарактеризованы вероятностью возникновения отказа в обслуживании производственных процессов по заводу в целом. Функция риска $F(X)$ при этом может быть выражена через частные функции Q_{kj} как произведение последних.

Очевидно, решение задачи распределения оснастки в этом случае связано с поиском комбинации переменных X_{kj} , обеспечивающей сведение значения функции риска к минимуму. Учитывая, что подготовка решения осуществляется по каждому типоразмеру оснастки в отдельности и в условиях ограниченности ее количества в запасах и ожидаемых поставках, задача может быть формализована в виде модели оптимального распределения однородных ресурсов:

$$F(X) = \prod_j Q_{kj}(X_{kj}) \rightarrow \min, \quad (12)$$

$$\text{при } \sum_j X_{kj} \leq \sum_j U_{kj} + n_k^z. \quad (13)$$

В случае, если поставка не ожидается или отсутствуют запасы, то соответствующий член ограничения $\sum_j U_{kj}$ или n_k^z приравнивается нулю. Постановка при этом не меняется и носит универсальный характер. Модель может быть использована как для перераспределения запасов, так и для распределения ожидаемых поставок.

Учитывая нелинейность и мультипликативность целевой функции, а также дискретность независимых переменных, для поиска решения следует использовать метод динамического программирования. Незначительная размерность задачи при единственном ограничении и количестве переменных, не превышающем в реальных условиях десяти, обеспечивает минимальные затраты машинного времени на формирование вариантов решений и выбор оптимального.

При перераспределении запасов количество оснастки, подлежащее передаче (n_{kj}^-) и получению (n_{kj}^+) цехами-потребителями с учетом найденных оптимальных решений (X_{kj}^*), определяется выражениями:

$$n_{kj}^- = U_{kj} - X_{kj}^* \text{ при } X_{kj}^* < U_{kj} \quad , \quad (14)$$

$$n_{kj}^+ = X_{kj}^* - U_{kj} \text{ при } X_{kj}^* \geq U_{kj} \quad . \quad (15)$$

Аналогичным образом расчет выполняется в случае, если удовлетворение потребности осуществляется как из запасов, так и за счет ожидаемых поставок оснастки.

В случае отсутствия запасов готовой оснастки размеры поставок в цеха однозначно определяются решениями модели X_{kj}^* .

Представленные модели прямого и оптимального распределения оснастки могут быть использованы и для маневрирования запасами в целях устранения временных отклонений. В частности, применение указанных моделей позволяет полностью ликвидировать «неявный дефицит» за счет перераспределения временных излишков при условии, что его минимальное значение не превышает размеры таких излишков в соответствующих цехах, то есть: $\{\delta_{k \max}^+ \geq \delta_{k \max}^-\} \vee \{\delta_{k \max}^+ \geq \delta_{k \min}^-\}$.

В случае, если указанное отклонение носит устойчивый характер $\{\delta_{k(\max)}^+ < \delta_{k(\min)}^-\}$, то очевидна необходимость ускорения поставки оснастки в основное производство. Для этого партии поставки присваивается статус аварийной, и требуемый срок поставки определяется, исходя из графика потребления и наличных запасов оснастки на заводе:

$$\{\sum_j P_{tkj}^{min} - \sum_j U_{kj}\} \Rightarrow t = C_{bk} \quad . \quad (16)$$

Вся имеющаяся в наличии оснастка при этом перераспределяется таким образом, чтобы обеспечить производственные процессы во всех цехах-потребителях до момента ожидаемой поставки.

$$n_{kj}^+ = P_{tkj}^{min}(t) - U_{kj} \text{ при } P_{tkj}^{min}(t) > U_{kj} \quad , \quad (17)$$

$$n_{kj}^- = U_{kj} - P_{tkj}^{min}(t) \text{ при } P_{tkj}^{min}(t) \leq U_{kj} \quad . \quad (18)$$

При решении задачи маневрирования запасами наряду с объемно-календарным планированием большое значение имеет пространственная координация процесса перераспределения оснастки. Вопросы: откуда, куда и в каких количествах должна передаваться

оснастка, особенно остро встают при наличии более чем двух цехов, выступающих в качестве держателей и потребителей запасов.

Поэтому установление межцеховых взаимосвязей требует четкого определения состава цехов-поставщиков для каждого цеха, в который должна передаваться оснастка, а также размеров партий передачи.

Увеличение количества цехов, участвующих в маневрировании запасами, приводит к резкому возрастанию числа вариантов решений, которые обеспечивают достижение требуемого результата.

Для определения состава и количественных характеристик межцеховых связей разработан алгоритм, нацеленный на выбор варианта перераспределения запасов, включающего минимальное количество межцеховых передач. Сокращение их числа оказывает положительное влияние на снижение уровня затрат, связанных с организацией погрузочно-разгрузочных работ и транспортными операциями, что определяет рациональность предложенного подхода к решению задачи пространственной координации перераспределения запасов.

В схеме расчетов выделяются два основных этапа, различающихся правилом установления межцеховых связей.

На первом этапе ставится задача обеспечения маневра за счет минимального количества цехов-поставщиков. Это достигается путем выделения групп цехов, «дефицит» в которых может быть устранен за счет излишков, имеющихся у единственного поставщика. В результате ряду цехов-потребителей (j) ставится в соответствие один цех-поставщик (j') и устанавливаются размеры межцеховых передач: $n_{kjj'} = \Delta_{kj(\max)}^-$.

Специфика второго этапа связана с тем, что «дефицит» по отдельным цехам, не ликвидированный на первом этапе, может быть компенсирован только с привлечением оснастки из кладовых нескольких цехов, имеющих излишки. Минимальное количество передач обеспечивается в этом случае за счет установления связей между потребителями и поставщиками, имеющими наименьшее рассогласование значений «дефицита» и излишков.

Расчеты по маневрированию завершаются формированием программы работ, которая выдается в подразделения. Она содержит по каждому типоразмеру оснастки, подлежащей перераспределению или распределению, реквизиты, характеризующие состав и взаимосвязи цехов-поставщиков и цехов-потребителей, размер межцеховых поставок и поставок из подразделений инструментального производства, а также календарный график подачи оснастки в цеха-потребители.

Следует отметить, что выполнение маневра не всегда обеспечивает полное устранение отклонений. В случае, если маневр не может быть выполнен или позволяет компенсировать «дефицит» лишь частично, то на заключительном этапе расчетов должны быть сформированы дополнительные заказы на изготовление оснастки.

Объемные параметры заказов формируются, исходя из величины отклонений ожидаемого уровня запасов в цехах (с учетом результатов маневрирования) от расчетных значений потребности:

$$n_{kj(\min)}^3 = P_{kj}^{\min} - (U_{kj} + n_k^{z1} + n_k^+) , \quad (19)$$

$$n_{kj(\max)}^3 = P_{kj}^{\max} - (U_{kj} + n_k^{z1} + n_k^+) . \quad (20)$$

Для установления требуемых сроков выпуска заказов рассчитываются даты ожидаемого исчерпания запасов, исходя из графика потребления оснастки. Плановый срок выпуска задается в виде диапазона допустимых сроков подачи оснастки:

$$C_{kj(min)}^{\Pi} \leq C_{\text{в}kj}^3 \leq C_{kj(max)}^{\Pi}, \quad (21)$$

$$C_{kj(min)}^{\Pi} = t_{(P_{tkj}^{min}=U_{kj}+n_k^{z1}+n_k^{+})}, \quad (22)$$

$$C_{kj(max)}^{\Pi} = \begin{cases} t_{(P_{tkj}^{max}=U_{kj}+n_k^{z1}+n_k^{+})}, & \text{при } t < d_T^{\kappa} \\ d_T^{\kappa}, & \text{при } t \geq d_T^{\kappa} \end{cases}. \quad (23)$$

Выводы

Таким образом, решение задач маневрирования позволяет гибко использовать ресурсы, сосредоточенные в различных подразделениях инструментального хозяйства на предприятиях авиастроения или предприятиях по ремонту и обслуживанию авиационной техники, обеспечивает устранение отклонений за счет координации деятельности держателей запасов оснастки во времени и пространстве. Повышение качества обслуживания основного производства оснасткой достигается также за счет согласования объемно-календарных параметров партий технологической оснастки, находящихся в производстве, с реальными потребностями подразделений.

Это, в свою очередь, способствует выравниванию загрузки инструментальных цехов по календарным периодам. Расчет параметров заказов на изготовление оснастки непосредственно на базе потребностей основных цехов авиапредприятий создает необходимые условия для четкой увязки работы основного и инструментального производства, сокращения рассогласований по количеству и срокам оснащения производственных процессов, снижения всех видов затрат и потерь, связанных с отклонениями в обеспеченности производства данным видом ресурсов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маликова Д.М. Особенности организации производства в оборонно-промышленном комплексе Российской Федерации на современном этапе // Организатор производства. 2018. Т. 26. № 1. С. 7–22.
2. Вдовин В.А., Оганов В.А., Афанасьева О.А. Моделирование резервов сокращения сроков технологической подготовки производства на стадии проектирования технологической оснастки // «Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция». 2018. №2. С. 203–207.
3. Демин С.С., Калачанов В.Д., Ефимова Н.С., Канашова Ю.Г. Производство гражданской авиационной техники с учетом повышенных требований экономической безопасности авиастроения // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2018. № 21. С. 111–121.
4. Агарков А.П., Аникин Б.А. Эффективная организация и управление инструментальным хозяйством предприятия. М.: Инфра-М, 2021. 127 с.
5. Демин С.С., Ермаков А.А. Механизм оценки экономической целесообразности внедрения информационных систем на высокотехнологичных предприятиях авиастроения // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2018. № 24. С. 55–66.
6. Автоматизация управления инструментальным хозяйством / Ю.К. Перский и др. М.: Машиностроение, 1982. 128 с.
7. Вдовин В.А. Оптимизация планов производства и распределения технологической оснастки на предприятии // Оптимизация решений в АСУ: сб. науч. трудов. М.: МАИ, 1987. С. 44–48.
8. Инструментальное обеспечение интегрированных машиностроительных производств / С.Н. Григорьев и др. Б.м.: Тонкие наукоемкие технологии, 2018. 347 с.
9. Сандомирский Е.М. Современные методы совершенствования организации и планирования инструментальной подготовки производства в авиастроении. Уфа: Уфимский авиац. ин-т., 1979. 86 с.

10. Демин С.С., Вдовин В.А., Оганов В.А., Олейникова М.В. Экономико-математический подход к обеспечению технологической оснасткой наукоемкого авиастроительного производства // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2019. № 29. С. 75–85.

REFERENCES

1. Malikova D.M. Features of the organization of production in the military-industrial complex of the Russian Federation at the present stage. *Organizator proizvodstva = Production organizer*. 2018, vol. 26, no. 1, pp. 7–22. (In Russian).

2. Vdovin V.A., Oganov V.A., Afanasyeva O.A. Modeling of reserves for reducing the terms of technological preparation of production at the stage of designing technological equipment. *Resursy, Informatsiya, Snabzhenie, Konkurentsia = Resources, Information, Procurement, Competition*, 2018, no. 2, pp. 203–207. (In Russian).

3. Demin S.S., Kalachanov V.D., Efimova N.S., Kanashova Yu.G. Civil aircraft production to meet the increasing demands of economic security. *Nauchnyy vestnik GosNII GA = Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2018, no. 21, pp. 111–121. (In Russian).

4. Agarkov A.P., Anikin B.A. *Ehffektivnaya organizatsiya i upravlenie instrumentalnym hozyajstvom predpriyatiya* [Effective organization and management of enterprise tools]. Moscow, Infra-M Publ., 2021, 127 p. (In Russian).

5. Demin S.S., Ermakov A.A. Mechanism for assessing the economic feasibility of implementing information systems in high-tech aircraft enterprises. *Nauchnyy vestnik GosNII GA = Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2018, no. 24, pp. 55–66. (In Russian).

6. *Avtomatizatsiya upravleniya instrumentalnym hozyajstvom* [Automating of tool management]. Yu.K. Perskiy and others. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982, 128 p. (In Russian).

7. Vdovin V.A. Optimization of production plans and distribution of tooling at the enterprise. *Optimizatsiya reshenij v ASU. Sbornik nauchnykh trudov = Optimization of solutions in ACS. Collection of scientific works of MAI*, 1987, pp. 44–48. (In Russian).

8. *Instrumentalnoe obespechenie integrirovannykh mashinostroitelnykh proizvodstv. Uchebnik* [Instrumental support of integrated machine-building industries. Textbook]. S.N. Grigorev and others. Without place of edition. Tonkie naukoemkie tekhnologii Publ., 2018, 347 p. (In Russian).

9. Sandomirskiy E.M. *Sovremennye metody sovershenstvovaniya organizatsii i planirovaniya instrumentalnoj podgotovki proizvodstva v aviastroenii* [Modern methods of improving the organization and planning of instrumental production preparation in the aircraft industry]. Ufa, Ufimskiy aviats. in-t Publ., 1979, 86 p. (In Russian).

10. Demin S.S., Vdovin V.A., Oganov V.A., Oleynikova M.V. Economic and mathematical approach to ensuring technology equipment for knowledge-intensive aircraft production. *Nauchnyy vestnik GosNII GA = Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2019, no. 29, pp. 75–85. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Демин Сергей Сергеевич, доктор экономических наук, доцент, профессор, ФГБОУ ВО Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, д. 4, Москва, Российская Федерация, 125993; e-mail: ssdemin@mail.ru.

Вдовин Владимир Александрович, кандидат экономических наук, доцент, ФГБОУ ВО Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, д. 4, Москва, Российская Федерация, 125993; e-mail: docx.doc@yandex.ru.

Афанасьева Ольга Анатольевна, кандидат экономических наук, доцент, ФГБОУ ВО Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, д. 4, Москва, Российская Федерация, 125993; e-mail: oahome@mail.ru.

Калачанов Виктор Вячеславович, кандидат экономических наук, доцент, ФГБОУ ВО Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Волоколамское шоссе, д. 4, Москва, Российская Федерация, 125993; e-mail: kaf315@mail.ru.

ABOUT THE AUTHORS

Demin Sergey S., Doctor of Economic Sciences, Associate Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Volokolamskoe Highway, 4, 125993 Moscow, Russian Federation; e-mail: ssdemin@mail.ru.

Vdovin Vladimir A., Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Volokolamskoe Highway, 4, 125993 Moscow, Russian Federation; e-mail: docx.doc@yandex.ru.

Afanasieva Olga A., Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Volokolamskoe Highway, 4, 125993 Moscow, Russian Federation; e-mail: oahome@mail.ru.

Kalachanov Viktor V., Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Volokolamskoe Highway, 4, 125993 Moscow, Russian Federation; e-mail: kaf315@mail.ru.

УДК 629.735.015.4:539.411.5

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ СЛУЧАЙНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ КОНСТРУКЦИИ САМОЛЕТОВ МЕСТНЫХ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

Ю.М. ФЕЙГЕНБАУМ, Д.Г. БОЖЕВАЛОВ, Е.С. МЕТЕЛКИН, Ю.С. СОКОЛОВ, С.В. ДИОГЕНОВ

*Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации,
г. Москва, Российская Федерация*

Аннотация. В статье сформированы основные критерии принадлежности ВС к категории местных воздушных линий (МВЛ), проанализированы данные по их компоновочной схеме, показаны особенности самолетов местных воздушных линий и условий их эксплуатации. Проанализированы основные причины случайных ударных повреждений самолетов МВЛ. Для целей статистического анализа все случайные эксплуатационные повреждения, получаемые ВС в полете и на стоянке самолета, были классифицированы. Для определения вероятностной модели была проанализирована информация о случайных эксплуатационных повреждениях конструкций самолетов МВЛ (Ан-24, Ан-26, Ил-114, Як-40, L-410, ATR-42, ATR-72) за период 2000 – 2019 гг. в объеме 1300 повреждений. Показано, что наиболее часто встречаемым видом случайного эксплуатационного повреждения является вмятина без разрыва обшивки и без повреждения силового каркаса. На основе проведенных исследований технического состояния самолетов МВЛ была разработана вероятностная модель случайных эксплуатационных повреждений конструкций. Проведено сравнение полученных данных с результатами аналогичных исследований по другим типам самолетов и определены особенности случайных эксплуатационных повреждений самолетов МВЛ. Результаты работы могут быть использованы для обеспечения безопасности конструкции по условиям прочности и эффективности эксплуатации ВС при проектировании конструкции ВС для МВЛ.

Ключевые слова: самолеты местных воздушных линий, критерии принадлежности, случайные эксплуатационные повреждения, статистический анализ информации о случайных эксплуатационных повреждениях конструкции, вероятностная модель повреждений, композиционные материалы

A PROBABILISTIC MODEL OF THE IMPACT DAMAGES OF LOCAL AIRLINES AIRCRAFT IN OPERATION

YU.M. FEYGENBAUM, D.G. BOZHEVALOV, E.S. METELKIN, YU.S. SOKOLOV, S.V. DIOGENOV

The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russian Federation

Abstract. The article contains the main criteria of belonging of the aircraft to the category of local air lines, analyzed data of their configuration scheme, shows the main features of local aircraft and their operating conditions. The main causes of accidental impact damage of aircraft of local airlines were analyzed. For statistical analysis, all accidental operational damages received by the aircraft during flight, take-off, landing and parking of the aircraft were classified. The information on accidental operational damage of the structures of aircraft of local airlines (An-24, An-26, IL-114, Yak-40, L-410, ATR-42, ATR-72) for the period 2000 - 2019 years was analyzed to compile a probabilistic model. It is shown that the most common type of accidental operational damage is a dent without breaking the skin and without damaging the power frame. Based on the studies of the technical condition of of local air lines aircraft a probabilistic model of accidental operational

damage of structures was developed. The obtained data were compared with the results of similar studies for other types of aircraft and features of accidental operational damage of local air lines aircraft have been identified. The research results can be used to ensure the safety of the structure in terms of strength and efficiency of aircraft operation in the design of the local air lines aircraft structure.

Keywords: aircraft of local airlines, criteria of belonging, accidental operational damages, statistical analysis of information on accidental operational damage of the structure, probabilistic model of damage, composite materials

Введение

Потенциально снижающими прочность конструкции самолета в процессе его эксплуатации, наряду с усталостью и коррозией, являются случайные эксплуатационные повреждения различного характера и происхождения.

Интенсивность, характер и локализация случайных повреждений могут в значительной степени зависеть от характера и условий эксплуатации воздушного судна.

Целью проведенных исследований являлось формирование вероятностной модели случайных повреждений конструкции самолетов, эксплуатирующихся на местных воздушных линиях (МВЛ).

Самолеты местных воздушных линий и условия их эксплуатации

Несмотря на большое количество различных классификаций гражданских самолетов по различным критериям (компоновка, тип двигателей, летно-технические характеристики, назначение и т.д.), в настоящее время отсутствует нормативно закреплённое определение категории «самолеты местных воздушных линий».

С целью определения типов самолетов, которые можно отнести к самолетам МВЛ, были проанализированы существующие классификации по ряду параметров, которые, по мнению авторов, прежде всего следует учитывать при определении принадлежности того или иного типа ВС к категории «самолеты МВЛ» [1–3].

В результате проведенного анализа, в рамках данной работы к самолетам МВЛ отнесены гражданские самолеты с максимальным взлетным весом до 30 т, пассажироместимостью не более 75 пассажиров, имеющие практическую дальность не более 1500+500 км, выполняющие полеты по трассам МВЛ 1 и 2 класса, эксплуатирующиеся на аэродромах 3 и 4 класса, имеющих ВПП класса Г, Д, Е с твердым и грунтовым покрытием.

С учетом определенных выше параметров был сформирован ориентировочный перечень типов самолетов МВЛ в мировом парке гражданской авиации. Всего в этот перечень попало 58 типов ВС. 23 типа ВС из данного перечня эксплуатируются в российских авиакомпаниях (по состоянию на 01.10.2019). Перечень этих самолетов приведен в табл. 1.

Как видно из табл. 1, по количеству самолетов наибольшая доля (46,5 %) приходится на самолеты Ан-2. При этом, в целом, самолеты ГП «Антонов» составляют около 70 % всего численного состава эксплуатирующихся самолетов МВЛ. Примерно 25 % парка составляют самолеты иностранного производства (не считая самолеты Ан).

Анализ данных о компоновочной схеме ВС, приведенных в табл. 1, количестве и типе двигателей, максимальном взлетном весе (Гвзл.), практической дальности полета (L), пассажироместимости (Nпас.), о степени использования в конструкции композиционных материалов, а также о возможности эксплуатации данного типа на грунтовых аэродромах, позволил сделать следующие выводы:

– преимущественной компоновкой самолетов такой категории является схема высокоплан (58 % типов самолетов);

- большинство типов ВС (86 %) оснащены двухдвигательными турбовинтовыми силовыми установками;
- примерно 50 % ВС имеют максимальный взлетный вес до 10 т;
- наибольшее количество типов ВС (43 %) имеют пассажировместимость от 20 до 50 человек;
- большинство типов ВС (65 %) предназначены для эксплуатации только на ИВПП;
- практическая дальность большинства (71 %) типов лежит в диапазоне от 1000 до 2500 км;
- композиционные материалы, в основном, применяются в несиловых агрегатах конструкции, таких как обтекатели, элементы механизации крыла и оперения, зализы, створки шасси, двери, люки и т.д.

Таблица 1

Численный состав парка самолетов МВЛ авиакомпаний РФ

№ п/п	Тип ВС	Заявлено к эксплуатации	
		Количество	%
1.	ATR-42	5	0,9
2.	ATR-72	14	2,7
3.	Beech 300	3	0,6
4.	CL-600-2B19	36	6,8
5.	Cessna-208	7	1,3
6.	DHC-6 Twin Otter	12	2,3
7.	DHC-8	14	2,7
8.	EMB-145	2	0,3
9.	PC-12	2	0,3
10.	PC-6	1	0,2
11.	Ан-148	6	1,1
12.	Ан-2	241	45,6
13.	Ан-24	55	10,4
14.	Ан-26	44	8,3
15.	Ан-28	5	0,9
16.	Ан-3	6	1,1
17.	Ан-38	2	0,3
18.	Ан-74	8	1,5
19.	L-410	38	7,2
20.	TVC-2MC	4	0,8
21.	Як-40	21	4,0
22.	680FL	1	0,2
23.	680V	1	0,2
Всего		528	100

Говоря о парке воздушных судов, эксплуатирующихся на МВЛ РФ, особое внимание следует обратить на аэродромы эксплуатации этих самолетов, качество которых во многом определяет особенности условий эксплуатации ВС. Анализ данных об аэродромах показывает, что только около 20 % аэродромов местных воздушных линий имеют ВПП с искусственным твердым покрытием (ИВПП), остальные 80 % ВПП относятся к грунтовым (ГВПП). Однако из них чисто грунтовыми являются только 65 %, а остальные покрыты гравием, галькой и др., что существенно повышает вероятность ударов в конструкцию фрагментами покрытия ВПП при выполнении взлетов и посадок [4].

Данные о случайных эксплуатационных повреждениях

Источниками информации о случайных повреждениях являлись данные автоматизированной системы обеспечения безопасности полетов (АСУБП), информация от эксплуатирующих организаций, отчеты ремонтных заводов, акты исследования технического состояния при индивидуальных продлениях ресурсов, акты углубленного исследования технического состояния при периодическом подтверждении летной годности экземпляров, отчеты по документированию технического состояния, отчеты ГосНИИ ГА (отчеты об условиях эксплуатации и техническом состоянии), данные КБ.

При сборе информации о случайных повреждениях было проанализировано более 5000 документов. В общей сложности была собрана информация о более чем 1300 случаях случайных повреждений воздушных судов, эксплуатируемых на МВЛ (рис. 1).



Рис. 1. Характеристика массива обработанной информации для самолетов МВЛ

Сводные данные об объеме полученной информации представлены в табл. 2.

Таблица 2

Сводные данные об объеме полученной информации

Тип ВС	Ан-24	Ан-26	Ил-114	Як-40	L-410 UVP	ATR-72	ATR-42
Количество повреждений на ВС данного типа	176	56	36	77	276	712	4
Процентное отношение повреждений на ВС данного типа к общему числу повреждений	13,2%	4,2%	2,7%	5,75%	20,6%	53,25%	0,3%

Источники повреждений. Следует отметить, что более чем в половине случаев зарегистрированных повреждений (56 % от общего числа повреждений) источник повреждения конструкции установить не удастся. Это связано с тем, что многие незначительные повреждения выявлены через какое-то время после их появления. В случаях, когда источник повреждения удастся установить, причинами случайных повреждений ВС являются:

- воздействие окружающей среды (попадание в град, порывы ветра и др.) – 9 %;
- удары посторонними предметами или разрушившимися агрегатами (столкновение с птицами и дикими животными, удары нелокализованными обломками разрушенного двигателя, удары фрагментами разрушенных пневматиков и дисков колес шасси, удары камнями на ВПП, удары ВС при взлете или посадке) – 9 %;
- производственные происшествия в результате наземного обслуживания ВС (столкновение с другими ВС, с телетрапами, стремянками, наезды на ВС аэродромным транспортом и т.д.) – 82 %.

Характер повреждений. Многообразие случайных воздействий на конструкцию ВС в процессе эксплуатации определяет многообразие наносимых ими видов повреждений конструкции. При этом, один и тот же вид воздействия в зависимости от интенсивности (энергии) удара, направления его действия, площади контакта, конструкции, материала и прочностных характеристик зоны удара и т. д. может приводить к различным видам случайных ударных повреждений (дефектов), в той или иной степени негативно влияющих на прочность конструкции [5, 8].

С целью проведения статистического анализа все случайные эксплуатационные повреждения были классифицированы следующим образом (табл. 3):

Таблица 3

Классификация случайных эксплуатационных повреждений

Тип повреждения	код
разрыв, сквозная трещина с повреждением силового каркаса	код 01
разрыв, сквозная трещина без повреждения силового каркаса	код 02
деформация (вмятина, гофр) с разрывом обшивки и с повреждением силового каркаса	код 03
деформация (вмятина, гофр) с разрывом обшивки без повреждения силового каркаса	код 04
деформация (вмятина, гофр) без разрыва обшивки и с повреждением силового каркаса	код 05
деформация (вмятина, гофр) без разрыва обшивки и без повреждения силового каркаса	код 06
обрыв крепежа	код 07
вырыв обшивки с повреждением силового каркаса	код 08
вырыв обшивки без повреждения силового каркаса	код 09
пробоина обшивки	код 10
расслоение (отслоение) обшивки	код 11
царапина, забоина, риска	код 12
обширное повреждение (разрушение элементов)	код 13
прочее	код 14

На рис. 2 представлено распределение повреждений по типам в соответствии с принятой классификацией дефектов.

Как видно из представленной информации, наиболее часто встречающимся видом случайного эксплуатационного повреждения является ударное повреждение в виде вмятины без разрыва обшивки и без повреждения силового каркаса (код 06).

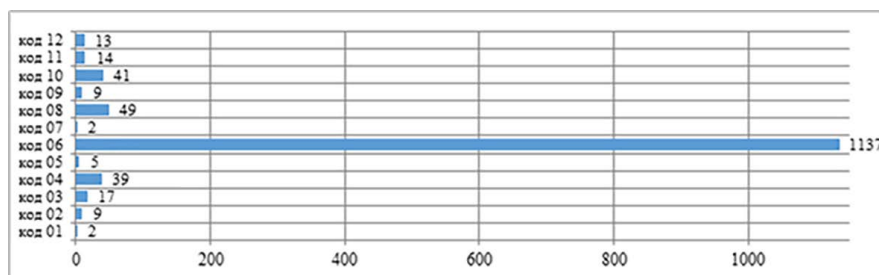


Рис. 2. Распределение случайных повреждений по видам
(в соответствии с принятой классификацией дефектов)

Локализация дефектов. Для целей дальнейшего анализа местоположение каждого выявленного дефекта было зафиксировано в координатах «агрегат (крыло, фюзеляж, киль...) –

зона (кессон, законцовка, залонжеронная часть...) – поверхность (верхняя, нижняя, боковая...)» (табл. 5).

Методика и результаты вероятностного анализа

Для элементов конструкции ВС определялась условная вероятность повреждения, т.е. вероятность события при условии, что другое событие уже произошло. Для событий «повреждение агрегата» таким условием является событие «повреждение планера ВС», для событий «повреждение зоны агрегата» – событие «повреждение агрегата», а для событий «повреждение поверхности зоны агрегата» – событие «повреждение зоны агрегата».

Агрегаты. Оценка условных вероятностей повреждения агрегатов планера определялась по формуле (1) [6]:

$$\bar{p}_i = \frac{n_i}{N}, \quad (1)$$

где n_i – количество случаев повреждения i -го агрегата планера ВС;

N – общее количество случаев повреждения планера ВС.

Рассчитанные усредненные значения условных вероятностей повреждения агрегатов ВС приведены в табл. 4. Усреднение данных о повреждениях планера ВС проводилось для самолетов типа L-410, ATR-42, ATR-72, Ан-24 и Ан-26, так как они имеют сходную конструктивно-компоновочную схему.

Таблица 4

Усредненные значения условных вероятностей $\bar{p}_i$ повреждения агрегатов ВС

Агрегаты	Усредненные значения условных вероятностей $\bar{p}_i$ повреждения агрегатов ВС
Фюзеляж	0,719
Крыло без механизации	0,099
Стабилизатор	0,029
РВ	0,010
Киль	0,005
РН	0,002
Элероны	0,006
Закрылки	0,010
Люки, створки, двери	0,121

Анализ табл. 4 показывает, что наибольшее значение вероятности повреждения имеет фюзеляж, затем – люки, двери, створки, крыло без механизации и стабилизатор.

Зоны и поверхности. Оценка условных вероятностей повреждения зон агрегатов планера определялась по формуле:

$$\bar{p}_{ij} = \frac{n_{ij}}{n_i}, \quad (2)$$

где n_{ij} – количество случаев повреждения j -ой зоны i -го агрегата планера ВС, n_i – количество случаев повреждения i -го агрегата планера ВС.

Оценка условных вероятностей повреждения поверхностей зон агрегатов планера определялась по формуле:

$$\bar{p}_{ijk} = \frac{n_{ijk}}{n_{ij}}, \quad (3)$$

где n_{ijk} – количество случаев повреждения k -ой поверхности в j -ой зоне i -го агрегата планера ВС;

n_i – количество случаев повреждения в j -ой зоне i -го агрегата планера ВС.

Из-за недостатка статистических данных вероятности повреждений поверхностей по размаху крыла, горизонтального и вертикального оперения не определялись.

Условные вероятности повреждения зон и поверхностей зон агрегатов, рассчитанные по формулам (2) и (3), приведены в табл. 5.

Таблица 5

Условные вероятности повреждения зон и поверхностей зон агрегатов

Агрегат (количество повреждений)	Зона (количество повреждений)	Условная вероятность $\bar{p}_{ij}$ повреждения зоны	Поверхность (количество повреждений)	Условная вероятность $\bar{p}_{ijk}$ повреждения поверхности зоны фюзеляжа
фюзеляж (879)	передняя часть (112)	0,12742	нижняя (46)	0,411
			боковая (66)	0,589
			верхняя (0)	н.д.
	средняя часть (598)	0,680316	нижняя (108)	0,181
			боковая (408)	0,682
			верхняя (82)	0,137
	хвостовая часть (169)	0,192264	нижняя (75)	0,444
			боковая (90)	0,533
			верхняя (4)	0,024
крыло без механизации (122)	носок (33)	0,2705	нижняя (6)	0,182
			боковая (25)	0,758
			верхняя (2)	0,061
	кессонная часть (20)	0,1639	нижняя (9)	0,450
			боковая (3)	0,150
			верхняя (8)	0,4
	залонжеронная часть (19)	0,1557	нижняя (4)	0,211
			боковая (2)	0,105
			верхняя (13)	0,684
	законцовка (48)	0,3934	нижняя (1)	0,021
			боковая (47)	0,979
			верхняя (0)	н.д.
	зализ (2)	0,0165	-	-
стабилизатор (35)	залонжеронная часть (1)	0,0286	-	-
	кессонная часть (6)	0,1714		
	носок (25)	0,7143		
	законцовка (3)	0,0857		
руль высоты (12)	-	-	нижняя (7)	0,583
			верхняя (5)	0,417

Продолжение таблицы 5

киль (6)	законцованная часть (0)	н.д.	-	-
	кессонная часть (0)	н.д.		
	носок (6)	1,0		
закрылки (12)	-	-	нижняя (9)	0,750
			носок (1)	0,083
			верхняя (2)	0,167

Из табл. 5 видно, что для фюзеляжа наибольшую вероятность случайного повреждения имеют боковые поверхности передней, средней и хвостовой частей.

Для крыла наибольшую вероятность повреждения имеют боковая поверхность законцовки и боковая поверхность носка крыла. Нижняя и верхняя поверхности кессонной части крыла имеют близкие значения условных вероятностей повреждения.

Дифференциация по типам повреждений. Определение условных вероятностей определенного вида повреждения конструктивных элементов планера проводилось в предположении, что события – виды повреждений того или иного агрегата конструкции планера несовместны и образуют полную группу событий, то есть $\sum_{l=1}^m p_l = 1$, где p_l – вероятность повреждения вида l , m – количество видов повреждений.

Оценки условных вероятностей появления повреждений различного вида на элементах конструкции планера ВС определялись по формуле:

$$\bar{p}_l = \frac{n_l}{N}, \quad (4)$$

где n_l – количество случаев повреждения вида l агрегата, зоны агрегата или поверхности зоны агрегата планера ВС;

N – количество случаев повреждения агрегата, зоны агрегата или поверхности зоны агрегата планера ВС соответственно.

Полученные по формуле (4) значения условных вероятностей $\bar{p}_l$ появления повреждений вида l на элементах конструкции планера представлены в табл. 6.

Из табл. 6 видно, что на элементах конструкции планера ВС наиболее вероятно появление вмятин по «код 06» – деформация (вмятина, гофр) без разрыва обшивки и без повреждения силового каркаса (значение вероятности для такого повреждения для некоторых элементов конструкции доходит до 1,0, например, для верхней и боковой поверхностей средней части фюзеляжа, боковой поверхности хвостовой части фюзеляжа, зализа и законцовки крыла без механизации носок стабилизатора). Вероятность появления случайных повреждений других видов значительно меньше.

Причинами большой вероятности повреждения верхней и боковой поверхностей средней части фюзеляжа самолетов МВЛ являются попадание оторвавшихся от лопастей кусков льда, а также рикошетирующие от лопастей воздушных винтов посторонних предметов, поднятых с ВПП. Для защиты обшивки фюзеляжа от повреждения используется накладной лист или резиновая защитная лента в зоне плоскости вращения воздушных винтов (рис. 3).

Ударные повреждения типа «вмятина». Учитывая, что повреждения типа «вмятина» существенно преобладают над всеми остальными, этот тип повреждений был проанализирован отдельно. В табл. 7 представлены условные вероятности появления повреждений на агрегатах конструкции ВС – $\bar{p}_i$, зонах агрегатов конструкции – $\bar{p}_{ij}$, поверхностях зон агрегатов – $\bar{p}_{ijk}$, условная вероятность появления повреждения в виде вмятины по «код 06» – $\bar{p}_{06}$, условная вероятность появления повреждения в виде вмятины по «код 06» на поверхностях зон агрегатов – $\bar{p}_{ijk06}$, а также нормированная вероятность, определенная по формулам:

$$\bar{p}_{ijk06} = \bar{p}_i \cdot \bar{p}_{ij} \cdot \bar{p}_{ijk} \cdot \bar{p}_{06} , \quad (5)$$

$$\bar{p}_{i\delta i} = \frac{\sum \bar{p}_{ijk06}}{\bar{p}_{ijk06}} . \quad (6)$$

Таблица 6

Условные вероятности появления повреждений различного вида

Агрегат, зона	Кол- во повр. N	Условные вероятности появления повреждений различного вида										
		Код повреждения вида l										
		02	03	04	05	06	09	10	11	12	13	14
Фюзеляж	879	0,002	0,016	0,028	0,002	0,895	н.д.	0,032	н.д.	0,023	0,001	0,006
Передняя часть:	112	н.д.	0,054	0,116	0,018	0,723	н.д.	0,036	н.д.	0,045	н.д.	0,009
- нижняя поверхность	46	н.д.	0,109	0,196	н.д.	0,652	н.д.	0,022	н.д.	0,022	н.д.	н.д.
- боковая поверхность	66	н.д.	0,015	0,061	0,03	0,773	н.д.	0,045	н.д.	0,061	н.д.	0,015
- верхняя поверхность	0	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
Средняя часть:	598	0,001	0,007	0,01	н.д.	0,925	н.д.	0,032	н.д.	0,018	н.д.	0,007
- нижняя поверхность	108	н.д.	0,019	0,018	н.д.	0,704	н.д.	0,157	н.д.	0,065	н.д.	0,037
- боковая поверхность	408	0,002	0,005	0,01	н.д.	0,968	н.д.	0,005	н.д.	0,01	н.д.	н.д.
- верхняя поверхность	82	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	1,0	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
Хвостовая часть:	169	0,006	0,024	0,006	н.д.	0,905	н.д.	0,03	н.д.	0,024	0,006	н.д.
- нижняя поверхность	75	н.д.	0,053	0,013	н.д.	0,893	н.д.	0,013	н.д.	0,027	н.д.	н.д.
- боковая поверхность	90	0,011	н.д.	н.д.	н.д.	0,933	н.д.	0,033	н.д.	0,022	н.д.	н.д.
- верхняя поверхность	4	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	0,5	н.д.	0,25	н.д.	н.д.	0,25	н.д.
Крыло без механизации	122	0,024	0,008	0,049	0,008	0,73	0,016	0,041	н.д.	0,098	0,025	н.д.
-носок	33	0,061	н.д.	0,061	н.д.	0,758	0,030	0,061	н.д.	н.д.	0,030	н.д.
-кессонная часть	20	н.д.	н.д.	0,1	н.д.	0,4	н.д.	н.д.	н.д.	0,5	н.д.	н.д.
-залонжеронная часть	19	0,053	0,053	0,053	0,053	0,368	0,053	0,158	н.д.	0,105	н.д.	н.д.
-законцовка	48	н.д.	н.д.	0,021	н.д.	0,979	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	0,042	н.д.
-зализ	2	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	1,0	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
Стабилизатор	35	0,029	0	0,029	0,029	0,829	н.д.	0,029	н.д.	0,029	0,029	н.д.
- носок	25	н.д.	н.д.	н.д.	0,04	0,96	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
- кессонная часть	6	0,167	н.д.	н.д.	н.д.	0,5	н.д.	0,167	н.д.	0,167	н.д.	н.д.
- залонжеронная часть	1	н.д.	н.д.	1,0	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
- законцовка	3	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	0,667	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	0,333	н.д.
Руль высоты	12	н.д.	н.д.	0,167	н.д.	0,667	н.д.	0,083	н.д.	0,083	н.д.	н.д.
- нижняя поверхность	7	н.д.	н.д.	0,143	н.д.	0,714	н.д.	0,143	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
- верхняя поверхность	5	н.д.	н.д.	0,2	н.д.	0,6	н.д.	н.д.	н.д.	0,2	н.д.	н.д.
Киль	6	н.д.	н.д.	0,167	н.д.	0,667	н.д.	0,167	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
- носок	6	н.д.	н.д.	0,167	н.д.	0,667	н.д.	0,167	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
- кессонная часть	0	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
- залонжеронная часть	0	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
Руль направления	2	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	1,0	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
Элероны	7	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	0,429	н.д.	0,143	н.д.	0,143	н.д.	0,143
Закрылки	12	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	0,583	н.д.	0,083	н.д.	н.д.	0,333	н.д.
- нижняя поверхность	9	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	0,444	н.д.	0,111	н.д.	н.д.	0,444	н.д.
- верхняя поверхность	2	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	1,0	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
- носок	1	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	1,0	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.	н.д.
Люки, двери, створки	148	0,02	н.д.	0,014	н.д.	0,845	н.д.	0,027	0,054	0,033	н.д.	0,007
По всей конструкции ВС	1223	0,007	0,012	0,026	0,003	0,86	0,002	0,036	0,007	0,033	0,007	0,006



Рис. 3. Повреждения (вмятины) на накладном защитном листе боковой поверхности средней части фюзеляжа самолета Ан-24

В табл. 7 принято допущение, что в случае отсутствия информации о количестве дефектов в виде вмятин на поверхности агрегата ВС, считаем, что доля вмятин в общем количестве повреждений агрегата одинакова для всех поверхностей.

Таблица 7

Условные вероятности повреждения поверхностей зон и агрегатов самолетов МВЛ

Агрегат	N	$\bar{p}_i$	$\bar{p}_{ij}$	$\bar{p}_{ijk}$	$\bar{p}_{06}$	$\bar{p}_{ijk06}$	Норм. вероятность	%
Фюзеляж	879	0,7187			0,8953			
Передняя часть:	112		0,1274		0,7232			-
- нижняя поверхность	46			0,4107	0,6522	0,0245	0,0285	2,8517
- боковая поверхность	66			0,5893	0,7727	0,0417	0,0485	4,8479
- верхняя поверхность	0			0	0	0	0	-
Средняя часть:	598		0,6803		0,9248		0	-
- нижняя поверхность	108			0,1806	0,7037	0,0621	0,0722	7,2243
- боковая поверхность:	408			0,6823	0,9681		0	-
- район защитной ленты	380			0,6355	0,9681	0,3008	0,3497	34,9707
- остальная боковая поверхность	28			0,0468	0,9681	0,0221	0,02582	2,5768
- верхняя поверхность	82			0,1371	1	0,0670	0,0779	7,79467681
Хвостовая часть:	169		0,1923		0,9053		0	-
- нижняя поверхность	75			0,4438	0,8933	0,0548	0,0637	6,3688
- боковая поверхность	90			0,5325	0,9333	0,0687	0,07985	7,9848
- верхняя поверхность	4			0,0237	0,5	0,0016	0,0019	0,1901
Крыло без механизации	122	0,0998			0,7295		0	-
- носок	33		0,2705		0,7576	0,0204	0,0238	2,3764
- кессонная часть	20		0,1639		0,4	0,0065	0,0076	0,7604
- залонжеронная часть	19		0,1557		0,3684	0,0057	0,0067	0,6653
- законцовка	48		0,3934		0,9792	0,0384	0,0447	4,4677
- зализ	2		0,0164		1	0,0016	0,0019	0,1901
Стабилизатор	35	0,0286			0,8286		0	-
- носок	25		0,7143		0,96	0,0196	0,0228	2,2814
- кессонная часть	6		0,1714		0,5	0,00245	0,0029	0,2852
- залонжеронная часть	1		0,0286		0	0	0	0
- законцовка	3		0,0857		0,6667	0,00164	0,0019	0,1901
Руль высоты	12	0,0098			0,6667		0	0
- нижняя поверхность	7			0,5833	0,7143	0,0041	0,0048	0,4753

Продолжение таблицы 7

- верхняя поверхность	5			0,4167	0,6	0,0024	0,0029	0,2852
Киль	6	0,0049			0,6667		0	-
- носок	6		0,0033		0,6667	0,0033	0,0038	0,3802
- кессонная часть	0		0		0	0	0	0
- залонжеронная часть	0		0		0	0	0	0
Руль направления	2	0,0016			0	0	0	0
Элероны	7	0,0057			0,4286	0,0025	0,0029	0,2852
Закрылки	12	0,0098			0,58333	0	0	-
- нижняя поверхность	9			0,75	0,4444	0,0033	0,0038	0,3802
- верхняя поверхность	2			0,1667	1	0,0016	0,0019	0,1901
- носок	1			0,0833	1	0,0008	0,0009	0,0950
Люки, двери, створки	148	0,1210			0,8446	0,1022	0,1188	11,8821
По всей конструкции ВС	1223	1			0,8602	0,8602	1	100

По данным, приведенным в табл. 7, построено распределение условных вероятностей появления повреждения в виде вмятины по «код 06» на элементах конструкции ВС, эксплуатирующихся на МВЛ (рис. 4).

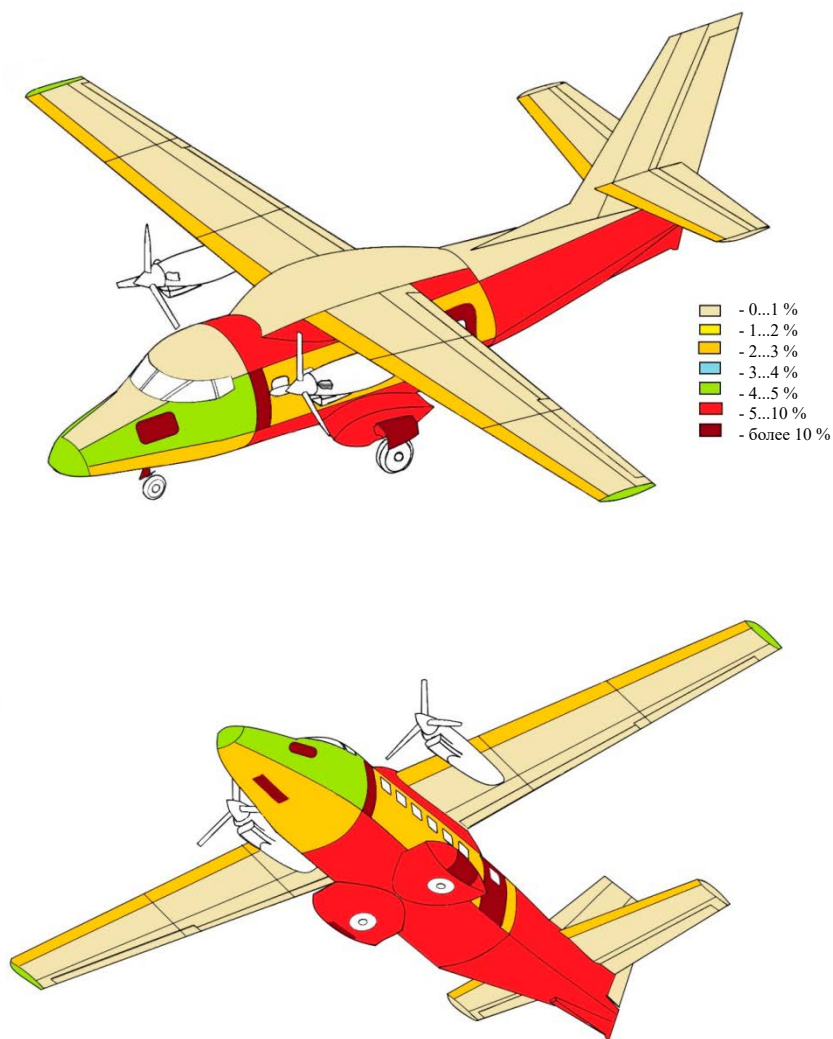


Рис. 4. Распределение условных вероятностей появления повреждения в виде вмятины на элементах конструкции самолетов МВЛ

Сравнительный анализ полученных результатов

На рис. 5 представлено сравнение полученных для самолетов МВЛ оценок распределения условных вероятностей случайных повреждений с результатами аналогичных исследований [4, 5, 7, 9], проведенных для самолетов других категорий (ближне-, средне- и дальнемагистральных).

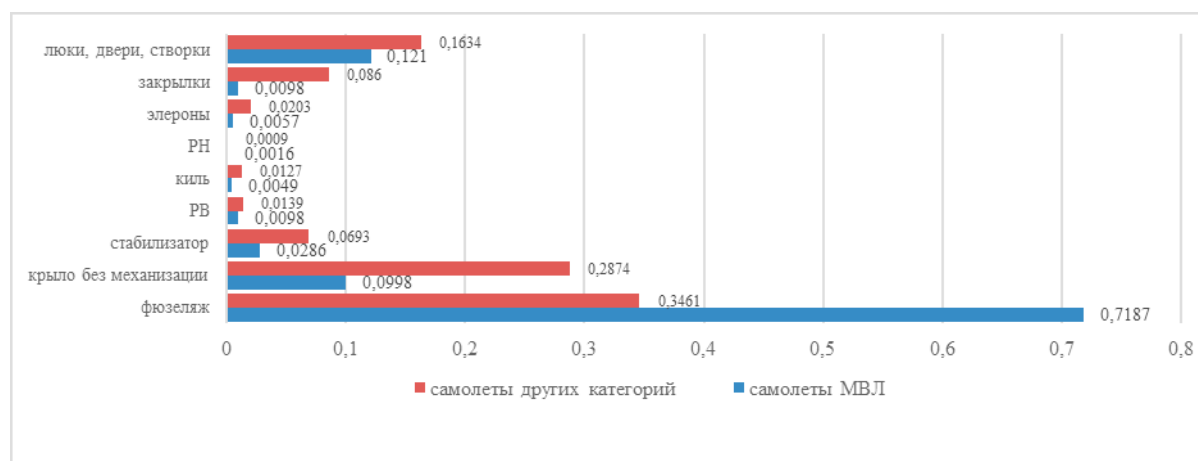


Рис. 5. Сравнение условных вероятностей повреждения агрегатов планера самолетов МВЛ и самолетов других категорий

Видно, что имеется существенное различие в распределении условных вероятностей повреждений по агрегатам планера самолетов МВЛ и самолетов других категорий. Так, для самолетов МВЛ наибольшую условную вероятность повреждения имеет фюзеляж, которая в два раза больше вероятности для самолетов других категорий.

В свою очередь следует отметить, что у самолетов других категорий условные вероятности повреждения крыла без механизации, закрылков и стабилизатора больше по сравнению с самолетами МВЛ. Данные различия в повреждаемости агрегатов планера ВС могут быть объяснены разными конструктивно-компоновочными схемами рассматриваемых ВС, так как высокое расположение крыла приводит к тому, что вероятность случайного его повреждения будет меньше.

Другие агрегаты (руль высоты, киль, руль направления, элероны и люки, створки, двери) имеют близкие значения условных вероятностей повреждений.

Помимо сравнения условных вероятностей случайных эксплуатационных повреждений конструкции, проведено сравнение интенсивностей повреждений самолетов разных категорий (рис. 6).

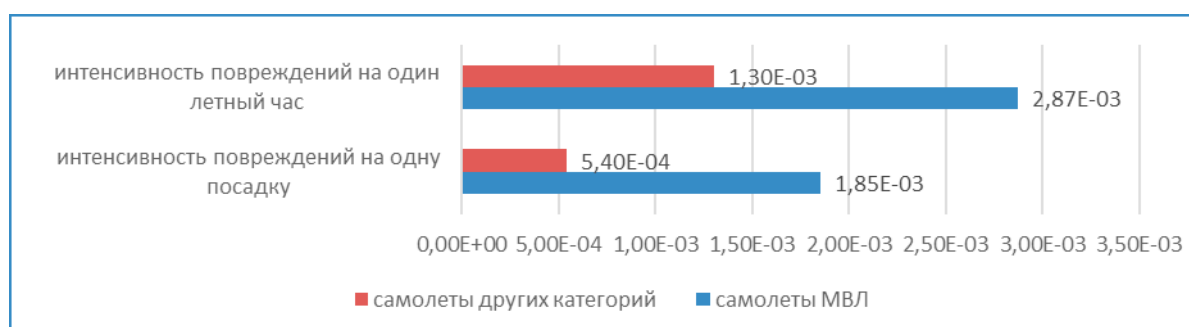


Рис. 6. Сравнение интенсивностей повреждения самолетов МВЛ с интенсивностями повреждения самолетов других категорий

При этом оценка интенсивности случайного повреждения конструкции конкретного типа ВС определялась по формуле:

$$\bar{\lambda} = \frac{N}{T_{\Sigma}}, \quad (7)$$

где N – общее количество повреждений конструкции конкретного типа ВС за рассматриваемый период времени;

T_{Σ} – суммарная наработка всех ВС этого типа за этот же период в часах или полетах.

Представленные на рис. 6 данные свидетельствуют о том, что повреждаемость самолетов МВЛ на один полет больше в 2,2 раза, по сравнению с самолетами других категорий, а повреждаемость на один час полета больше в 3,4 раза. Данное различие может быть объяснено, прежде всего, особенностями условий эксплуатации самолетов МВЛ, а также разными конструктивно-компоновочными схемами рассматриваемых типов ВС.

Выводы

В ходе проведенных исследований собраны, систематизированы, проанализированы и статистически обработаны данные об эксплуатационных повреждениях конструкции самолетов, эксплуатирующихся на местных воздушных линиях. На основании полученных результатов проведен вероятностный анализ и сформирована вероятностная модель внешних ударных воздействий самолетов МВЛ.

Показано, что вследствие особенностей условий эксплуатации и компоновок, интенсивность случайных эксплуатационных повреждений самолетов МВЛ значительно выше, чем самолетов других категорий самолетов гражданской авиации, а их локализация существенно отличается.

Результаты работы могут быть использованы для обеспечения безопасности конструкции по условиям прочности и эффективности эксплуатации ВС при проектировании конструкции ВС для МВЛ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Воздушный кодекс Российской Федерации: текст с изменениями и дополнениями, на 2020 год. Москва: Эксмо, 2020. 96 с.
2. Федеральные авиационные правила «Подготовка и выполнение полетов в гражданской авиации Российской Федерации» (с изменениями на 22 апреля 2020 года) (ФАП-128), введенные в действие Приказом Минтранса РФ от 31 июля 2009 № 128.
3. Наставление по технической эксплуатации и ремонту авиационной техники в гражданской авиации России (НТЭРАТ ГА-93) (с изменениями от 30 ноября 1995 г.).
4. Анализ случайных эксплуатационных повреждений конструкций самолетов МВЛ: Отчет о НИР // ФГУП ГосНИИ ГА. Москва. 2019.
5. Фейгенбаум Ю.М. и др. Обеспечение прочности композитных конструкций с учетом случайных эксплуатационных ударных воздействий: монография. М.: Техносфера, 2018. 506 с.
6. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. Москва, 1969. 576 с.
7. Метелкин Е.С., Божевалов Д.Г., Соколов Ю.С., Фейгенбаум Ю.М. Оценка вероятности случайных ударных воздействий на конструкцию воздушных судов при эксплуатации // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2015. № 8 (319). С. 57–66.
8. Фейгенбаум Ю.М., Дубинский С.В. Влияние случайных эксплуатационных повреждений на прочность и ресурс конструкции воздушного судна // Научный вестник МГТУ ГА. 2013. № 187. С. 83–92.

9. Дубинский С.В., Фейгенбаум Ю.М., Селихов А.А., Гвоздев С.А., Ордынцев В.М.. Закономерности реализации случайных ударных воздействий на конструкцию крыла коммерческого самолета. // Известия Самарского научного центра российской академии наук. 2016. Том 18. № 4(3), С. 604–611.

REFERENCES

1. The Air Code of the Russian Federation. Text with amendments and additions, for 2020. Moscow, Ehksmo Publ., 2020, 96 p. (In Russian).
2. Federal Aviation Rules «Preparation and Performance of Flights in Civil Aviation of the Russian Federation» (as amended on April 22, 2020) (FAP-128), put into operation by Order of the Ministry of Transport of the Russian Federation of July 31, 2009, No. 128. (In Russian).
3. Manual on technical operation and repair of aviation equipment in Russian civil aviation (NTERAT GA-93) (with amendments of November 30, 1995). (In Russian).
4. Analysis of accidental operational damage to the structures of LAL aircraft. Report on the research work. The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, 2019. (In Russian).
5. Feygenbaum Yu.M. and others. *Obespechenie prochnosti kompozitnykh konstruksij s uchetom sluchajnykh ehkspluatatsionnykh udarnykh vozdeystvij. Monografiya* [Ensuring strength of composite structures taking into account accidental operational impacts: monograph]. Moscow. Tekhnosfera Publ., 2018, 506 p. (In Russian).
6. Wentzel E.S. Probability theory. Moscow, 1969, 576 p. (In Russian).
7. Metelkin E.S., Bozhevalov D.G., Sokolov Yu.S., Feygenbaum Yu.M. Estimation of probability of random impact at the aircraft structure in operation. *Nauchnyj vestnik GosNII GA = Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2015, no. 8 (319), pp. 57–66. (In Russian).
8. Feygenbaum Yu.M., Dubinskiy S.V. Influence of Accidental In-Service Damage on Structural Durability And Aircraft Operation Life. *Nauchnyj vestnik MGTU GA = Scientific Bulletin of MSTU CA*, 2013, no.187, pp. 83–92. (In Russian).
9. Dubinskiy S.V., Feygenbaum Yu.M., Selikhov A.A., Gvozdev S.A., Ordynstev V.M. Study of Accidental In-Service Impacts Into Wing of Commercial Aircraft. *Izvestiya samarskogo nauchnogo tsentra Rossijskoj Akademii Nauk = Proc. of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2016, vol. 18, no. 4(3), pp. 604–611. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Фейгенбаум Юрий Моисеевич, кандидат технических наук, главный научный сотрудник, ФГУП Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, ул. Михалковская, 67, корпус 1, Москва, Российская Федерация, 125438; e-mail: feygenbaum_ym@ncplg.ru.

Божевалов Дмитрий Геннадьевич, ведущий инженер-эксперт, ФГУП Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, ул. Михалковская 67, корпус 1, Москва, Российская Федерация, 125438; e-mail: bozhevalov_dg@ncplg.ru.

Метелкин Евгений Сергеевич, заместитель начальника отдела–начальник лаборатории, ФГУП Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, ул. Михалковская, 67, корпус 1, Москва, Российская Федерация, 125438; e-mail: metelkin_es@ncplg.ru.

Соколов Юрий Сергеевич, заместитель начальника отдела–эксперт, ФГУП Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, ул. Михалковская, 67, корпус 1, Москва, Российская Федерация, 125438; e-mail: sokolov_ys@ncplg.ru.

Диогенов Сергей Витальевич, кандидат военных наук, Советник генерального директора, ФГУП Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, ул. Михалковская, д. 67, корпус 1, Москва, Российская Федерация, 125438; e-mail: diogenov@ncplg.ru.

ABOUT THE AUTHORS

Feygenbaum Yury M., Candidate of Technical Sciences, Chief Scientist, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Mikhalkovskaya Street. 67, building 1, 125438 Moscow, Russian Federation; e-mail: feygenbaum_ym@ncplg.ru.

Bozhevalov Dmitriy G., Leading Engineer-Expert, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Mikhalkovskaya Street, 67, building 1, 125438 Moscow, Russian Federation; e-mail: bozhevalov_dg@ncplg.ru.

Metelkin Evgeniy S., Deputy Department Head- Head of Laboratory, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Mikhalkovskaya Street, 67, building 1, 125438 Moscow, Russian Federation; e-mail: metelkin_es@ncplg.ru.

Sokolov Yuriy S., Deputy Department Head -Expert, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Mikhalkovskaya Street, 67, building 1, 125438 Moscow, Russian Federation; e-mail: sokolov_ys@ncplg.ru.

Diogenov Sergey V., Candidate of Military Sciences, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Mikhalkovskaya Street, 67, building 1, 125438 Moscow, Russian Federation; e-mail: diogenov@ncplg.ru.

УДК 351.814.2

О МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ПОСТАВЩИКА АВИАЦИОННЫХ УСЛУГ ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКОВ В ОБЛАСТИ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТОВ

В.М. РУХЛИНСКИЙ¹, А.А. ХАУСТОВ², Р.А. ВДОВЕНКО¹, С.В. ДИОГЕНОВ³

¹Межгосударственный авиационный комитет, г. Москва, Российская Федерация

²АО «Авиакомпания «Россия», г. Санкт - Петербург, Российская Федерация

³Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации,
г. Москва, Российская Федерация

Аннотация. Современные российские и международные требования к поставщикам авиационных услуг (ПАУ) предполагают разработку и применение Системы управления безопасностью полетов (СУБП). СУБП представляет собой динамическую систему менеджмента рисков, базирующуюся на принципах Системы менеджмента качества по своей структуре, масштабируемую соразмерно эксплуатационным рискам конкурентной организации и применяемую в контексте Культуры безопасности полетов (БП). Одним из базовых принципов применения современных Систем менеджмента качества является использование процессного подхода. В статье обсуждается возможность моделирования процессов в рамках СУБП ПАУ для количественной оценки рисков для БП на основе байесовских сетей доверия. Рассматриваются два варианта развития факторов опасности в рамках эксплуатационных процессов ПАУ. На примере процесса противообледенительной обработки и защиты воздушных судов показана возможность практического решения задачи математического моделирования эксплуатационного процесса ПАУ, при котором «выходы» процесса оказывают влияние на факторы опасности. Разработанная математическая модель процесса противообледенительной обработки и защиты воздушных судов позволяет определять: значение показателя эффективности обеспечения БП по совокупности ПАУ с учетом проблем в организации противообледенительной обработки и защиты воздушных судов, уровень риска для БП по всем выявленным ФО и уровень риска для БП для каждого из выявленных факторов опасности.

Ключевые слова: поставщик авиационных услуг, моделирование процессов, оценка риска для безопасности полетов, управление рисками для безопасности полетов, Байесовская сеть, противообледенительная обработка и защита воздушных судов

ABOUT AVIATION SERVICE PROVIDER PROCESS MODELING FOR SAFETY RISK ASSESSMENT

V.M. RUKHLINSKIY¹, A.A. KHAUSTOV², R.A. VDOVENKO¹, S.V. DIOGENOV³

¹The Interstate Aviation Committee, Moscow, Russian Federation

²JSC Rossiya airlines, Saint Petersburg, Russian Federation

³The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russian Federation

Abstract. Modern Russian and international requirements for aviation service providers (ASP) imply the development and application of a Safety Management System (SMS). An SMS is a dynamic risk management system based on the principles of a Quality Management System in structure, scalable in proportion to the operational risks of a competing organization, and applied in the context of a Safety Culture. One of the basic principles of modern Quality Management System application is the use of a process approach. The article discusses the possibility of modeling

processes within the SMS for quantitative safety risk assessment based on Bayesian Belief Network. Two options for the development of hazards in the framework of ASP operational processes are discussed. On the example of the process of aircraft de/anti-icing, the possibility of a practical solution to the problem of mathematical modeling of the operational process of ASP is shown, with the court the «outputs» of the process affect the hazards. The developed mathematical model of the aircraft de/anti-icing process allows to determine: level of safety performance indicator for the aggregate of ASPs, taking into account the problem in the organization of the aircraft de/anti-icing process, the level of safety risk for all of the identified hazard and the level of safety risk for each of the identified hazards.

Keywords: aviation service provider, process modeling, safety risk assessment, safety risk management, Bayesian network, risk model, aircraft de/anti-icing

Введение

Современные российские и международные требования к поставщикам авиационных услуг (ПАУ) предполагают разработку и применение Системы управления безопасностью полетов (СУБП) [1, 2]. СУБП определяется Международной организацией гражданской авиации как системный подход к управлению безопасностью полетов (БП), включая необходимую организационную структуру, иерархию ответственности, обязанности, руководящие принципы и процедуры [2].

СУБП представляет собой динамическую систему менеджмента рисков, базирующуюся на принципах Системы менеджмента качества (СМК) по своей структуре, масштабируемую соразмерно эксплуатационным рискам конкурентной организации и применяемую в контексте Культуры БП [3]. Одним из семи базовых принципов функционирования современных СМК является применение процессного подхода, предусмотренное требованиями стандарта ISO 9001 [4]. Результативная реализация процессного подхода предлагает моделирование совокупности взаимосвязанных процессов и системы организации как единого целого [5].

В статье рассматривается задача моделирования процессов ПАУ на основе байесовских сетей доверия (БСД) для количественной оценки рисков для БП. Обсуждаются два варианта развития факторов опасности (ФО) в рамках эксплуатационных процессов ПАУ. На примере процесса противообледенительной обработки и защиты (ПООиЗ) воздушных судов (ВС) показана возможность практического решения задачи моделирования эксплуатационного процесса ПАУ, при котором «выходы» процесса оказывают влияние на реализацию ФО.

Постановка задачи и основные приближения

Пусть имеются результаты контроля качества организации противообледенительной защиты ВС в аэропортах Российской Федерации, выполненные с помощью чек-листа/отчета Объединения авиакомпаний по контролю качества организации противообледенительной защиты ВС в аэропортах Российской Федерации (ОАККОПОЗ) [6]. Пусть далее результаты контроля качества представлены в виде выявленных несоответствий деятельности заданного ПАУ предъявляемым требованиям к ПООиЗ. В рамках настоящей статьи выявленные несоответствия будут рассматриваться как идентифицированные факторы опасности (ФО), присущие деятельности ПАУ.

Основываясь на данных о результатах контроля качества (выявленных несоответствиях) необходимо построить математическую модель (ММ), которая позволит определять:

- 1) вероятности возникновения авиационного происшествия (АП) по всем выявленным факторам опасности;
- 2) уровень риска для БП для каждого из выявленных факторов опасности;

3) значение показателя эффективности обеспечения БП (SPI) по совокупности результатов проверок различных ПАУ, относящихся к заданному государству или региону с учетом системных проблем в организации ПООиЗ ВС.

Подобная ММ должна учитывать различные группы ФО (процедуры, противообледенительные жидкости, подготовка и квалификация персонала, проверка поверхностей самолета до и после ПОЗ, оборудование, используемое в процессах ПОЗ ВС).

ММ процесса ПООиЗ должна быть применима в рамках СУБП ПАУ, выполняющей соответствующий вид авиационной деятельности, для целей количественной оценки рисков для БП, контроля и количественной оценки показателей SPI.

Моделирование процессов в рамках систем менеджмента

Реализация процессного подхода. В качестве одного из базовых принципов современные СМК предполагают реализацию процессного подхода [4]. Процессный подход включает в себя систематическое определение и менеджмент процессов и их взаимодействия таким образом, чтобы достигать намеченных результатов в соответствии с политикой в области качества и стратегическим направлением организации [4].

Менеджмент процессов и системы как единого целого может достигаться при использовании цикла «Планируй – Делай – Проверяй – Действуй» (PDCA) совместно с риск-ориентированным подходом (РОП), нацеленных на использование возможностей и предотвращение нежелательных результатов.

Процессы любой организации можно условно разделить на три группы: основные процессы; вспомогательные (или обеспечивающие) процессы; процессы управления [5].

Для ПАУ основными процессами являются производственные (или эксплуатационные) процессы предоставления авиационных услуг.

Моделирование процессов определяется как набор действий, создающих представление существующего или предполагаемого процесса [5]. По своей сути модель представляет собой упрощенное представление сущностей, идей или действий.

Существуют различные подходы к построению ММ процессов, включая: методы системной динамики, сети Петри и специализированные ММ процессов в гражданской авиации.

Возможность моделирования бизнес-процессов, процессов в рамках СМК и Системы экологического менеджмента на основе байесовских сетей доверия (БСД) показана в работах [7, 8]. То есть, показана принципиальная возможность моделирования процессов организации на основе БСД.

БСД. БСД относятся к группе причинно-следственных (каузальных) моделей риска для БП и широко используются в гражданской авиации [9]. БСД упрощенно можно определить как графические структуры для предоставления вероятностных отношений между большим количеством переменных и для осуществления вероятностного вывода на основе этих переменных [10]. Согласно классическому определению БСД представляет собой совокупность ациклического направленного графа G с тензорами условных вероятностей в узлах (вершинах). Метод количественной оценки рисков на основе БСД включен в современное издание международного стандарта ИЕС 31010 [11].

БСД определяется следующим образом: рассмотрим ациклически направленный граф, в вершинах которого стоят пропозиции из множества $S = \{x_1, \dots, x_n\}$, предположим, что к каждой вершине x с предикатами $y_1, \dots, y_k$ приложена таблица условных вероятностей $p(\tilde{x}|\tilde{y}_1, \dots, \tilde{y}_k)$; предположим, что если две вершины x и y d -разделены при введенных свидетельствах $\tilde{E}$, то $p(\tilde{x}|\tilde{E}) = p(\tilde{x}|\tilde{y}\tilde{E})$, тогда такая конструкция называется БСД [9, 10].

Для того, чтобы определить БСД, необходимо задать распределения маргинальных вероятностей (для вершин без предков) и таблицы условных вероятностей. После чего необходимо выполнить алгоритм первичной пропации – получить маргинальные вероятности вершин на основе априорного вывода. Алгоритм первичной пропации (распространения) –

процесс маргинализации всех переменных, кроме одной, вероятность которой и рассчитывается посредством данного процесса. В теории БСД этот алгоритм соответствует одновременно алгоритмам априорного и апостериорного вывода: подсчитывает маргинальные вероятности как в изначальной конфигурации, так и после внесения свидетельств.

Одной из основных идей использования БСД является пропация свидетельств (апостериорный или байесовский вывод): в систему поступает информация о том, что события, соответствующие тем или иным ее вершинам, произошли (или не произошли) [10].

Практические аспекты применения теории БСД подробно обсуждаются в работах [9, 12] и в настоящей статье более подробно рассматриваться не будут. В [9] показана возможность практического применения БСД для расчета вероятности возникновения неблагоприятных событий и определения уровня риска для выявленных ФО по данным эксплуатации, предложен подход к моделированию риска для БП на основе БСД.

ММ риска для БП. Эксплуатационные процессы ПАУ могут быть смоделированы при помощи БСД по аналогии с реализацией процессного подхода в рамках СМК, рассмотренной выше. ММ эксплуатационного процесса ПАУ, используемая для оценки риска для БП, на основе БСД может быть представлена следующим образом:

$$\tilde{R}_{БП} = \{G_{БСД}, P_{БСД}, H_{АП}|E\}, \quad (1)$$

где $G_{БСД}$ – ациклический направленный граф;

$P_{БСД}$ – совокупность таблиц маргинальных и условных вероятностей;

$H_{АП}$ – мера ущерба, в качестве которой будем использовать авиационное происшествие;

E – введенные свидетельства, полученные по результатам анализа данных о БП.

Конечные вершины БСД, в зависимости от предмета конкретного эксплуатационного процесса, могут моделировать как предки, влияющие на проявление ФО, так и потомки конечной вершины модели риска для БП, влияющие на снижение тяжести последствий проявления ФО. На рис. 1 на основе диаграммы IDEF0 [5] показана описанная взаимосвязь модели процесса и ММ риска для БП на основе БСД.

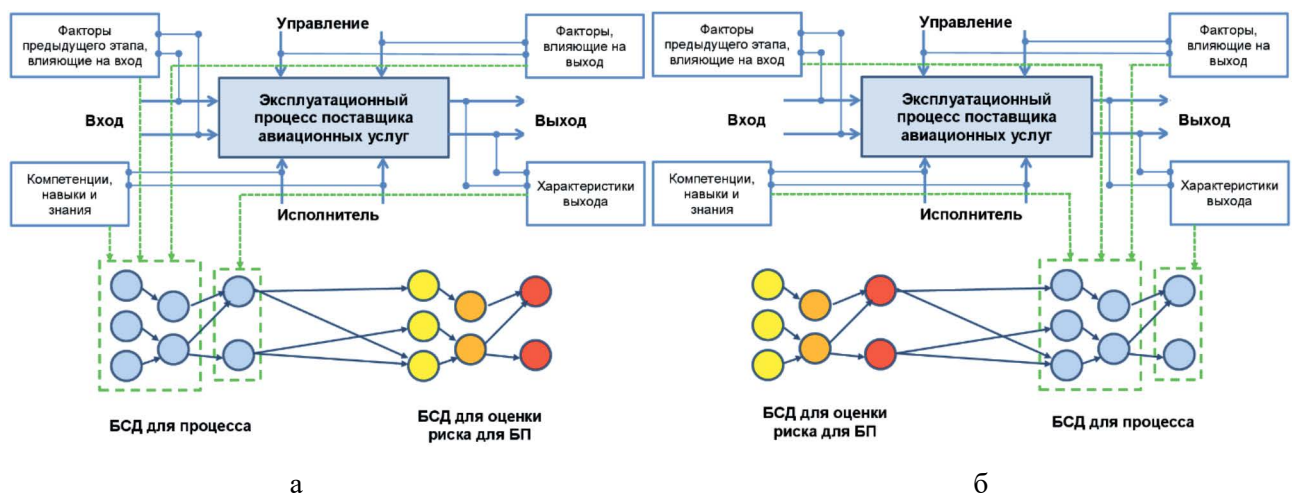


Рис. 1. Варианты взаимосвязи БСД для ММ эксплуатационного процесса и БСД для ММ риска для БП: «выходы» процесса влияют на ФО – а; проявление ФО является «входом» для эксплуатационного процесса – б

Вариант (а) может быть применим для моделирования обеспечивающих процессов, оказывающих влияние на безопасность эксплуатации ВС (подготовка авиационных специалистов, наземное обслуживание, техническое обслуживание и пр.).

Вариант (б) реализован в рамках разработки ММ оценки деятельности аварийно-спасательных служб оператора аэродрома [12]. На основе анализа результатов расследований АП и инцидентов, произошедших с 2004 по 2015, и действий аварийно-спасательных служб операторов аэродромов в сужении тяжести их последствий в [12] приведена разработанная авторами ММ оценки рисков деятельности данной службы.

Математическое моделирование процесса противообледенительной обработки и защиты воздушных судов

Процесс ПООиЗ ВС. Организация ПООиЗ ВС представляет собой совокупность множества взаимосвязанных процессов. В качестве основных элементов процесса организации ПООиЗ ВС можно выделить следующие:

- подготовка и внедрение местной процедуры по ПООиЗ ВС;
- подготовка необходимой инфраструктуры, оборудования для проведения ПООиЗ ВС;
- применение ПОЖ или иных методов ПООиЗ ВС.

Обобщенное описание процесса ПООиЗ ВС обсуждается в докладе [13]. Здесь приведено графическое представление взаимосвязи элементов процесса ПООиЗ ВС, применяемой для контроля качества (рис. 2).

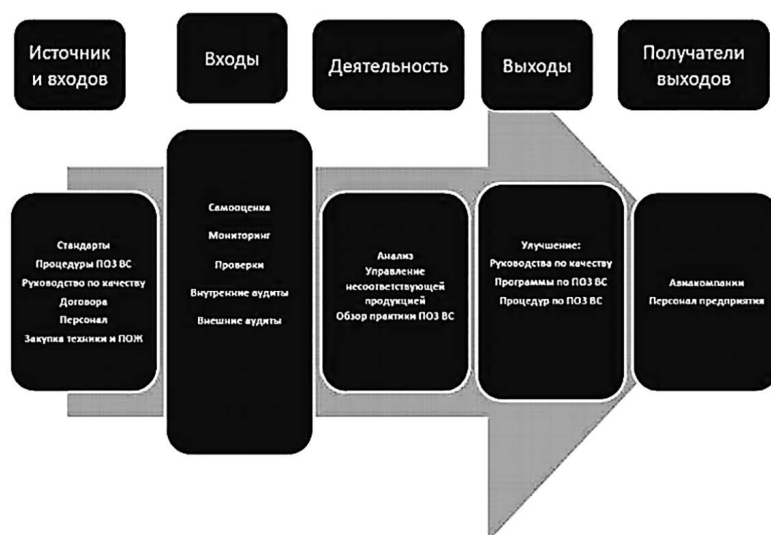


Рис. 2. Графическое представление взаимосвязи элементов процесса ПООиЗ ВС

Графическое представление взаимосвязи элементов процесса ПООиЗ ВС, представленное на рис. 2, соответствует основным элементам процесса организации ПООиЗ ВС и отражает рамочную структуру чек-листа/отчета ОАККОПОЗ [6].

В чек-листе [6] выделены следующие группы требований:

- процедуры;
- ПОЖ;
- подготовка и квалификация персонала;
- проверка поверхностей ВС до и после ПОЗ;
- оборудование, используемое в процессах ПОЗ ВС.

Для решения поставленной задачи в качестве исходных данных о БП будут использоваться результаты контроля качества организации противообледенительной защиты ВС в аэропортах Российской Федерации, а в качестве структуры исходных данных – чек-лист [6] для проведения проверок.

Идентификация ФО. В рамках ММ процесса ПООиЗ под ФО будем понимать выявленные в ходе проведения контроля качества организации ПОЗ ВС несоответствия деятельности ПАУ предъявляемым требованиям [6].

Для этих целей на основе анализа требований [6] выделены дополнительные подгруппы.

Моделирование процесса. Исходя из соотношения (1), структура ММ на основе БСД определяется ациклическим направленным графом $G_{БСД}$.

Ациклический направленный граф $G_{БСД}$ строится на основании анализа структуры требований, используемых при проведении проверки согласно следующим правилам:

- исходными вершинами (вершинами, не имеющими предков) являются требования чек-листа/отчета [6];
- промежуточными вершинами являются:
 - подгруппы требований;
 - типы ПОЖ;
- одному требованию соответствует одна подгруппа требований;
- конечной вершиной, не имеющей потомков, является «Риск ПООиЗ».

На рис. 3 представлена диаграмма влияния [6], построенная на основании матрицы смежности, сформированной согласно приведенным выше правилам.

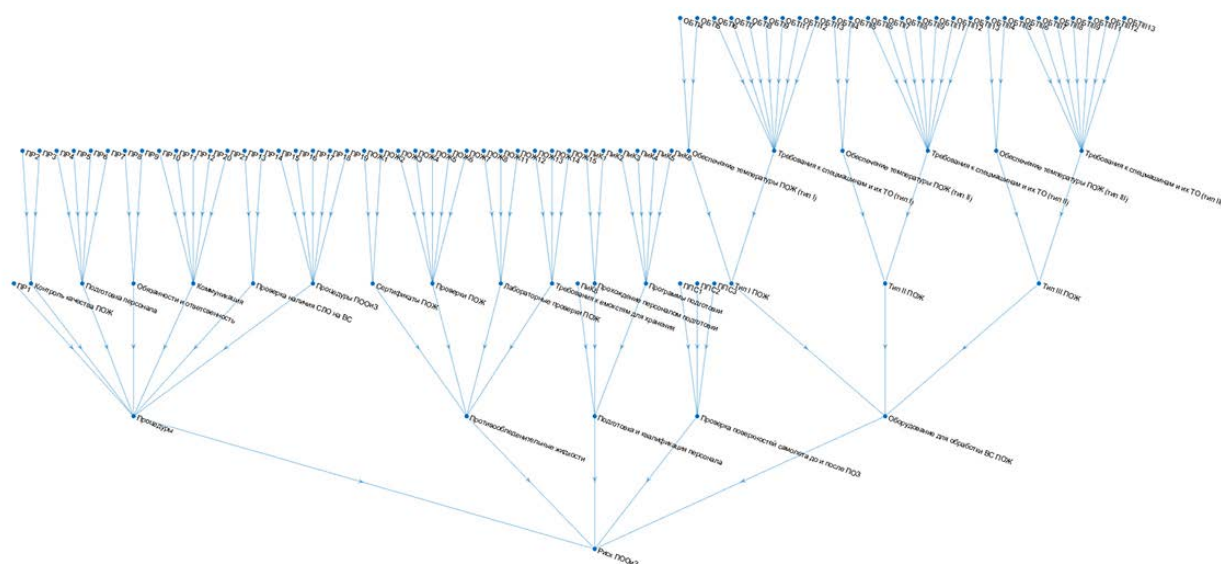


Рис. 3. Диаграмма влияния требований чек-листа/отчета

Далее необходимо определить количество возможных значений для каждой вершины. Для вершин, отражающих результаты проведения проверок, таких значений может быть только два: ФО либо проявился – выполнение требования не подтверждено в ходе проверки, либо не проявился – выполнение требования подтверждено.

У промежуточных вершин, соответствующих подгруппам, таких значений может быть четыре:

- без последствий (Б/П) – ФО не проявился;
- НС3 – незначительные недостатки, предложения аудиторов для улучшения функционирования системы управления деятельностью;
- НС2 – недостатки и нарушения установленных нормативных правил, которые могут нарушить нормальную работу организации;

– НС1 – серьезные недостатки и нарушения установленных нормативных правил, приводящие к ограничению выполнения работ по ПОЗ ВС.

У конечной вершины возможны пять значений, соответствующих шкале тяжести последствий матрицы рисков:

- Б/П (Е);
- инцидент (D) соответствует НС3;
- серьезный инцидент (С) соответствует НС2;
- авиационное происшествие (В) соответствует НС1;
- авиационная катастрофа (А).

В табл. 1 приведена матрица рисков для определения уровня и категории значимости рисков.

Таблица 1

Матрица рисков

		A	B	C	D	E
Часто – 5	до 1 на проверку	5A	5B	5C	5D	5E
	от 0,5 на проверку					
Иногда – 4	до 0,5 на проверку	4A	4B	4C	4D	4E
	от 0,05 на проверку					
Весьма редко – 3	до 0,05 на проверку	3A	3B	3C	3D	3E
	от 0,005 на проверку					
Маловероятно – 2	до 0,005 на проверку	2A	2B	2C	2D	2E
	от 0,0005 на проверку					
Крайне маловероятно – 1	до 0,0005 на проверку	1A	1B	1C	1D	1E
	от 0 на проверку					

Для принятия решения о необходимости разрабатывать мероприятия по снижению риска для БП, применяются категории значимости риска, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Категории значимости риска

№	Категория значимости риска	Необходимость разрабатывать мероприятия
1	Приемлемый риск	Нет необходимости разрабатывать мероприятия по снижению риска
2	Нежелательный риск	Необходимо разрабатывать мероприятия по снижению рисков для БП
3	Неприемлемый риск	Необходимо рассмотреть возможность приостановить соответствующий вид деятельности и разрабатывать мероприятия по снижению риска

Для того, чтобы задать БСД в дополнение к ациклическому направленному графу G , необходимо задать распределения маргинальных вероятностей (для вершин без предков) и таблицы условных вероятностей.

Для произвольной вершины x , не имеющей предков, с количеством возможных значений равное двум, распределение маргинальных вероятностей представляет собой пару $p(x)$ и $p(\bar{x}) = 1 - p(x)$.

Рассмотрим произвольную вершину y , имеющую одного предка x и количество возможных значений равное двум. Для ее задания как вершины БСД нужно задать следующий набор вероятностей:

$$p(y|x), p(y|\bar{x}), p(\bar{y}|x) = 1 - p(y|x), p(\bar{y}|\bar{x}) = 1 - p(y|\bar{x})$$

Таблица условных вероятностей для данного набора приведена в табл. 3.

Таблица 3

Таблица условных вероятностей

X	Y	
	ЛОЖЬ	ИСТИНА
ЛОЖЬ	$1 - p(y \bar{x})$	$p(y \bar{x})$
ИСТИНА	$1 - p(y x)$	$p(y x)$

Исходя из физического смысла рассматриваемой задачи, очевидно, что неблагоприятного события не может произойти в том случае, если ФО не реализуется, поэтому $p(y|\bar{x}) = 1$.

В качестве примера обсудим таблицы маргинальных и условных вероятностей для вершины «Программы подготовки».

Маргинальные вероятности для исходной вершины «Учебная программа и учебные материалы соответствуют требованиям последней редакции SAE AS6286 и доступны для проверки?» (ПиК3) приведены в табл. 4.

Таблица 4

Маргинальные вероятности

Учебная программа и учебные материалы соответствуют требованиям последней редакции SAE AS6286 и доступны для проверки?	
ПиК3	
Ложь (False)	0,9985
Истина (True)	0,0015

Данные, приведенные в табл. 4, следует интерпретировать следующим образом: априорная вероятность невыполнения ПАУ требований по соответствию учебной программы и учебных материалов последней редакции SAE AS6286, а также доступности для проверки составляет 0,0015. Под «Истиной (True)» в данном случае понимается факт выявления в ходе проверки невыполнения ПАУ требования стандарта, соответствующего рассматриваемой вершине.

В табл. 5 приведены значения условных вероятностей выявления несоответствий по группе ФО «Программы подготовки» в результате невыполнения ПАУ хотя бы одного из четырех требований:

– «Записи по подготовке и квалификации ведутся, хранятся и доступны для проверки?» (ПиК4).

– «Практическая подготовка персонала, производящего обработку ВС ПОЖ проводится на оборудовании, используемом Проверяемой организацией?» (ПиК5).

– «Проверка знаний после проведения обучения персонала, вовлеченного в процесс ПОЗ ВС, проведена?» (ПиК6).

– «Подготовка и переподготовка персонала производилась: ...» (ПиК7).

Таблица 5

Маргинальные вероятности

ПиК3	ПиК4	ПиК5	ПиК6	Программы подготовки			
				Б/П	НС3	НС2	НС1
Ложь (False)	Ложь (False)	Ложь (False)	Ложь (False)	1	0	0	0
Ложь (False)	Ложь (False)	Ложь (False)	Истина (True)	0,75	0	0,25	0
Ложь (False)	Ложь (False)	Истина (True)	Ложь (False)	0,75	0	0,25	0
Ложь (False)	Ложь (False)	Истина (True)	Истина (True)	0,5	0	0,5	0
Ложь (False)	Истина (True)	Ложь (False)	Ложь (False)	0,75	0	0,25	0
Ложь (False)	Истина (True)	Ложь (False)	Истина (True)	0,5	0	0,5	0
Ложь (False)	Истина (True)	Истина (True)	Ложь (False)	0,5	0	0,5	0
Ложь (False)	Истина (True)	Истина (True)	Истина (True)	0,25	0	0,75	0
Истина (True)	Ложь (False)	Ложь (False)	Ложь (False)	0,75	0	0,25	0
Истина (True)	Ложь (False)	Ложь (False)	Истина (True)	0,5	0	0,5	0
Истина (True)	Ложь (False)	Истина (True)	Ложь (False)	0,5	0	0,5	0
Истина (True)	Ложь (False)	Истина (True)	Истина (True)	0,25	0	0,75	0
Истина (True)	Истина (True)	Ложь (False)	Ложь (False)	0,5	0	0,5	0
Истина (True)	Истина (True)	Ложь (False)	Истина (True)	0,25	0	0,75	0
Истина (True)	Истина (True)	Истина (True)	Ложь (False)	0,25	0	0,75	0
Истина (True)	Истина (True)	Истина (True)	Истина (True)	0	0	1	0

По результатам первичной пропагации – применения априорной оценки рисков для БП с использованием ММ процесса ПООиЗ, возможно количественно оценить риски, характеризующие систему в целом.

Результаты моделирования

За период с 1 января 2017 по 31 мая 2021 ОАККОПОЗ было проведено 32 аудиторские проверки контроля качества организации противооблуденительной защиты ВС в аэропортах Крайнего Севера. По результатам проверок выявлено 154 несоответствия.

Распределение несоответствий по подразделам чек-листа [6] и уровням тяжести несоответствий приведено в табл. 6.

Таблица 6

Распределение несоответствий

№ п/п	Подраздел чек-листа	Тяжесть несоответствия			Всего
		НС1	НС2	НС3	
1	Процедуры	0	72	0	72
2	Противооблуденительные жидкости	10	13	0	23
3	Подготовка и квалификация персонала	8	10	0	18
4	Проверка поверхностей самолета до и после ПОЗ	0	6	0	6
5	Оборудование, используемое в процессах ПОЗ ВС	2	29	0	31
Всего:					150¹

¹ Для пункта чек-листа ПОЖ10 «Отчеты о лабораторных исследованиях содержат всю необходимую информацию для определения пригодности ПОЖ к ПОЗ ВС» уровень тяжести последствий в чек-листе не задан [6].

Результаты оценки априорного риска для БП, соответствующего ФО, с использованием ММ ПООиЗ, приведены в табл. 7.

Таблица 7

Результаты априорной оценки риска

Тяжесть последствий	Вероятность	Индекс риска	Категория значимости риска	Уровень риска
E	0,925	5E	Приемлемый риск	1
D	0,018	3D	Приемлемый риск	1
C	0,043	3C	Нежелательный риск	2
B	0,014	3B	Нежелательный риск	2
A	0	1A	Приемлемый риск	1

Максимальный уровень риска, информация о котором представлена в табл. 8, равен 2. Категория значимости данного риска согласно «матрице рисков», определенной в табл. 1 и 2, соответствует «нежелательный риск».

Результаты априорной оценки рисков для БП с помощью БСД можно интерпретировать в качестве показателя SPI, так как характеризуется состояние системы в целом и дает возможность отслеживать изменение состояния системы во времени.

По результатам оценки риска для БП с помощью ММ процесса ПООиЗ ВС риску, характеризующему систему аэропортов Крайнего Севера в целом, присвоена категория значимости риска «нежелательный риск». Согласно табл. 2 категория значимости риска «нежелательный риск» предусматривает необходимость разработки мероприятий по снижению риска. Мероприятия по снижению риска для БП, в дополнение к ПАУ, являющимися объектами проверок со стороны ОАККОПОЗ, необходимо разрабатывать уполномоченному органу в области гражданской авиации.

ММ ПООиЗ ВС на основе БСД позволяет выполнить апостериорную оценку риска для БП по всем ФО. Подобная оценка может охарактеризовать результаты конкретной проверки на основании РОП.

Результаты апостериорной оценки риска для БП позволяют выявить совокупность ФО, оказывающих наибольшее влияние на уровень риска для БП системы в целом. По результатам апостериорной оценки рисков для БП с помощью БСД выявлено, что наиболее значимыми ФО являются:

- несоответствия, связанные с прохождением персоналом первоначальной подготовки к выполнению обязанностей;
- несоответствия, связанные с прохождением персоналом переподготовки к осенне-зимнему сезону;
- несоответствия, связанные с использованием ПОЖ Тип I, Тип II или Тип IV для защиты поверхностей от наземного обледенения;
- несоответствия, связанные с выполнением периодических лабораторных проверок образцов ПОЖ;
- несоответствия, связанные с выполнением проверки индекса рефракции образцов подогревающейся ПОЖ, отобранных из баков спецмашин для проведения ПОЗ ВС.

Выводы

Разработанная ММ процесса ПООиЗ, позволяет определять: значение показателя SPI по совокупности ПАУ, относящихся к Крайнему Северу, с учетом проблемы в организации ПООиЗ

ВС (априорный вывод), уровень риска для БП по всем по всем выявленным ФО (апостериорный вывод), уровень риска для БП для каждой из выявленных ФО (апостериорный вывод).

Таким образом, решена задача – определены уровни риска для выявленных ФО и их комбинации. ММ процесса ПООиЗ ВС позволяет на основе реализации РОП сравнивать результаты проверок различных ПАУ между собой или динамику изменения значений по заданному ПАУ.

Разработанная ММ процесса ПООиЗ учитывает различные группы ФО и применима в рамках СУБП ПАУ, выполняющего соответствующий вид авиационной деятельности.

В работе [12] рассматривается основанный на реальных данных о БП практический пример реализации варианта (б) моделирования эксплуатационного процесса ПАУ, при котором проявление ФО является «входом» для эксплуатационного процесса.

В настоящей работе обсуждается основанный на реальных данных о БП практический пример реализации варианта (а) моделирования эксплуатационного процесса ПАУ, при котором «выходы» процесса оказывают влияние на ФО.

Таким образом, продемонстрирована возможность моделирования процессов ПООиЗ на основе БСД, рассматриваемая в настоящей статье.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила разработки и применения систем управления безопасностью полетов воздушных судов, а также сбора и анализа данных о факторах опасности и риска, создающих угрозу безопасности полетов гражданских воздушных судов, хранения этих данных и обмена ими, утверждены постановлением Правительства Российской Федерации от 18.11.2014 № 1215.
2. Annex 19 to the Convention on International Civil Aviation. Safety Management. Second Edition. ICAO, 2016. 46 p.
3. Методические рекомендации «Защита самолетов от наземного обледенения», Повышение эксплуатационной безопасности и поддержание летной годности, Изд.6, 2020, ICAO/IAC/COSCAP – CIS, PROJECT RER 01/901.
4. Stolzer A., Goglia J. Safety Management Systems in Aviation. Second Edition. USA, New York: Routledge, 2016. 395 p.
5. ISO 9001:2015 Quality management systems — Requirements. ISO, 2015. 40 p.
6. BPM CBOK Version 4.0: Guide to the Business Process Management Common Body Of Knowledge Paperback. ABPMP International, 2019. 419 p.
7. Док-ЧЛ-18-03 Чек-лист/отчет контроля качества организации противообледенительной защиты ВС (ревизия 5 от 10 августа 2020). М.: Объединение авиакомпаний по контролю качества организации противообледенительной защиты ВС в аэропортах Российской Федерации, 2020, 23 с..
8. Bobek S., Baran M., Kluza K., Nalepa G. Application of Bayesian Networks to Recommendations in Business Process Modeling // Proceedings of the Workshop AI Meets Business Processes (AIBP 2013), Turin, Italy, December 6, 2013. pp. 41–50,
9. Frank S.K. Expert-based Bayesian Network modeling for environmental management. Doctoral Thesis. Frankfurt (Main): Univ., Inst. of Physical Geography, 2015. 215 p.
10. Рухлинский В.М., Хаустов А.А., Молотовник А.С. Оценка риска в области безопасности полетов на основе байесовской сети доверия // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2017. Т. 20, № 3. С. 76–89.
11. Тулупьев А. Л., Николенко С. И., Сироткин А. В. Байесовские сети: Логико-вероятностный подход. СПб.: Наука. 2006. 607 с.
12. IEC 31010:2019 Risk management – Risk assessment techniques. Edition 2.0, IEC, 2019. 268 p.
13. Рухлинский В.М., Молотовник А.С., Хаустов А.А. Анализ и управление рисками в области аварийно-спасательного обеспечения полетов // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2019. № 26. С. 75–86.

14. Казаков В.Е. Система управления качеством ПОЗ ВС. Доклад на web-конференции «Противообледенительная обработка ВС». М.: МАК, 2020, 34 с.

REFERENCES

1. Rules for the development and application of aircraft safety management systems, as well as the collection and analysis of data on hazards and risk factors that pose a threat to the safety of civil aircraft flights, the storage and exchange of these data. Approved by decree of the Government of The Russian Federation from 18.11.2014 No. 1215. (In Russian).
2. Annex 19 to the Convention on International Civil Aviation. Safety Management. Second Edition. ICAO, 2016. 46 p.
3. Methodical Recommendations «Airplane protection from icing up on the ground», Development of Operational Safety and Continuing Airworthiness, Revision 6, 2020, ICAO/IAC/COSCAP – CIS, PROJECT RER 01/901.
4. Stolzer A., Goglia J. Safety Management Systems in Aviation. Second Edition. USA, New York: Routledge, 2016. 395 pp.
5. ISO 9001:2015 Quality management systems – Requirements. ISO, 2015. 40 p.
6. BPM CBOK Version 4.0: Guide to the Business Process Management Common Body Of Knowledge Paperback. ABPMP International, 2019. 419 p.
7. Doc-CL-18-03 Checklist / report of quality control of the organization of aircraft de/anti-icing (revision 5, August 10, 2020). Moscow: Association of Airlines for quality control of the organization of aircraft de/anti-icing at the airport of the Russian Federation, 2020, 23 (In Russian).
8. Bobek S., Baran M., Kluza K., Nalepa G. Application of Bayesian Networks to Recommendations in Business Process Modeling. Proceedings of the Workshop AI Meets Business Processes (AIBP 2013), Turin, Italy, December 6, 2013, pp. 41–50.
9. Frank S.K. Expert-based Bayesian Network modeling for environmental management. Doctoral Thesis. Frankfurt (Main): Univ., Inst. of Physical Geography, 2015. 215 pp.
10. Rukhlinskiy V.M., Khaustov A.A., Molotovnik A.S. Safety risk assessment using bayesian belief network. *Nauchnyy vestnik MGTU GA = Civil Aviation High Technologies*. 2017, 20(3), pp.76–89. (In Russian).
11. Tulup'ev A.L., Nikolenko S.I., Sirotkin A.V. *Bajesovskie seti: Logiko-veroyatnostnyy podkhod* [Bayesian nets. Logic and probabilistic approach]. SPb., Nauka Publ., 2006, 607 p. (In Russian).
12. IEC 31010:2019 Risk management – Risk assessment techniques. Edition 2.0, IEC, 2019. 268 p.
13. Rukhlinskiy V.M., Molotovnik A.S., Khaustov A.A. Analysis and risk management of rescue maintenance of flights. *Nauchnyy vestnik GosNII GA = Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*. 2019, no. 26, pp. 75–86. (In Russian).
14. Kazakov V.E. Quality management system of aircraft de/anti-icing. Report at the web-conference “Aircraft de/anti-icing “. М.: IAC, 2020, 34 p. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Рухлинский Виктор Михайлович, доктор технических наук, Первый заместитель Председателя МАК, Председатель Комиссии по реализации проекта ИКАО-МАК и связям с международными организациями, Межгосударственный авиационный комитет, ул. Большая Ордынка, 22/2/1, Москва, Российская Федерация, 119017; e-mail: icaomak@mak.ru.

Хаустов Александр Александрович, начальник Отдела анализа и управления рисками департамента управления безопасностью полетов, АО «Авиакомпания «Россия», ул. Пилотов, 18/4, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196210; e-mail: a.khaustov@rossiya-airlines.com.

Вдовенко Роман Анатольевич, Заместитель Председателя Межгосударственного авиационного комитета – Председатель комиссии по международным программам и

экономическим проблемам развития воздушного транспорта, Межгосударственный авиационный комитет, Москва, Большая Ордынка, 22/2, Российская Федерация, 119017; e-mail: vdovenko@mak.ru.

Диогенов Сергей Витальевич, кандидат военных наук, Советник генерального директора, ФГУП Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, ул. Михалковская, д. 67, корпус 1, Москва, Российская Федерация, 125438.

ABOUT THE AUTHORS

Rukhlinskiy Victor M., Doctor of Technical Sciences, Senior Deputy of the Chairperson of IAC, Chairman of the Commission for the realization of the ICAO-IAC Project and relations with international organizations, Interstate Aviation Committee, Bolshaya Ordynka Street, 22/2/1, 119017 Moscow, Russian Federation; e-mail: icaomak@mak.ru.

Khaustov Aleksandr A., Head of analysis and risk management section of the safety management department, JSC Rossiya Airlines, Pilotov st. 18/4, 196210 Saint-Petersburg, Russian Federation; e-mail: a.khaustov@rossiya-airlines.com.

Vdovenko Roman A., Deputy Chairperson of IAC, Chairman of the Commission for international programmes and economic problems of air transport development, Interstate Aviation Committee, Bolshaya Ordynka Street, 22/2, 119017 Moscow, Russian Federation; e-mail: vdovenko@mak.ru.

Diogenov Sergey V., Candidate of Military Sciences, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Mikhalkovskaya Street, 67, building 1, 125438 Moscow, Russian Federation.

УДК 629.7.015.4: 629.7.021.2

ВЛИЯНИЕ ПАКЕТА РЕМОНТНЫХ НАКЛАДОК НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПАНЕЛИ КРЫЛА ПАССАЖИРСКОГО САМОЛЕТА

М.С. ГРОМОВ¹, В.Я. НИЗЕВ², А.В. КОСТЕНКО¹, А.В. СМОРНОВ¹, В.Н. СТЕПАНОВ^{2,3}

¹Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации,
г. Москва, Российская Федерация

²ОАО «Ремонтный завод гражданской авиации № 412»,
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

³Донской государственный технический университет,
г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация. В данной работе освещен вопрос по способам устранения одного из основных дефектов стареющего парка - коррозионного повреждения крыла, характерного для самолета Ан-24, эксплуатирующегося свыше 50 лет. Проведена оценка напряженно-деформированного состояния отсека средней части крыла (СЧК) с повреждением верхней панели по переднему лонжерону. Устранение коррозионных участков предусматривает механическое удаление коррозии, проведение измерений остаточной толщины, определение возможности и целесообразности ремонта рассматриваемым способом, соответствующую обработку вскрытых поверхностей и установку накладки для восстановления исходной местной прочности СЧК. Рассмотрены варианты ремонта одной усиливающей накладкой и пакетом из двух накладок. Вариант ремонта пакетом накладок с перекрытием в зоне дефекта выбран из-за технологических трудностей установки накладок длиной более трех метров с многочисленными коррозионными повреждениями по размаху крыла. Рассматриваются граничные условия на неповрежденном участке крыла с эквивалентными напряжениями в регулярной зоне в 130 МПа и перенесены на варианты крыла с повреждением. В ходе исследования получены данные по напряжениям в регулярной сжатой зоне панели с ремонтом одной накладкой и пакетом накладок, оценен вклад выреза дефекта и отверстий под заклепки в общую картину распределения напряжений. На основе анализа методом конечных элементов сделан вывод о неэффективности установки пакета усиливающих накладок в сжатой зоне панели крыла с дефектом.

Ключевые слова: верхняя панель крыла, коррозионное повреждение, ремонт, пакет накладок, прочность

THE INFLUENCE OF A PACKAGE OF REPAIR LININGS ON THE CONDITION OF THE PANEL OF A PASSENGER AIRCRAFT

M.S. GROMOV¹, V.YA. NIZEV², A.V. KOSTENKO¹, A.V. SMIRNOV¹, V.N. STEPANOV^{2,3}

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

²Rostov Civil Aircraft Factory № 412, Rostov-on-Don, Russia Federation

³Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract. This work highlights the issue of ways to eliminate one of the main defects of aging fleet - corrosion damage of the wing, characteristic of An-24 aircraft operated for more than 50 years. The stress-strain state of the compartment of the middle part of the wing of the passenger aircraft was evaluated with damage to the upper panel along the front spar. Elimination of corrosion areas provides for mechanical removal of corrosion, measurement of residual thickness, determination of possibility and expediency of repair by the method under consideration, appropriate treatment of exposed surfaces and installation of a patch for restoration

of initial local strength of middle part of wing. There are considered versions of repair with one reinforcing lining and a package of two linings. The option of repair with a package of overlapping pads in the defect area was chosen due to technological difficulties of installation of pads with a length of more than three meters with numerous corrosion damages along the wing span. Boundary conditions at undamaged wing section with equivalent stresses in regular zone of 130 MPa are considered and transferred to wing versions with damage. In the course of the study the data on voltages in the regular compressed zone of the panel with repair of one lining and a package of linings were obtained, the contribution of the defect cutout and rivet holes to the overall picture of stress distribution was evaluated. Based on the analysis by the finite element method, conclusion is made about inefficiency of installation of reinforcement lining package in the compressed zone of the wing panel with a defect.

Keywords: top wing panel, corrosion damage, patch, repair, stress-strain state

Введение

Рекомендуемые разработчиком авиационной техники типовые решения ремонта поврежденных участков панелей крыла самолетов предполагают удаление поврежденного участка, при остаточной толщине панели в зоне коррозионного повреждения менее 30 %, и установку усиливающих накладок толщиной на 20 % больше исходного материала [1].

Основным характерным дефектом крыла самолетов являются значительные коррозионные повреждения силовых элементов. Зачастую площади и величины коррозионных повреждений выходят за допустимые пределы указаний по эксплуатации самолетов. Изменение (расширение) условий восстановительного ремонта востребовано эксплуатирующими предприятиями, так как они вынуждены выполнять работы в условиях аэродрома базирования, вместо предписанных условий ремонтных предприятий, что накладывает применение дополнительных технологических требований в политике поддержания летной годности авиапарка самолетов.

Элементы крыла самолета выполнены из конструкционных авиационных материалов Д16Т и В95Т1, которые в условиях эксплуатации и особенно в условиях снижения интенсивности полетов, подвержены коррозионному повреждению. Результаты исследования коррозионной стойкости агрегатов воздушных судов из алюминиевых сплавов стареющего парка [2] свидетельствуют о сложной зависимости от степени агрессивности окружающей среды, и существенном влиянии знакопеременных нагрузок функционирования. Под действием нагрузок в процессе эксплуатации повреждается защитный плакированный слой и происходит дораспад твердого раствора алюминиевого сплава с выделением метастабильных фаз, что в конечном итоге снижает коррозионную стойкость.

Статистика, проведенная авиаремонтным предприятием, показывает, что более 90 % повреждений крыла самолета связано с коррозией [3]. При замене (установке) листов значительных размеров с «разгрузками» по толщине в эксплуатационных подразделениях своими специалистами, как правило, отсутствует возможность выполнения качественного анодного покрытия, даже местное оксидирование мест подгонки и обрезки не производится. В лучшем случае производится обработка поверхностей после механической обработки импортными аэрозолями, не сертифицированными в России. Обозначенные проблемы приводят к тому, что на силовых элементах планера развиваются значительные и протяженные зоны коррозионных повреждений, требующие перекрытия усиливающими элементами большой протяженности, которые не всегда возможно выполнить технологически.

В данной работе исследуется напряженно-деформируемое состояние участка средней части крыла с повреждением верхней сжатой панели по поясу лонжерона с перекрывающей цельной накладкой и перекрывающими накладками со стыком в зоне повреждения. Запасы прочности на панелях с повреждением (вырезом) сопоставляются с неповрежденной панелью.

Постановка задачи

Целью исследования данной работы является оценка напряженного состояния верхней панели крыла с вырезом поврежденной зоны и постановкой двух вариантов усиливающих накладок. В первом варианте оценивается состояние панели под сплошной усиливающей накладкой. Во втором варианте сплошная усиливающая накладка заменена на две с перестыковкой в зоне дефекта панели. Оценка напряжений проводилась в сравнении с неповрежденной панелью. Исследование проводилось на примере средней части крыла (СЧК) самолета Ан-24. На рис. 1 показаны три модели участка крыла: неповрежденный отсек СЧК; отсек СЧК со сплошной ремонтной накладкой; отсек СЧК с перестыковкой накладок в зоне выреза дефекта.

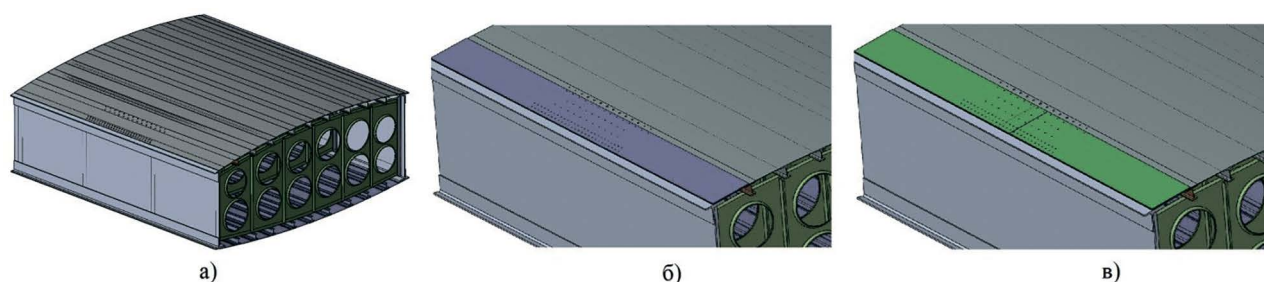


Рис. 1. Модели отсека средней части крыла (СЧК) самолета Ан-24. СЧК: неповрежденный отсек – а; отсек с вырезом и усилением сплошной накладкой – б; отсек с вырезом и усилением двумя накладками с перестыковкой – в

На рис. 2 показан участок модели СЧК с вырезом дефектной зоны и усилением накладками с перестыковкой.

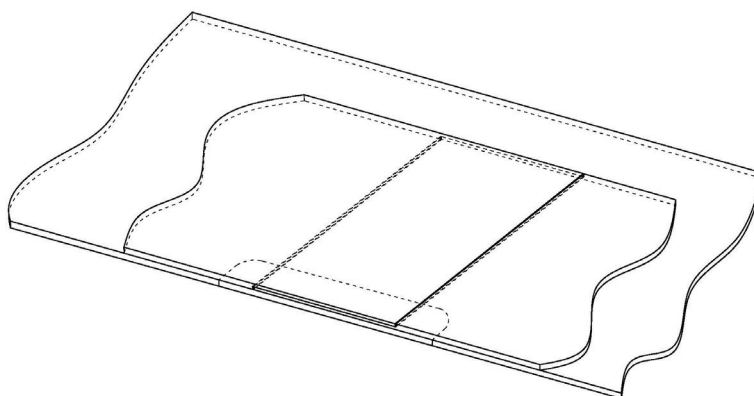


Рис. 2. Участок крыла с вырезом дефектной зоны и усилением накладками с перестыковкой

Выбор метода исследования

Для оценки параметров напряженного состояния панели в зоне концентрации напряжений, обусловленных вырезом поврежденного участка, использован конечно-элементный метод анализа на основе критерия удельной потенциальной энергии формоизменения (четвертой энергетической теории прочности) [4–6]. Условие прочности выражается через эквивалентные напряжения зависимостью [7]:

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \leq [\sigma] \quad (1)$$

где σ ; τ – нормальные и касательные напряжения, соответственно;

$[\sigma]$ – допустимые напряжения;

$\sigma_{\text{экв}}$ – одноосное напряженное состояние эквивалентное по повреждаемости трехосному напряженному состоянию.

Решение задачи

Конечно-элементная модель верхнего неповрежденного участка СЧК самолета Ан-24 представлена напряженным состоянием со значением эквивалентных напряжений в регулярной зоне (лонжерон-стрингер) в 130 МПа. На моделях с вырезом поврежденного участка граничные условия соответствуют неповрежденной модели.

Исходными данными для решения поставленной задачи являются: материал панели Д16чАТ с $\sigma_{\text{в}} = 435$ МПа, $\sigma_{0,2} = 280$ МПа, модуль упругости $E = 69,5$ ГПа [7, 8]. Участок СЧК самолета Ан-24 с четырьмя нервюрами, девятью стрингерами на верхней и нижней панелях. Толщина панели между продольными элементами 1,2 мм, толщина сплошной усиливающей накладки 2,0 мм. Перестыковка накладок исходной толщины в 2 мм в зоне повреждения произведена их подфрезеровкой под толщину 1 мм и соединением подфрезерованных панелей «в нахлестку». Анализируемые участки панели (панель-лонжерон, панель-стрингер, панель-накладка, накладка-накладка) решались в контактной постановке и с применением в расчетной модели заклепок в виде балочных элементов из материала В65 диаметром 3,5 мм. Расчетная модель конечно-элементного анализа смоделирована плоскими элементами [9–12].

Результаты расчетов неповрежденного участка СЧК, участка СЧК с заполнителем выреза на пять заклепок по лонжерону и сплошной накладкой, участка СЧК с заполнителем выреза по лонжерону и двумя перестыкующими накладками представлены на рис. 3–5.

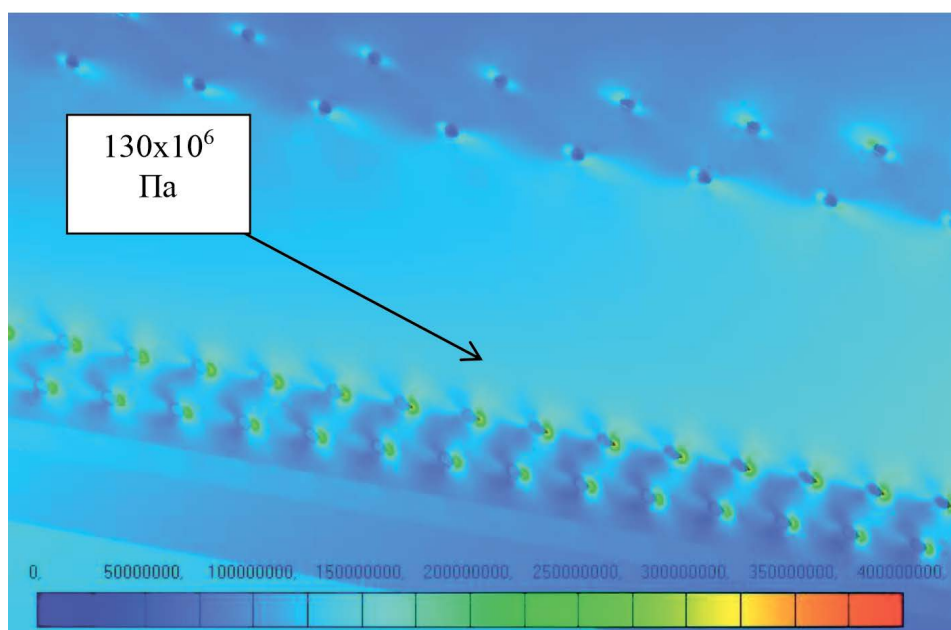


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние верхней неповрежденной панели СЧК; напряжения по Мизесу, Па

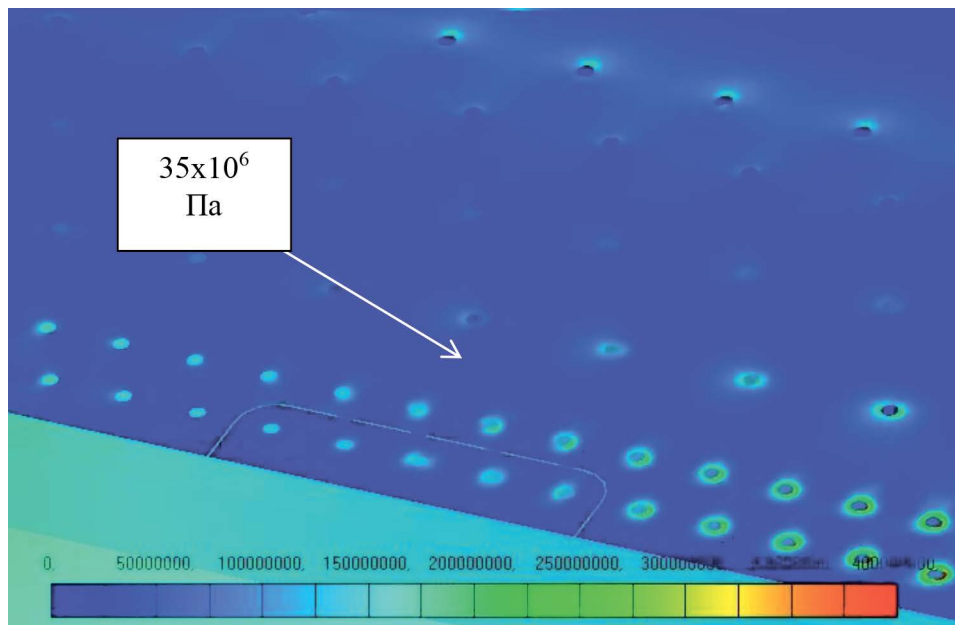


Рис. 4. Напряженно-деформированное состояние верхней панели СЧК вырезом дефектной зоны и усилением сплошной накладкой (накладка не показана); напряжения по Мизесу, Па

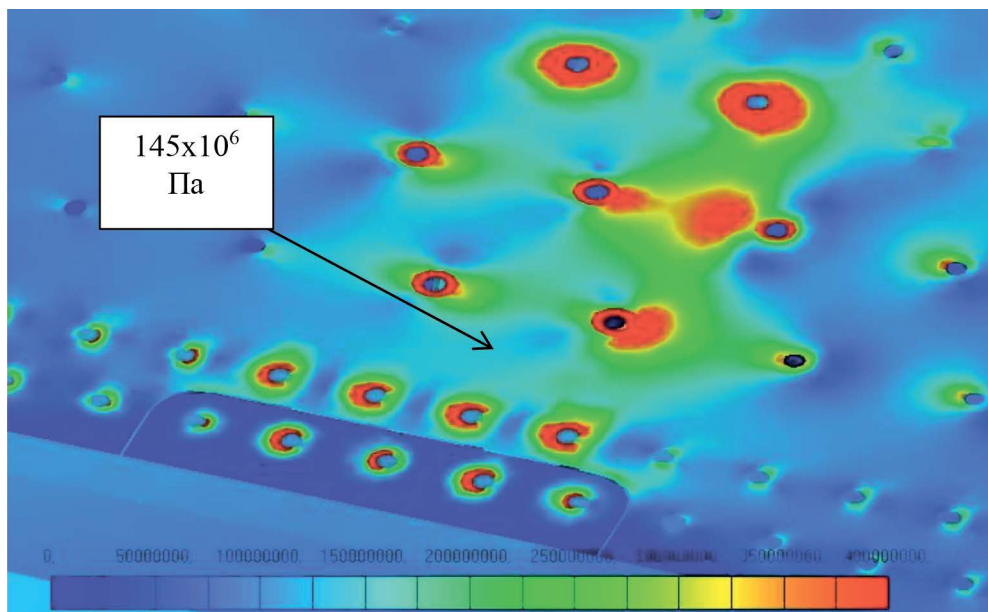


Рис. 5. Напряженно-деформированное состояние верхней панели СЧК с вырезом дефектной зоны и усилением накладками с перестыковкой (накладки не показаны); напряжения по Мизесу, Па

Результаты

В результате проведенной работы установлено следующее:

1. Сплошная накладка на панели крыла с вырезом включается в работу и снижает напряжения в регулярной зоне выреза до 35 МПа.

2. Технологический пакет из двух перестыкованных накладок «внахлест» (1,0 плюс 1,0 мм) повышает напряжения в регулярной зоне до 135 – 145 МПа.

3. Пакет из двух накладок вносит дополнительные возмущения в распределение нагрузки по заклепкам. Момент в пакете панель-накладка-накладка увеличивает величину концентрации напряжений, которая способствует снижению циклической долговечности панели.

Выводы

В ходе исследования получены данные по напряжениям в регулярной сжатой зоне панели с ремонтом одной накладкой и пакетом накладок, оценен вклад выреза дефекта и отверстий под заклепки в общую картину распределения напряжений.

Выполнен конечно-элементный анализ верхней сжатой панели крыла ослабленной вырезом дефектной зоны у переднего торца с вариантом ремонта путем постановки пакета усиливающих накладок, выполненных «внахлест» в зоне повреждения.

Используемый в практике эксплуатации технологический вариант местного усиления разрезной накладкой эффективно не компенсирует устранение снижения влияния повреждения на усталостную долговечность панели СЧК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Технологические указания по техническому обслуживанию самолетов Ан-24, Ан-26, Ан-30 всех модификаций. Выпуск 26-12. Текущий ремонт самолетов. ЗАО «АНТЦ Технолог», 2012. 404 с.
2. Васильев В.Ю., Шапкин В.С., Метелкин Е.С., Дуб А.В. Коррозия и старение воздушных судов при длительной эксплуатации. М.: Логос, 2007. 222 с.
3. Актуальные аспекты развития воздушного транспорта (Авиатранс-2019): материалы международной научно-практической конференции (Ростов-на-Дону, 21-23 июня 2019 г.): в 2 т. Т. 1 / Г.Л. Акопов [и др.]. Ростов-на-Дону: Фонд науки и образования, 2019. С.75–81.
4. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Несущая способность и расчет деталей машин на прочность: руководство и справочное пособие. Изд. 3-е, перераб. и доп. Под ред. С.В. Серенсена. М.: Машиностроение, 1975. 488 с.
5. Саргсян А.Е. Сопротивление материалов, теория упругости и пластичности. Основы теории с примерами расчетов: учебник для вузов. 2-е изд. испр. и доп. М.: Высшая школа, 2000. 286 с.
6. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин: справочник. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.
7. Астахов М.Ф., Караваев А.В., Макаров С.Я, Суздальцев Я.Я. Справочная книга по расчету самолета на прочность. М.: Государственное издательство оборонной промышленности, 1954. 710 с.
8. Авиационные материалы. Т. 4. Алюминиевые и бериллиевые сплавы / Под общей ред. д.т.н. Р.Е. Шалина. М.: ОНТИ, 1982. 627 с.
9. Басов К.А. Ansys для конструкторов. М.: ДМК Пресс, 2016. 248 с.
10. Басов К.А. Ansys. Справочник пользователя. М.: ДМК Пресс, 2005. 640 с.
11. Рудаков К.Н. Femap 10.2.0. Геометрическое и конечно-элементное моделирование конструкций. Киев: КПИ, 2011. 317 с.
12. Шимкович Д.Г. Расчет конструкций в MSC/Nastran for Windows. М: ДМК, 2003. 448 с.

REFERENCES

1. Technological instructions for the maintenance of An-24, An-26, An-30 aircraft of all modifications. Issue 26-12. Aircraft maintenance. ZAO «ANTTS Tekhnolog» Publ., 2012, 404 p. (In Russian).

2. Vasilev V.Yu., Shapkin V.S., Metelkin E.S., Dub A.V. *Korroziya i starenie vozdukhnykh sudov pri dlitel'noj ehkspluatatsii* [Corrosion and aging of aircraft during long-term operation]. Moscow. Logos Publ., 2007, 222 p. (In Russian).

3. *Aktual'nye aspekty razvitiya vozdušnogo transporta (Aviatrans-2019). Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Actual aspects of the development of air transport (Aviatrans-2019). materials of the international scientific and practical conference]. (Rostov-on-Don, June 21-23, 2019). In 2 volumes. V. 1. G.L. Akopov [and others]. Rostov-on-Don. Fond nauki i obrazovaniya Publ., 2019, pp. 75–81. (In Russian).

4. Serensen S.V., Kogaev V.P. Shneiderovich R.M. *Nesushchaya sposobnost' i raschet detalej mashin na prochnost'. Rukovodstvo i spravocnoe posobie* [Bearing capacity and strength calculation of machine parts. Manual and reference manual]. Ed. 3rd, rev. and add. Ed. S.V. Serensen. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1975, 488 p. (In Russian).

5. Sargsyan A.E. *Soprotivlenie materialov, teoriya uprugosti i plastichnosti. Osnovy teorii s primerami raschetov. Uchebnik dlya vuzov* [Resistance of materials, theory of elasticity and plasticity. Fundamentals of theory with examples of calculations. Textbook for universities]. 2nd ed. rev. and add. Moscow. Vysshaya shkola Publ., 2000, 286 p. (In Russian).

6. Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. *Raschet na prochnost' detalej mashin. Spravochnik* [Strength calculation of machine parts. Handbook]. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1993, 640 p. (In Russian).

7. Astakhov M.F., Karavaev A.V., Makarov S.Ya. Suzdaltsev Ya.Ya. *Spravochnaya kniga po raschetu samoleta na prochnost'* [Reference book on strength calculation of an aircraft]. Moscow. Gosudarstvennoe izdatel'stvo oboronnoj promyshlennosti Publ., 1954, 710 p. (In Russian).

8. *Aviatsionnye materialy. T.4. Alyuminievye i berillievye splavy* [Aviation materials. V. 4. Aluminum and beryllium alloys]. Ed. R.E. Shalina. Moscow. ONTI Publ., 1982, 627 p. (In Russian).

9. Basov K.A. *Ansys dlya konstruktorov* [Ansys for designers]. Moscow. DMK Press Publ., 2016, 248 p. (In Russian).

10. Basov K.A. *Ansys. Spravochnik pol'sovatelya* [Ansys. User guide Moscow. DMK Press Publ., 2005, 640 p. (In Russian).

11. Rudakov K.N. *Femap 10.2.0. Geometricheskoe i konechno-ehlementnoe modelirovanie konstruktsij* [Femap 10.2.0. Geometric and finite element modeling of structures]. Kiev. KPI Publ., 2011, 317 p. (In Ukraine).

12. Shimkovich D.G. *Raschet konstruktsij v MSC/Nastran for Windows* [Structural analysis in MSC / Nastran for Windows. Moscow. DMK Press Publ., 2003, 448 p. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Громов Михаил Степанович, кандидат технических наук, главный конструктор, ФГУП Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, ул. Михалковская, д. 67, корпус 1, Москва, Российская Федерация, 125438; e-mail: gosniiga@gosniiga.ru.

Низев Владимир Яковлевич, главный технолог, ОАО «Ростовский завод гражданской авиации № 412», пр. Шолохова, 282, Ростов-на-Дону, Российская Федерация, 344009; e-mail: v_nizev@rfca412.ru.

Костенко Андрей Викторович, ведущий инженер-конструктор, ФГУП Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, ул. Михалковская, д. 67, корпус 1, Москва, Российская Федерация, 125438; e-mail: jestynshik@yandex.ru.

Смирнов Андрей Валериевич, ведущий инженер-конструктор, ФГУП Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, ул. Михалковская, д. 67, корпус 1, Москва, Российская Федерация, 125438; e-mail: 2017_asm@mail.ru.

Степанов Валентин Николаевич, инженер-конструктор, ОАО «Ростовский завод гражданской авиации № 412», пр. Шолохова, 282, Ростов-на-Дону, Российская Федерация,

344009; старший преподаватель, Донской государственный технический университет, пр. Гагарина, 1, Ростов-на-Дону, Российская Федерация, 344000; e-mail: st_fem@bk.ru.

ABOUT THE AUTHORS

Gromov Mikhail S., Candidate of Technical Sciences, Chief Designer, Scientific Center for Aircraft Airworthiness Maintenance, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Mikhalkovskaya Street, 67, Building 1, 125438 Moscow, Russian Federation; e-mail: gromov@ncplg.ru.

Nizev Vladimir Ya., Chief Technologist, Rostov Civil Aircraft Factory № 412, 282 Sholokhov Ave., 344099 Rostov-on-Don, Russian Federation; e-mail: v_nizev@rfca412.ru.

Kostenko Andrey V., Leading Design Engineer, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Mikhalkovskaya Street 67, building 1, 125438 Moscow, Russian Federation; e-mail: jestynshik@yandex.ru.

Smirnov Andrey V., Leading Design Engineer, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Mikhalkovskaya Street, 67, Building 1, 125438 Moscow, Russian Federation; e-mail: 2017_asm@mail.ru.

Stepanov Valentin N., Design Engineer, Rostov Civil Aircraft Factory № 412, Sholokhov Ave. 282, 344099 Rostov-on-Don, Russian Federation; Senior lecturer, Don State Technical University, 1. Gagarina Square, 344000 Rostov-on-Don, Russian Federation; e-mail: st_fem@bk.ru.

УДК 504.054:656.71

ПРИМЕНЕНИЕ МЕР СБАЛАНСИРОВАННОГО ПОДХОДА ИКАО К УПРАВЛЕНИЮ АВИАЦИОННЫМ ШУМОМ ПРИ ОБОСНОВАНИИ И КОНТРОЛЕ РАЗМЕРОВ ШУМОВОЙ ЗОНЫ ПРИАЭРОДРОМНОЙ ТЕРРИТОРИИ

М.О. КАРТЫШЕВ

*Центр экологической безопасности гражданской авиации,
г. Москва, Российская Федерация*

Аннотация. В статье рассматривается один из аспектов сбалансированного подхода ИКАО к управлению авиационным шумом применительно к планированию и организации землепользования на приаэродромной территории. Показана возможность и необходимость актуализации документов нормативно-технического регулирования правил разработки, согласования и использования седьмой подзоны приаэродромной территории на их соответствие рекомендациям ИКАО в целях снятия остроты проблемы, связанной с авиационным шумом при планировании землепользования. По результатам исследований предложены рекомендации, в числе которых сформирован вывод необходимости провести ревизию 157 выполненных проектов шумовых зон, установленных решением Росавиации в качестве седьмых подзон приаэродромных территорий аэродромов гражданской авиации, после начала действия «Методики установления седьмой подзоны приаэродромной территории, расчета и оценки рисков для здоровья человека».

Ключевые слова: ИКАО, авиационный шум, приаэродромная территория, планирование и организация землепользования, верификация шумовой зоны

APPLICATION OF ICAO BALANCED APPROACH MEASURES TO AIRCRAFT NOISE MANAGEMENT IN JUSTIFICATION AND CONTROL OF THE SIZE OF THE NOISE ZONE OF THE AERODROME TERRITORY

M.O. KARTYSHEV

Civil Aviation Environmental Safety Center, Moscow, Russian Federation

Abstract. The article discusses one of the aspects of the ICAO balanced approach to aircraft noise management in relation to the planning and organization of land use in the aerodrome area. The possibility and necessity of updating the documents of normative and technical regulation the rules for the development, approval and use of the seventh subzone of the aerodrome territory for compliance with ICAO recommendations in order to remove the acuteness of the problem associated with aircraft noise in land-use planning. Recommendations based on the research results were proposed, including the conclusion of the need to revise 157 completed projects of noise zones established by the decision of the Federal Air Transport Agency as the seventh subzones of the aerodrome territories of civil aviation aerodromes, after entry into force the «Methodology for establishing the seventh subzone of the aerodrome territory, calculation and risk assessment for human health».

Keywords: ICAO, aircraft noise, aerodrome territory, land-use planning, noise zone verification

Введение

Оценка проблемы авиационного шума (далее – АШ) вблизи международных аэропортов является предметом постоянной озабоченности Ассамблеи ИКАО (Дос 10075) [1], которая формулирует оценку и подход к управлению АШ, рекомендует государствам «...применять политику планирования и организации землепользования с целью ограничения расширения несовместимого строительства в районах, чувствительных к воздействию шума при решении проблем шума в своих международных аэропортах... применять сбалансированный подход к управлению шумом, полностью учитывая инструктивный материал ИКАО Дос 9829-AN/451..» [2], который включает четыре основных элемента: снижение шума в источнике, планирование и организация землепользования, эксплуатационные приемы снижения шума и эксплуатационные ограничения в отношении воздушных судов (далее ВС).

Среди указанных элементов для целей проводимых в настоящее время операторами аэродромов Российской Федерации работ по обоснованию размеров шумовой зоны приаэродромной территории (далее ПАТ) наибольшее значение имеет «...планирование и организация землепользования...». Этой проблеме и конкретным рекомендациям по ее решению также уделено значительное внимание и в других документах ИКАО: Дос 9184-AN/902/2 [3] и Дос 8168 [4].

Для урегулирования ситуации с застройкой в границах шумовых зон ПАТ, приводящей к ограничениям в эксплуатации аэродромов Российской Федерации, а также упорядочивания вопроса планирования территорий поселений и предвосхищая незаконное размещение объектов недвижимости и (или) следующие за этим судебные разбирательства при наложении ограничений на использование земельных участков и объектов капитального строительства физических и юридических лиц, при установлении шумовой зоны ПАТ в качестве зоны с особыми условиями использования территории были приняты Федеральные законы от 01.07.2017 № ФЗ-135 [5] и от 11.06.2021 № ФЗ-191 [6], определяющие необходимость установления в составе ПАТ седьмой подзоны, которая определяется в качестве зоны негативного воздействия, под которым подразумевается шумовое воздействие, обусловленное полетами воздушных судов.

Организованная Росавиацией и операторами аэродромов работа по разработке шумовых зон в составе проектов ПАТ с 2017 по июль 2021 года формально завершена для 157 аэродромов гражданской авиации с вынесением решений об их установлении в соответствии с положениями [5]. В условиях отсутствия полноценного методического процесса обоснования, верификации, согласования и контроля границ шумовых зон, а также понимания вопросов предотвращения размещения жилой застройки на ПАТ из условий АШ эту работу нельзя считать успешной.

Предоставление сведений о перспективном развитии аэродрома не стандартизировано и оператор аэродрома ограничен только пропускной способностью ВПП, предполагаемым строительством аэропортовых сооружений и своей фантазией. Результаты построения шумовых зон ПАТ аэродромов Российской Федерации могут не соответствовать объективной шумовой картине не только по причине сознательного или нет построения недостоверных шумовых зон, но и по причине отсутствия объективных и исчерпывающих сведений о сценарии эксплуатации аэродрома.

Опыт проведения работ по оценке негативного воздействия аэропортов (аэродромов) на окружающую среду и попытки не допустить расширения жилой застройки в целях неухудшения условий проживания в зоне воздействия АШ, показал практическую невозможность для операторов аэродромов гражданской авиации уверенно отстоять свою позицию и право на будущее обоюдное развитие аэродромов и населенных пунктов в части реализации градостроительного развития. Это противоречие является главным лейтмотивом отказа в согласовании шумовых зон аэродромов, расположенных вблизи развивающихся жилых территорий крупных городов.

Этому имеется несколько причин, обусловленных в том числе недостатками в сфере нормативно-технического регулирования правил расчета, подтверждения, установления и контроля шумовой зоны ПАТ. Четырехлетний опыт разработки решений по установлению размеров ПАТ выявил отсутствие у проектировщиков и органов экспертизы понимания порядка определения размеров седьмой подзоны ПАТ, что происходит прежде всего из-за отсутствия методической базы достоверного учета воздействия АШ, а также анализа последствий для аэропортов (аэродромов) и муниципальных органов власти установления недостоверных размеров седьмой подзоны ПАТ, как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения ее площади.

Многие аэродромы федерального значения длительное время не могут согласовать размеры расчетной седьмой подзоны по фактору неблагоприятного воздействия АШ, если это противоречит планам развития территорий. В свою очередь, неучет зоны воздействия АШ и проведение жилищной политики, приближающая жилую застройку к маршрутам движения ВС и границам землеотвода аэродрома приведет к ограничениям его (аэродрома) эксплуатации и пропускной способности в части введения лимитов на количество взлетно-посадочных операций (далее – ВПО), запрета эксплуатации шумных типов ВС и производства ночных полетов.

Возможная ответственность за установление седьмой подзоны ПАТ в недостоверных размерах и поиск способов доказательства их объективности для операторов аэродромов возникла впервые, что в первую очередь обусловлено отсутствием соответствующего нормативно-технического механизма подтверждения выполненных расчетных построений. К сожалению, существующее отечественное воздушное и санитарное законодательство не способствует решению этой сложной задачи, хотя есть примеры авиационно развитых стран, где проблеме АШ уделяется достаточно внимания и претворяются в жизнь мероприятия по предупреждению, уменьшению и исключению рисков, связанных с АШ при реализации положений «Сбалансированного подхода».

Представляется целесообразным показать направление инициатив и рекомендаций ИКАО, применение которых позволит поэтапно снять остроту существующей проблемы АШ в области оценки, контроля границ шумового воздействия и размещения объектов недвижимости в них. Настоящий подход не претендует на полноту исследований, а лишь кратко отражает суть поставленной задачи добиться совместимости эксплуатации аэропортов с требованиями по развитию жилых территорий населенных пунктов, расположенных в зоне полетов ВС.

Состояние проблемы обоснования и согласования размеров шумовой зоны приаэродромной территории

Вступление в силу Федерального закона от 01.07.2017 № 135-ФЗ [5] явилось настоящим законодательным прорывом в части оценки и представления проблемы АШ в целях учета интересов сосуществования эксплуатации аэродрома при осуществлении градостроительной политики, однако этого оказалось недостаточно для ее решения.

Разрабатываемые операторами аэродромов проекты шумовых зон седьмых подзон ПАТ ограничивают права граждан и обеспечивают оператору аэродрома осуществление коммерческой деятельности в границах зоны запрещения строительства. В это же время операторы аэродрома настаивают на своей непричастности к ограничению прав граждан, вызванных повышенным шумовым воздействием при полетах ВС, обслуживаемых на аэродромах, находящихся в их (операторов) управлении, что противоречит требованиям ИКАО (Doc 9184), согласно которым ответственность за экологическую обстановку при эксплуатации аэродрома возложена на полномочный орган, который должен принимать решения о снижении шумового воздействия, в том числе эксплуатационными мерами. Объективно таким полномочным органом является оператор аэродрома в связи с тем, что и ранее при разработке «Акустического паспорта

аэропорта» и в настоящее время, в соответствии с требованиями Воздушного кодекса РФ, обоснование границ шумовой зоны ПАТ находится в рамках его ответственности.

До вступления в силу Федерального закона № 135-ФЗ [5] такому отношению к проблеме АШ способствовала многолетняя позиция государственных органов (Минтранс и др.) и юридических лиц (операторы аэродромов), которые устранились от исполнения требований ИКАО по учету АШ, где краеугольным камнем являются требования Doc 8168 «...Государство, в котором расположен аэродром, несет ответственность за обеспечение того, чтобы эксплуатанты аэродромов указывали расположение зон, чувствительных к воздействию шума, и/или местоположение устройств контроля шума и, при необходимости, допускаемые ими соответствующие максимальные уровни шума. Эксплуатанты воздушных судов несут ответственность за разработку эксплуатационных правил в соответствии с положениями настоящей главы, отвечающих требованиям по шуму эксплуатантов аэродромов...» [4]. Тем самым однозначно за Минтрансом, эксплуатантами аэродромов и ВС определена ответственность за учет АШ, а не за Роспотребнадзором, чья функция состоит в надзоре за воздействием АШ и принятию административных мер, нацеленных на его снижение.

Принятые законодательные акты [5] и [6] соответствуют подходам ИКАО в части согласования Росавиацией размеров установленных шумовых зон: «...Полномочные органы могут установить контуры шума законодательным актом или правилами, которые возложат ответственность за выполнение соответствующих требований на конкретных руководителей землепользования... Они могут также включать требования и ограничения в отношении жилищной застройки и, что более важно, контуры шума с учетом нынешнего и планируемого объема воздушного движения, соответствующие индексу шума, используемого для установления вышеупомянутых ограничений в отношении жилищного строительства ...» [3], однако этого оказалось недостаточно для их согласования рядом Высших исполнительных органов субъектов РФ.

Особенно сложная ситуация с согласованием границ шумовой зоны ПАТ сложилась для аэродромов Московского авиаузла, городов: Санкт-Петербург, Иркутск, Екатеринбург, Краснодар, Омск, Сочи, Минеральные Воды и ряда других, где аэродромы и воздушные подходы к ним располагаются в границах городов и крупных населенных пунктов. В сложившейся тупиковой ситуации все органы власти провоцируют оператора аэродрома на обоснование границ седьмой подзоны заниженных размеров и установлению в ее границах ограничений использования объектов недвижимости и земельных участков, противоречащих требованиям санитарного законодательства.

В рамках действующего законодательства Российской Федерации и нормативно-технического регулирования его исполнение в части учета АШ при планировании территории, является в настоящий период времени затруднительным по причинам его незавершенности, что проявляется в отсутствии порядка нормативно-технического регулирования и требований к его исполнению, отсутствии методик установления и контроля шумовой зоны ПАТ, отсутствии объективного учета АШ в рамках разработки проектов жилых зданий и, соответственно, отсутствии объективных компенсационных мероприятий для объектов защиты. Застройщики, в свою очередь, и готовы выполнять указанные мероприятия, но санитарное законодательство не предоставляет подобного механизма, понуждая застройщиков фальсифицировать результаты измерений на этапе инженерно-экологических изысканий в целях удовлетворения фактически неисполнимых требований санитарного законодательства, повсеместным игнорированием даже согласованных шумовых зон аэродромов (например, в виде санитарного разрыва даже утвержденных проектов санитарно-защитных зон аэродромов) в правилах землепользования и застройки. [7].

Предлагаемые в обоснование границ шумовых зон противоречащие санитарному законодательству формулировки не приводят ни к градостроительному, ни инвестиционному развитию региона, т.к. реально не являются выходом из сложившейся ситуации, а только

откладывают решение проблемы и содействуют дальнейшему бесконтрольному размещению объектов недвижимости без объективного учета воздействия АШ.

Несовершенство, а в ряде случаев и отсутствие методической документации позволяет Правительству субъекта РФ заявлять о несоответствии и недостоверности любой шумовой зоны, а аэродром, даже имея необходимое санитарно-эпидемиологическое заключение Управления Роспотребнадзора о соответствии размеров шумовой зоны, в свою очередь, не может опровергнуть заявления о ее несоответствии в силу отсутствия доказательной базы, подтверждающей обоснованность ее установления в тех или иных размерах.

Достоверность информации о шумовой обстановке обеспечивается набором нормативно-технической документации, описывающей методику построения границ зон шумового воздействия, контроля соблюдения и ответственности всех сторон, участвующих в разработке шумовых зон и их использования, которая сегодня отсутствует при разработке проектов ПАТ. Что привело к ситуации, при которой ни одна из рассмотренных Росавиацией зон шумового воздействия не может быть определена как достоверная, и в будущем данная ситуация может привести к условиям, при которых не только перспективный, но и текущий режим эксплуатации аэродрома может быть ограничен ввиду требований законодательства в части соблюдения установленных границ шумовой зоны ПАТ, так как «...Изменение шумовой обстановки зависит от планирования и организации землепользования вокруг аэропорта, инфраструктуры аэропорта, а также состава и эксплуатации парка воздушных судов. Дальнейшее увеличение объема и развитие воздушного движения может быть ограничено нерациональным использованием земельных участков вокруг аэропортов...» [2].

Анализ выполненных проектов построения контуров АШ, ограничивающих площадь территории шумовой зоны, показал, что отсутствие методической базы обоснования размеров шумовой зоны является наиболее проблемным для проектировщиков, которые, не имея соответствующего опыта всесторонней оценки, просто ссылаются на «выполнение расчетов с применением программного продукта AEDT (США)» [8] и получают «необходимые» размеры шумовой зоны. Это же является поводом и причиной постоянных корректировок границ шумовых зон аэродромов (иногда дважды за один год), когда из-за отсутствия понимания как у проектировщиков и органов экспертизы, так и у оператора аэродрома последствий таких корректировок, в том числе, в связи с отсутствием сведений о реально ожидаемых уровнях шума на местности.

Данное положение противоречит требованиям ИКАО, определяющим общие критерии подхода государств к реализации «Сбалансированного подхода...». Приведенные в указанных документах практические примеры его реализации в ряде международных аэропортов, позволяют сделать основополагающий вывод о том, что реализация каких-либо действий, направленных на ограничение эксплуатации земельных ресурсов или аэродромов, должна происходить только после получения достоверной информации о шумовой обстановке на прилегающей к аэродрому территории и оценки остроты проблемы АШ...» [1].

Достоверность обеспечивается инструментальным подтверждением или необходимой корректировкой по результатам натурных исследований границ шумовых зон – верификацией, что является трудоемким многоступенчатым процессом, который ИКАО рекомендуется проводить «...с применением систем мониторинга АШ, обеспечивающих основу для будущих аспектов планирования землепользования, отслеживания полетов, составления регулярных отчетов о результатах мониторинга АШ, включая отклонения отдельных рейсов от маршрутов полета в течение контролируемого периода времени, предоставления доказательств, расследования жалоб, информирования и общения с общественностью...» [4]. По состоянию на 2016 год в странах Европы в 54 аэропортах функционировали 697 станций мониторинга шума в составе аэродромных систем.

Выполнение работ по верификации границ шумового воздействия натурными исследованиями целесообразно в первую очередь для операторов аэродромов, которые

в настоящий период времени не могут доказать безальтернативность наличия шумового воздействия, связанного с полетами ВС, и, как следствие, не имеют возможности доказать легитимность установления ограничений на размещение жилых объектов из условий воздействия АШ.

Для аэродромов с высокой интенсивностью полетов контроль шумовой зоны после ее установления должен осуществляться на постоянной основе в связи с тем, что шумовое воздействие данных аэродромов затрагивает интересы множества физических и юридических лиц, и установление границ шумовой зоны ПАТ таких аэродромов должно носить наиболее точный и достоверный характер. Контроль шумовой зоны после ее установления на текущий период времени законодательно не предусмотрен, что предопределяет значительные отклонения уровней шума, полученных расчетным способом и в дальнейшем наблюдаемых в процессе проведения натурных исследований.

Здесь следует отметить отсутствие государственной политики в отношении малых аэродромов с низкой интенсивностью полетов в малонаселенной местности, для которых применяются завышенные требования при разработке проектов СЗЗ (до вступления в силу Федерального закона №135-ФЗ от 01.07.2017 г.) и ПАТ, например, в части обязательного выполнения работ по оценке риска для здоровья человека от транспортного шума [9]), которые, кроме дополнительных расходов по их оплате, не несут какого-либо доказанного ущерба [10].

Помимо неполноты и отсутствия описания проектировщиками аналитических подходов к проведению расчетов контуров равного уровня звука заданного индекса шума и требований к качеству самих анализируемых результатов расчета, не решен вопрос ответственности проектировщиков за предоставление недостоверных границ шумового воздействия аэродромов. Также за недостоверность границ контуров АШ отчасти несут ответственность и операторы аэродромов, являющиеся заказчиками работ, представляющие исходные данные для расчетов и не проявляющие должной осмотрительности при выборе подрядчика, а также анализе полученных результатов. ИКАО трактует эту ситуацию так: «..Приступая к оценке, полномочный орган должен располагать средствами измерения, прогнозирования и сравнения уровней нынешнего и будущего воздействия шума... (с учетом) ...средств, процедуры оценки шума и дополнительной информации: контуры шума, индекс шума, информации на основе движения по глассаде, ...» [2].

Это обстоятельство накладывает дополнительную ответственность на операторов аэродромов, так как 47 статья Воздушного кодекса РФ в редакции Федерального закона № 135-ФЗ от 01.07.2017 предполагает единоразовое установление ограничений в границах подзон ПАТ с учетом перспективного развития аэродрома, в том числе для исключения рисков застройщиков, связанных с возможным установлением дополнительных требований или ограничений после получения разрешения на строительство [11].

Ситуация усугубляется тем, что отечественное законодательство не предусматривает юридических обязательств решения проблем шума, и АШ в частности, а также ответственности за недостоверную оценку, неисполнение мероприятий по его предупреждению и/или снижению для обеспечения благоприятных условий проживания. К сожалению, в нашей стране чаще всего задействован односторонний механизм – даже зная о наличии воздействия АШ, сначала происходит застройка территории в границах ПАТ, а затем обращается внимание на высокие уровни АШ с поиском виновных в его возникновении. Бывает и наоборот, например, выделение и согласование землеотвода под размещение ВПП-3 аэродрома Шереметьево или реконструкция ВПП аэродрома Геленджик, значительно ухудшило условия проживания населения.

Операторы аэродромов, вблизи которых проводится активное жилищное строительство, сегодня должны быть заинтересованы в отображении планов землепользования и застройки утвержденных границ шумовых зон ПАТ, рассчитывая, что сдерживание или прекращение жилой застройки обезопасит их будущую эксплуатационную деятельность, однако есть один из основных сдерживающих факторов, с одной стороны, не позволяющий аэродрому согласовать

шумовую зону ПАТ, а с другой стороны, установленная шумовая зона ПАТ в недостоверных размерах приведет либо к компенсации ущерба в случае установления необоснованных ограничений на использование территории, либо к сокращению интенсивности полетов в целях соблюдения установленных границ шумовых зон – этим фактором является отсутствие методического обеспечения обоснования и подтверждения границ шумовой зоны ПАТ.

Краткий анализ выполненных проектов шумовых зон, представленных в качестве границ седьмых подзон в составе установленных приаэродромных территорий

В подтверждение вышесказанному рассмотрим выполненные проекты шумовых зон. Решения об установлении границ ПАТ аэродромов гражданской авиации, вынесенные руководителем Федерального агентства воздушного транспорта в соответствии с п. 2 Правил установления приаэродромной территории, утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 2 декабря 2017 г. N 1460, представлены на официальном сайте ведомства (<https://favt.gov.ru/dejatelnost-ajeroporty-i-ajerodromy-priaer-terr-aerodromov-ga/>). На официальном сайте Росавиации (июнь 2021 г.) размещено 157 решений об установлении ПАТ.

Для проведения сравнительной оценки шумовых зон ПАТ различных аэродромов был задан критерий, по которому можно косвенно характеризовать шумовую зону ПАТ. Этим критерием является площадь шумовой зоны седьмой подзоны ПАТ. В анализе участвовали 130 аэродромов, сведения о площади шумовой зоны седьмой подзоны ПАТ которых были указаны в решении об установлении ПАТ или когда площадь шумовой зоны возможно было определить на основе координатного описания внешнего контура шумовой зоны, предоставленного в тексте проектов решений. Полученные величины могут иметь случайную погрешность в 5–10 %, которая связана с округлением значений координат. Проведенный анализ площадей шумовых зон ПАТ показал диапазон значений в пределах от 1,5 км² до 4300 км².

Вторым критерием, участвующим в анализе, был выбран параметр «количество полетов», определяемый по сумме операций взлетов и посадок (далее ВПО), обслуженных ВС в конкретном аэропорту. Для проведения оценки влияния интенсивности полетов на величину площадей шумовых зон седьмой подзоны использовались открытые статистические данные ФАВТ Росавиации за 2019 г. (<https://favt.gov.ru/dejatelnost-ajeroporty-i-ajerodromy-osnovnie-proizvodstvennie-pokazateli-aeroportov-obyom-perevoz/>).

Для аэродромов, принятых к исследованию, характерны следующие минимальные показатели: Аян (Мунук) – 303 ВПО, Бухта Провидения – 346 ВПО, Йошкар-Ола – 750 ВПО. Максимальные показатели отмечаются в таких аэродромах, как Краснодар (Пашковский) – 37 770 ВПО, Москва (Внуково) – 195 230 ВПО, Москва (Шереметьево) – 386 370 ВПО.

Несмотря на то, что аэродром может иметь разветвленную систему маршрутов полетов воздушных судов, которая может повлиять на увеличение площади шумовой зоны по сравнению с аэродромом, взлеты и посадки на котором могут осуществляться по ограниченному числу маршрутов, однако данное обстоятельство не может существенно влиять на результаты сравнения по площади шумовой зоны, ограниченной контуром равного уровня звука.

Таким образом следует ожидать, что увеличение площади шумовой зоны ПАТ будет пропорционально увеличению интенсивности полетов. Однако, анализируя результаты, можно сделать вывод о том, что увеличение указанных параметров не способствует увеличению площади шумовой зоны ПАТ большинства рассмотренных аэродромов.

Сказанное проиллюстрировано в графической форме на примере аэродромов с количеством ВПО от 10 000 до 20 000 в год (рис. 1) и для аэродромов с количеством ВПО от 20 000 до 40 000 в год (рис. 2). Анализ корреляции площади шумовых зон и количества ВПО по этим и другим аэродромам показал отсутствие какой-либо взаимосвязи. Это позволяет утверждать, что представленные проекты границ шумовых зон ПАТ, значительно отличающихся по своей конфигурации от иных зон, не отражают истинную картину зашумления ПАТ, что не

позволяет говорить о полноценном исполнении требований Федерального закона №135-ФЗ по обосновании размеров седьмой подзоны [5].

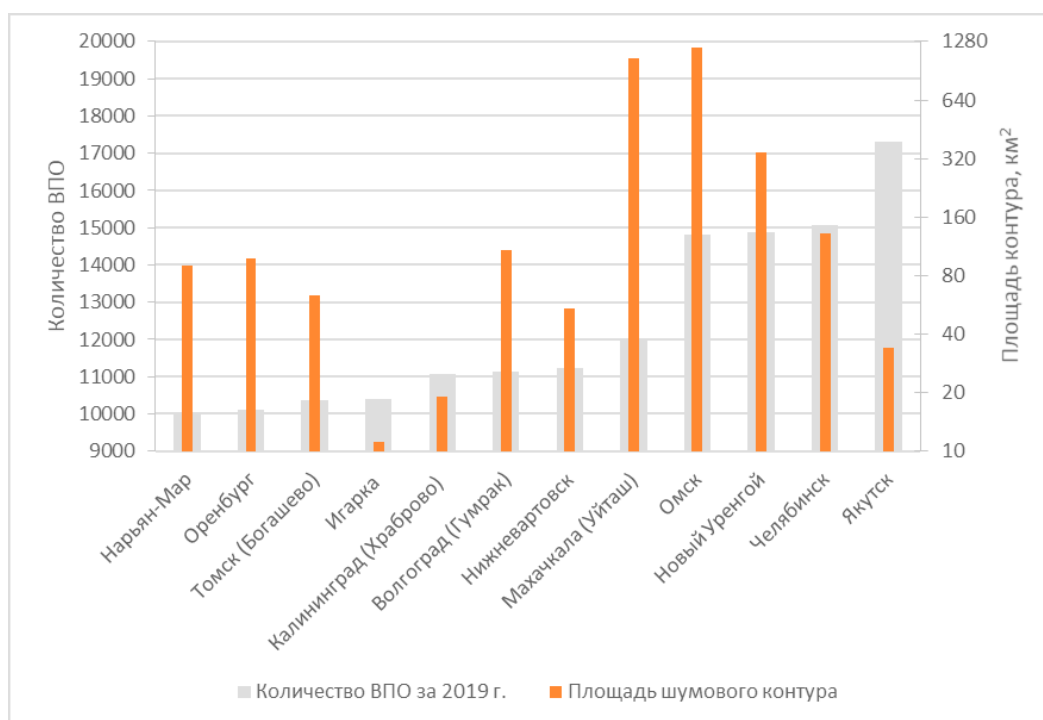


Рис. 1. Диаграмма зависимости площади шумовых зон ПАТ от интенсивности полетов для аэродромов с количеством ВПО от 10 000 до 20 000 в год

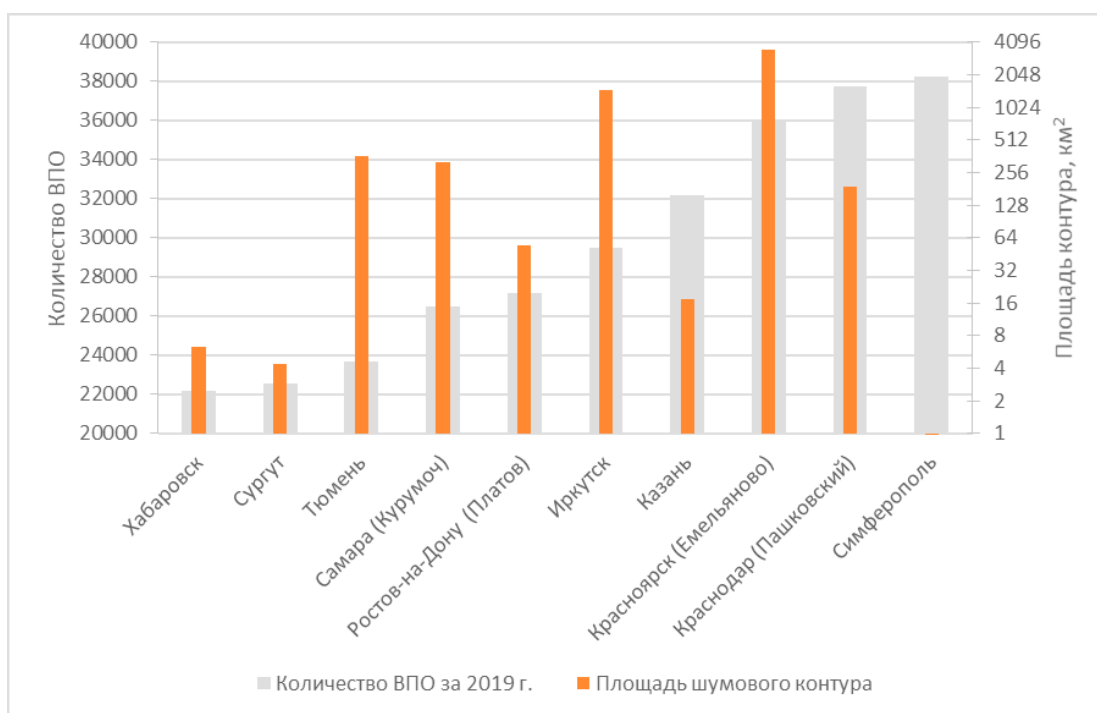


Рис. 2. Диаграмма зависимости площади шумовых зон ПАТ от интенсивности полетов для аэродромов с количеством ВПО от 20 000 до 40 000 в год

Анализируя графическое отображение шумовых зон, представленных в качестве границ седьмых подзон в составе проектов решений об установлении ПАТ, можно отметить, что в ряде случаев становится очевидным следующее: изображенные на картах местности контуры границ шумовых зон не могут таковыми являться, в том числе в силу несоответствия природы распространения авиационного шума.

Паттерны границ шумовых контуров аэродромов Барнаул (Михайловка), Бегишево (Нижекамск), Бодайбо, Казань, Ноябрьск, Тында не имеют известной эллипсовидной формы контура АШ вдоль установленных схем маршрутов взлетов и посадки ВС, как это предполагает распространение шума от движущегося авиационного источника звука. Наоборот, конфигурация границ контуров вышеперечисленных аэродромов имеет форму, не присущую АШ, в первую очередь по причине отсутствия маршрутов в представленной расчетной зоне, отраженной в проекте решений, а во-вторых, над территорией, где проходят маршруты движения ВС и осуществляются полеты на высоте 400 м и выше, отсутствует шумовая зона, определяющая границы седьмой подзоны, что вызывает обоснованное недоверие к материалам, проектировщикам и экспертизе.

Расчетные границы седьмых подзон аэродромов Зея, Итуруп, Северо-Эвенск, Сеймчан, Ульяновск (Баратеевка) фактически не учитывают распространение АШ при полетах ВС и ограничиваются лишь расчетными контурами, повторяющими СЗЗ аэродромов. Конфигурация такой «шумовой зоны при полетах» не предполагает представление сведений по оценке АШ, как значимую компоненту для определения границ шумового загрязнения. Поэтому представленные расчетные границы не могут отождествляться с шумовой зоной седьмой подзоны ПАТ этих аэродромов.

Возникает правомерный вопрос, для чего и для кого выполняются такие работы, когда пострадавшим оказывается население прилегающей к аэродрому территории и операторы аэродромов, оплатившие работы по установлению недостоверных шумовых зон с размерами, противоречащими здравому смыслу, с перспективой оплаты новых работ по их корректировке.

В случае установления границ шумовых зон недостоверных размеров (в первую очередь заниженных) местные органы власти будут проводить размещение объектов в зонах с фактическим превышением уровней АШ, что рано или поздно через жалобы населения или ужесточения требований Роспотребнадзора скажется на снижении интенсивности полетов конкретного аэродрома. Эта ситуация описана ИКАО «...Изменение шумовой обстановки зависит от планирования и организации землепользования вокруг аэропорта, инфраструктуры аэропорта, а также состава и эксплуатации парка воздушных судов. Дальнейшее увеличение объема и развитие воздушного движения может быть ограничено нерациональным использованием земельных участков вокруг аэропортов.» [2].

Выводы

Приведенные по тексту аналитические исследования говорят о неготовности законодательства Российской Федерации и нормативно-технического обеспечения для его исполнения относительно рекомендаций ИКАО по рассматриваемой проблеме применения мер сбалансированного подхода ИКАО к управлению АШ при обосновании и контроле размеров шумовой зоны ПАТ, за исключением общего понимания ее неразрешимости в ближайшее время.

Предусмотренное Федеральным законом №135-ФЗ [5] в редакции Федерального закона №191-ФЗ [6] исполнение требования, что «...седьмая подзона приаэродромной территории таких аэродромов подлежит установлению до 1 января 2025 года ...», видится маловероятным в связи с отсутствием государственной программы по изучению природы распространения и расчета АШ, эксплуатируемых на территории РФ воздушных судов, установлению конкретных требований к объему исследований при обосновании границ шумовой зоны ПАТ, определению ответственности за установление необоснованных ограничений эксплуатации земельных

участков и, соответственно, разработки необходимых для этого технических регламентов. Отсутствие технических регламентов предопределяет риски для операторов аэродрома установить шумовую зону ПАТ в размерах, не соответствующих действительности, гражданам проживать в зонах с повышенными уровнями АШ и безуспешно настаивать на сокращении интенсивности полетов самолетов с аэродромов.

Вместе с тем определенные надежды связываются с разрабатываемой в настоящее время «Методикой установления седьмой подзоны приаэродромной территории, расчета и оценки рисков для здоровья человека» (далее – Методика), утверждаемой Федеральной службой Роспотребнадзора. Для решения описанных выше проблем Методика должна предоставить механизм обоснования границ шумовой зоны ПАТ в достоверных размерах и достаточной точностью установленных значений уровней АШ в каждой точке на прилегающей к аэродрому территории по достижению расширенной неопределенности измерений при разовых пролетах ВС до величины менее $U < 1,5$ дБА и предпочтительнее до $U < 1$ дБА (Коэффициент охвата $k = 1,65$ и уровень доверия $N = 95 \%$). Неоспоримыми можно считать результаты измерений, если указанные требования по достижению неопределенности измерений достигнуты во всех точках исследований для каждого типа ВС, на долю которых приходится не менее 80 % всех ВПО на исследуемом аэродроме. Безусловно, проведение такой детальной оценки осуществить без применения системы мониторинга авиационного шума невозможно.

После введения в действие указанной методики, необходимо провести ревизию вызывающих явное сомнение выполненных 157 проектов обоснования границ шумовой зоны седьмых подзон и до 2025 г., крайнего срока, определенного для завершения работ по установлению седьмой подзоны ПАТ [6], выполнить корректировку границ седьмой подзоны ПАТ с последующим ее установлением для обоснования объективных ограничений на размещение объектов недвижимости в границах шумовых зон ПАТ в целях недопущения ограничения эксплуатации аэродромов.

Важнейшим аспектом деятельности оператора аэродрома является взаимодействие с муниципальными органами власти, проектными организациями и правительствами субъектов в части снятия взаимных претензий для нахождения путей взаимодействия и следует прислушаться к рекомендациям ИКАО «... Полномочному органу следует постоянно анализировать и пересматривать политику и практику планирования и организации землепользования в целях свести к минимуму дальнейшую несовместимую урбанизацию ранее подвергавшегося воздействию шума района в окрестностях аэропорта. Полномочному органу аэропорта при реализации плана действий в соответствии со сбалансированным подходом следует тесно взаимодействовать с полномочными органами, ответственными за организацию землепользования, с целью пересмотра ими планов и норм землепользования...» [4].

Кроме того, на основании опыта зарубежных стран предлагается рассмотреть возможность принятия «Закона об авиационном шуме», учитывающего все аспекты проблемы и установление порядка установления шумовой зоны ПАТ, регулирования застройки в ее пределах, т.к. в настоящий момент ответственным за разработку и установление шумовой зоны ПАТ является только оператор аэродрома, в компетенцию которого не может входить обоснование требований по ограничению застройки и, тем более, последующий контроль за исполнением ограничений, установленных в границах седьмой подзоны ПАТ, что предусмотрено Федеральным законом от 01.07.2017 г. № 135-ФЗ [5].

ЛИТЕРАТУРА

1. Doc 10075. Действующие резолюции ассамблеи. ИКАО, 2016. [Электронный ресурс]. URL: https://www.icao.int/Meetings/a39/Documents/Resolutions/10075_ru.pdf, (дата обращения 26.08.2021 г.).

2. ICAO Doc 9829. Инструктивный материал по сбалансированному подходу к управлению авиационным шумом. 2008 [Электронный ресурс]. URL: http://www.aviadocs.net/icaodocs/docs/9829_cons_ru.pdf (дата обращения: 26.08.2021).

3. Doc 9184-AN/902/2. Руководство по проектированию аэропортов. Часть 2. Использование земельных участков и контроль над окружающей средой. Изд. 3. ИКАО, 2009 г. [Электронный ресурс]. URL: https://standartgost.ru/g/Doc_9184-AN/902 (дата обращения: 26.08.2021).

4. Doc 8168. PANS-OPS. Производство полетов воздушных судов. Том I. Правила производства полетов. ИКАО, 2006 [Электронный ресурс]. URL: <http://forum.larus.aero/download/file.php?id=95> (дата обращения: 26.08.2021 г.).

5. О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части совершенствования порядка установления и использования приаэродромной территории и санитарно-защитной зоны: Федеральный закон от 01.07.2017 № 135-ФЗ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/42049/>, (дата обращения 24.08.2021).

6. О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон от 11.06.2021 № 191-ФЗ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/46837>, (дата обращения 26.08.2021).

7. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. [Электронный ресурс]. URL: <https://base.garant.ru/400274954/>, (дата обращения 25.08.2020).

8. Aviation Environmental Design Tool 2a - Uncertainty Quantification Report – Количественная оценка результатов расчетов AEDT 2a., FAA, 2014 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://aedt.faa.gov/Documents/AEDT%202a%20Uncertainty%20Quantification%20Report.pdf>, (дата обращения 26.08.2021).

9. МР 2.1.10.0059-12. Оценка риска здоровью населения от воздействия транспортного шума. Методические рекомендации. 2012. [Электронный ресурс]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095849> (дата обращения: 26.08.2021 г.).

10. Картышев О.А., Дмовский И.Г., Аверкиев А.А., Кошурников Д.Н. Особенности оценки неблагоприятного воздействия на окружающую среду при эксплуатации аэропортов местных воздушных линий // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2021. № 34. С. 59–67.

11. Воздушный кодекс Российской Федерации: Федеральный закон № 60-ФЗ от 19.03.1997. [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_13744/ (дата обращения 26.08.2021).

REFERENCES

1. Doc 10075. Existing assembly resolutions. ICAO, 2016. [Electronic resource]. Available at: https://www.icao.int/Meetings/a39/Documents/Resolutions/10075_ru.pdf, (Accessed 26.08.2021).

2. ICAO Doc 9829. Guidance material on a balanced approach to aviation noise management. 2008. [Electronic resource]. Available at http://www.aviadocs.net/icaodocs/docs/9829_cons_ru.pdf. (Accessed 26.08.2021).

3. Doc 9184-AN/902/2. Airport Design Guide. Part 2. Land use and environmental control. Ed.3, ICAO, 2009. [Electronic resource]. Available at: https://standartgost.ru/g/Doc_9184-AN/902 (Accessed 26.08.2021).

4. Doc 8168. PANS-OPS. Production of aircraft flights. Volume 1. Rules of flight production. ICAO, 2006 [Electronic resource]. Available at: <http://forum.larus.aero/download/file.php?id=95>. (Accessed 26.08.2021).

5. On amending certain legislative acts of Russian Federation in terms of improving the procedure for establishing and using the aerodrome territory and sanitary protection zone. Federal Law of 01.07. 2017 No. 135-FZ [Electronic resource]. Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/42049/>, (Accessed 24.08.2021).

6. On amending certain legislative acts of Russian Federation. Federal Law of 11.06. 2021 No. 191-FZ. [Electronic resource]. Available at: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/46837>, (Accessed 26.08.2021).

7. SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and |or harmlessness to humans of habitat factors. [Electronic resource]. Available at: <https://base.garant.ru/400274954/>. (Accessed 25.08.2020).

8. Aviation Environmental Design Tool 2a - Uncertainty Quantification Report –Quantitative evaluation of calculation results AEDT 2a., FAA. [Electronic resource]. Available at: <https://aedt.faa.gov/Documents/AEDT%202a%20Uncertainty%20Quantification%20Report.pdf>, (Accessed 26.08.2021).

9. MR 2.1.10.0059-12. Assessment of public health risk from impact of transport noise. Methodological recommendations. 2012. [Electronic resource]. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/ /1200095849>. (Accessed 26.08.2021).

10. Kartyshev O.A., Dmovskiy I.G., Averkiev A.A., Koshurnikov D.N. Features of estimation of adverse impact on the environment during the operation of airports of local air lines. *Nauchnyj vestnik GosNII GA = Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2021, no. 34, pp. 59–67. (In Russian).

11. Air Code of the Russian Federation. Federal Law of 19.03. 1997 No. 60-FZ. [Electronic resource]. Available at: http://www.consultant.ru/document/ cons_doc_LAW_13744/, (Accessed 26.08.2021).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Картышев Михаил Олегович, Генеральный директор, ООО «Центр экологической безопасности гражданской авиации», ул. Красноказарменная, дом 14А, к. 2, Москва, Российская Федерация, 111250; e-mail: mkartyshev@yandex.ru

ABOUT THE AUTHOR

Kartyshev Mikhail O., General Director, Civil Aviation Environmental Safety Center, Krasnokazarmennya Street, 14A, building 2, 111250 Moscow, Russian Federation; e-mail: mkartyshev@yandex.ru.

УДК 351.814.2

АНАЛИЗ ДАННЫХ ОБ АВИАЦИОННЫХ ПРОИСШЕСТВИЯХ

Ю.В. ПОПОВ¹, Е.С. ДИОГЕНОВ²

¹*Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации,
г. Москва, Российская Федерация*

²*ПАО «Аэрофлот», г. Москва, Российская Федерация*

Аннотация. В статье проведен анализ статистических данных по авиационным происшествиям. Проблема обеспечения безопасности полетов была и остается главной проблемой авиации. Авиационная транспортная система постоянно находится в состоянии риска. Уровень безопасности полетов оценивается показателем количества катастроф на 100 тыс. часов налета. Приведен временной ряд количества катастроф на 100 тыс. часов налета за период 1958 – 2020 гг. для СССР и стран СНГ. Проведенный анализ показывает, что с авиацией в странах СНГ имеются проблемы, которые необходимо решать. С этой целью в статье отработаны мероприятия для решения проблемы безопасности полетов. Рассмотрены три категории повышенного риска: заход на посадку, столкновение исправного ВС с землей, потеря управления в полете. Эти категории были определены на основе обработки статистических данных. В статье приведены статистические данные по трем этим категориям, показана их доля от общего числа авиационных происшествий. Анализ статистических данных показал, что заход на посадку является очень опасным этапом полета. Большое количество авиационных происшествий на этапе захода на посадку обусловлено малыми скоростями полета воздушного судна и его быстротечностью.

Ключевые слова: безопасность полетов, воздушное судно, авиационное происшествие, экипаж, этап полета, временной ряд, спектральный анализ, периодограмма, заход на посадку

ANALYSIS OF DATA ON AVIATION INCIDENTS

Yu.V. POPOV¹, E.S. DIOGENOV²

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

²*Aeroflot Public Joint Stock Company, Moscow, Russian Federation*

Abstract. In article the analysis of statistical data on aviation incidents is carried out. The problem of safety of flights was and remains the main problem of aircraft. The aviation transport system constantly is in a condition of risk. Level of safety of flights is estimated by an indicator of number of accidents on 100 thousand hours of a raid. A time number of number of accidents on 100 thousand hours of a raid during 1958 - 2020 for the USSR and the CIS countries is given. The carried-out analysis shows that with aircraft in the CIS countries there are problems which need to be solved. For this purpose in article actions for a solution of the problem of safety of flights are fulfilled. Three categories of the increased risk are considered: landing approach, collision of serviceable aircraft with the earth, loss of management in flight. These categories were defined on the basis of processing of statistical data. Statistical data on three of these categories are provided in article, their share from total number of aviation incidents is shown. The analysis of statistical data showed that landing approach is very dangerous stage of flight. A large number of aviation incidents at a stage of landing approach is caused by small speeds of flight of the aircraft and its transience.

Keywords: safety of flights, aircraft, aviation incident, crew, flight stage, time row, spectral analysis, periodogram, landing approach

Введение

Одной из важнейших народно-хозяйственных задач и главной проблемой гражданской авиации (ГА) является безопасность полетов (БП). БП – комплексная характеристика авиационно-транспортной системы (АТС). Обеспечение БП гражданских воздушных судов (ВС) – это сложная проблема, решение которой достигается разработкой и совершенствованием стандартов и авиационных правил. БП зависит от применения достижений авиационной эргономики, обеспечения усталостной прочности и реализации принципа безопасной повреждаемости конструкций, применения активных систем управления, повышения надежности и улучшения контролепригодности систем ВС и др.

Выполнение полетов организуется АТС. АТС является сложной нелинейной открытой диссипативной системой, находящейся в состоянии риска [1]. БП определяется надежностью функционирования всех элементов, входящих в АТС. Элемент системы «экипаж – воздушное судно» (ЭВС) является основным, так как обеспечивает основную задачу по использованию ВС по назначению.

Показатели безопасности полетов

Уровень безопасности полетов (БП) оценивается определенными показателями (индикаторами), которые могут быть абсолютными или относительными [2]. Показатели характеризуют изменение состояния БП.

Абсолютные показатели являются первичной информацией о безопасности полетов. Они бывают индивидуальными и суммарными и являются количественной базой всех форм учета. Относительные показатели являются более универсальными, в которых число неблагоприятных событий с ВС соотносится с определенным объемом выполненных ВС полезной работы (налетом, числом перевезенных пассажиров, грузов и т.п.). Значения ежегодных относительных показателей помогают обнаружить тенденции состояния БП.

На рис. 1 представлены изменения относительного показателя – количества авиационных происшествий (АП) на 100 тыс. часов налета (КАП) по парку ВС за период 1958-2020 гг. для СССР и стран СНГ.

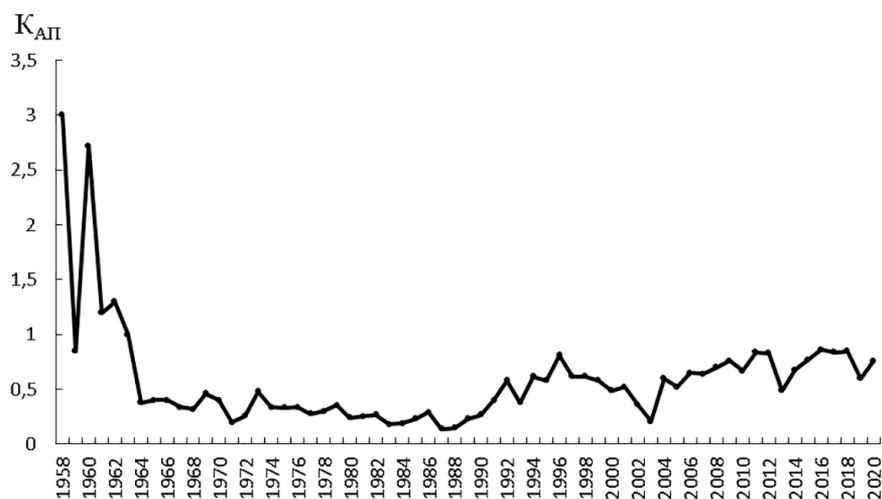


Рис. 1. Количество авиационных происшествий на 100 тыс. часов налета

Показатели БП, используемые членами Международной организации гражданской авиации (ИКАО; International Civil Aviation Organization, ICAO), свидетельствуют об общей

тенденции изменения уровня безопасности, но не отражают специфических условий эксплуатации и особенностей конструкции различных типов ВС [3, 4]. Анализ уровня безопасности по типам ВС показывает, что наработка на одну катастрофу лежит в пределах от 150 000 до 1 000 000 часов налета.

В работе [5] с помощью математического спектрального анализа была изучена динамика изменения количества АП на 100 тыс. часов налета (рис. 1). Спектральный анализ временного ряда количества АП на 100 тыс. часов показал, что в странах СНГ возникли проблемы с БП и авиация развивается хаотично. Поэтому для повышения уровня БП требуется проводить мероприятия, предотвращающие АП [6]. Для выработки мероприятий, направленных на предотвращение АП, необходимо определить краткосрочные и долгосрочные проблемы и вопросы по безопасности. С этой целью необходимо:

- провести анализ текущих проблем и тенденций по расследованию АП;
- изучить базу данных по катастрофам и инцидентам;
- определить этапы полета, которые подвергнуты наибольшим фактическим или потенциальным потерям;
- исследовать программы по безопасности, которые не помогли выполнить намеченные цели;
- установить вопросы и проблемы, которые неправильно рассматривались любым другим органом по БП.

В статье [7] рассмотрены системы расследования АП в гражданской, государственной и экспериментальной авиации и в результате анализа определены текущие проблемы и рассмотрены тенденции развития. В документе ИКАО «Глобальный план обеспечения безопасности полетов» отражено, что основным направлением деятельности по повышению уровня безопасности полетов является совершенствование расследования АП [7].

Категории авиационного происшествия повышенного риска

ИКАО определила три категории АП повышенного риска: заход на посадку, столкновение исправного ВС с землей, потеря управления в полете. Эти категории были определены на основе анализа статистических данных об АП по регулярным коммерческим авиаперевозкам за период с 2017 по 2019 год, информации, полученной от региональных групп по обеспечению БП со всего мира. Остальные случаи АП относятся к категории «прочие».

Первая категория АП, связанных с безопасностью захода на посадку, была признана в качестве одной из основных категорий АП повышенного риска. События, связанные с безопасностью захода на посадку, включают следующие установленные ИКАО категории АП:

- ненормальный контакт с поверхностью ВПП;
- столкновение с птицами;
- столкновение на земле;
- выезд за пределы ВПП;
- несанкционированный выезд на ВПП;
- потерю управления на земле;
- столкновение с препятствиями;
- недолет (перелет) при посадке.

Вторая категория АП – столкновение исправного ВС с землей (СИВС – CFIT).

К третьей категории АП относится потеря управления в полете (ПУП – LOC – I).

СИВС и ПУП составляют небольшую долю АП, однако, как правило, заканчиваются смертельным исходом, и на них приходится значительная доля общего числа погибших.

На рис. 2 приведены статистические данные по количеству АП по категориям в мире.

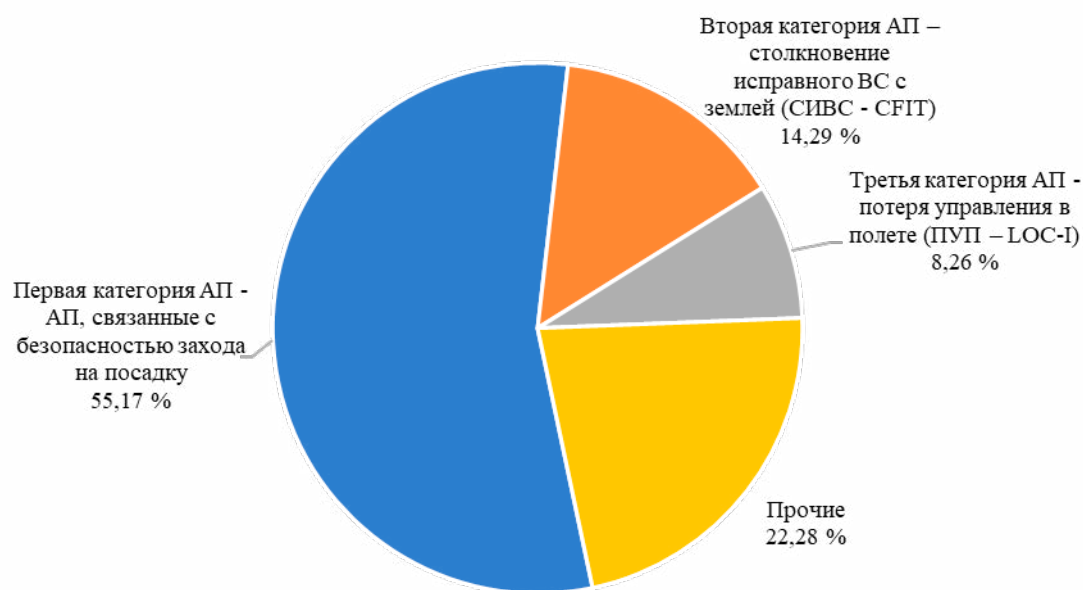


Рис. 2. Количество АП по категориям в мире (%)

На рис. 3. приведены статистические данные по количеству АП со смертельным исходом для всего мира.

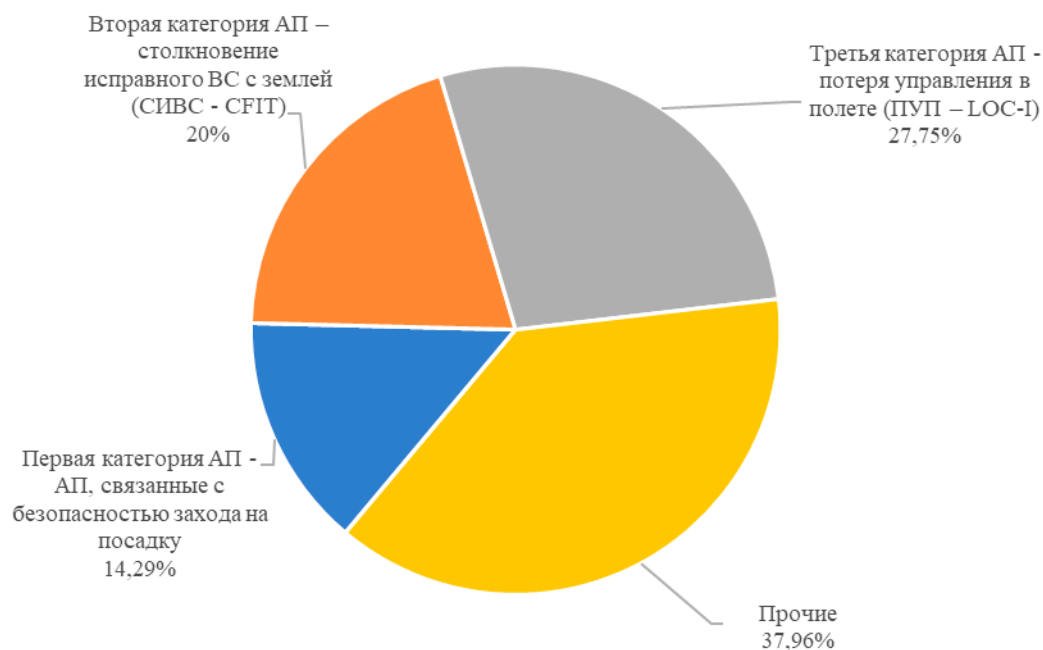


Рис. 3. Количество АП по категориям со смертельным исходом для всего мира (%)

На рис. 4 приведены статистические данные по количеству погибших в мире в ГА.

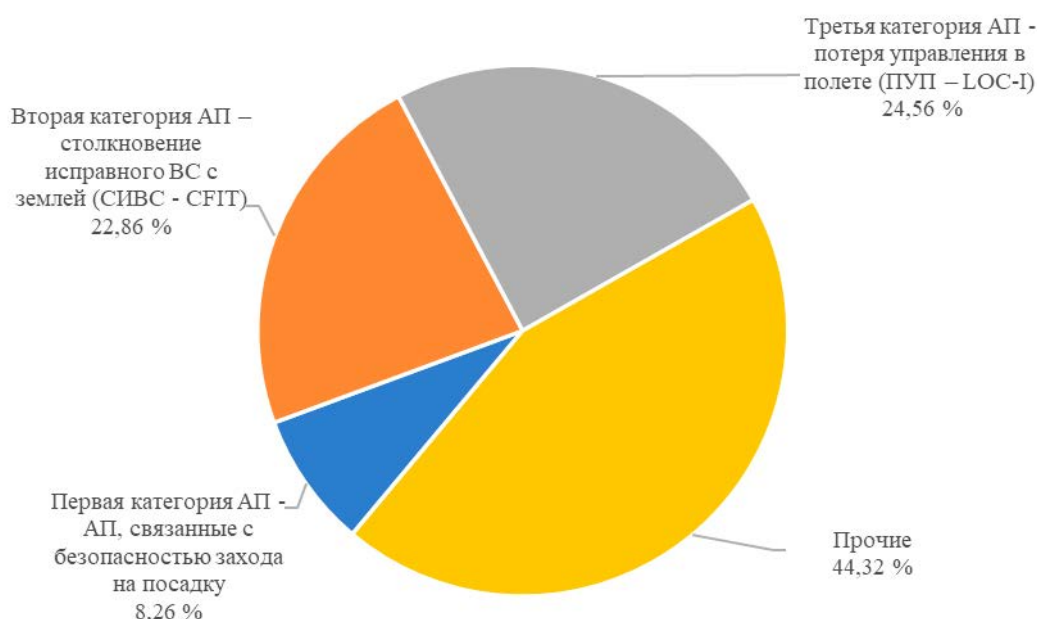


Рис. 4. Процент количества погибших в ГА в мире

На рис. 2, 3, 4 представлены результаты статистического анализа по трем категориям АП повышенного риска. По каждой из трех категорий данные показывают, какую процентную долю от общего числа АП составляет каждая категория.

Анализ статистических данных показывает, что риск АП по трем категориям остается, несмотря на достигнутый прогресс в повышении уровня БП. По каждой из трех категорий данные показывают, какую процентную долю от общего числа АП составляет каждая категория. Они также показывают, какую долю составляет каждая категория в общем числе АП со смертельным исходом и погибших во всем мире. Анализ свидетельствует о следующем:

- на эти три категории повышенного риска приходится 77,72 % всех погибших во всем мире;

- более половины АП во всем мире относят к событиям, связанным с заходом на посадку. Высокий процент АП (55,17 %) говорит о том, что заход на посадку является очень опасным этапом полета;

- на АП столкновение исправного ВС с землей и потеря управления в полете приходится 22,25 % всех происшествий, а 47,42 % – на всех погибших во всем мире.

Для определения наиболее опасных этапов полета в странах СНГ проведем статистический анализ АП по материалам расследования за 23-летний период (1997–2020 гг.). Этап полета – это характерный участок, который отличается или определенным состоянием ВС, или выполняемым режимом, или решаемой на участке промежуточной задачей. Основными этапами полета являются: взлет, начальный этап набора высоты, набор высоты, полет по маршруту, снижение, навальный заход на посадку, конечный этап захода на посадку, посадка.

Схема полета – последовательность операций, обеспечивающих выполнение задачи полета, т.е. укрупненный план полета. Часто выделяют участки траектории полета, как последовательность динамических операций, формирующих необходимый план полета.

Анализ статистических данных о АП за 23-летний период свидетельствует об определенных закономерностях в их проявлении. Около 80 % всех АП имело место на этапах взлета и захода на посадку (рис. 5).

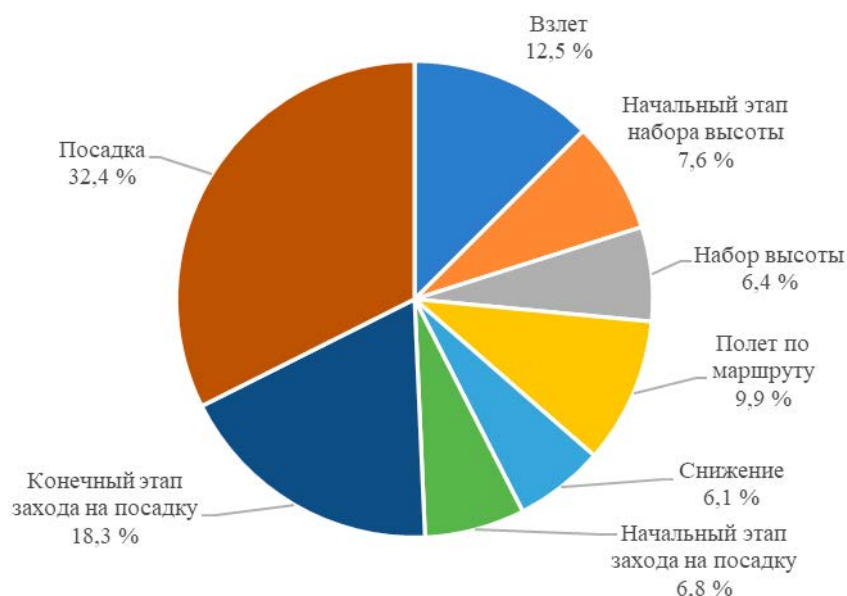


Рис. 5. АП по этапам полета в СНГ ГА (%)

Каждый этап полета характеризуется временем, которое необходимо затратить на его выполнение. С целью выявления влияния этапов полета на АП в работе [9] для 90-минутного полета, совершенного ночью, была определена продолжительность времени на выполнение этапов. На рис. 6 приведены данные по времени (в процентах), которое необходимо затратить на выполнение этапов полета.

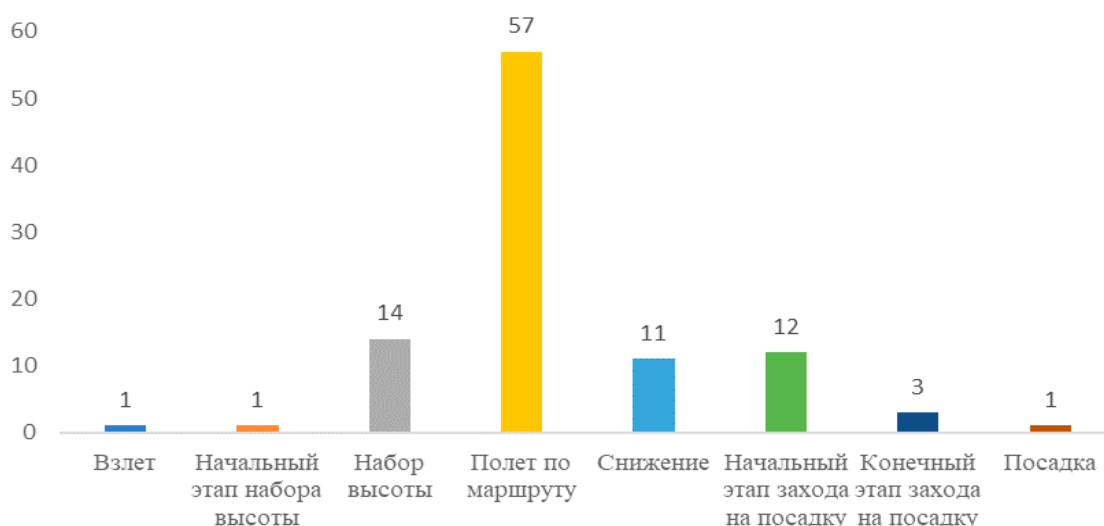


Рис. 6. Продолжительность выполнения этапов полета (%)

Статистические данные показывают, что АП, связанные с заходом на посадку, являются основной категорией происшествий [10]. Большое количество АП на этапе захода на посадку обусловлено малыми скоростями полета ВС и его быстротечностью. Действия экипажа на каждом этапе полета изложены в РЛЭ данного типа ВС (по каждому члену экипажа).

Эти данные по этапам полета учитывают все АП, которые произошли из-за отказов авиационной техники (АТ), недостатков технического обслуживания, управления полетами и ошибок экипажа. Однако статистические данные по АП в гражданской авиации подтверждают тот факт, что большая часть из них прямым или косвенным образом связана с «человеческим фактором».

Выводы

1. Авиационно-транспортная система является сложной нелинейной открытой диссипативной системой, безопасность полетов которой определяется надежностью функционирования всех элементов, входящих в АТС.

2. Безопасность полетов оценивается с помощью абсолютных и относительных показателей. Относительные показатели являются более универсальными, т.к. в них число неблагоприятных событий с ВС соотносится с определенным объемом выполненных ВС полезной работы.

4. АП делятся на три категории повышенного риска – это заход на посадку, столкновение исправного ВС с землей, потеря управления в полете. Эти категории были определены на основе анализа статистических данных об АП.

5. Статистические данные показывают, что АП, связанные с заходом на посадку, являются основной категорией происшествий. Большое количество АП на этапе захода на посадку обусловлено малыми скоростями полета ВС и его быстротечностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Попов Ю.В. Расследование авиационных происшествий – безопасность полетов в исторической ретроспективе // Проблемы безопасности полетов. 2012. № 1. С. 4–22.
2. Попов Ю.В. Показатели безопасности авиационных полетов // Интернет-журнал Технологии техносферной безопасности. 2014. Вып. 6 (58). URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-6/10-06-14.ttb.pdf>.
3. Новожилов Г.В., Неймарк М.С., Цесарский Л.Г. Безопасность полета самолета. Концепция и технология. М.: Машиностроение, 2003. 144 с.
4. Королькова М.А. Мировая система воздушного транспорта. СПб.: Политехника, 2019. 407с.
5. Попов Ю.В., Авдеев Н.Н. Анализ временного ряда количества катастроф для авиационной транспортной системы // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2020. № 31. С. 130–139.
6. Бугаев Б.П. Предотвращение авиационных происшествий. М.: Транспорт, 1982. 56 с.
7. Попов Ю.В. Система расследования авиационных происшествий // Проблемы безопасности полетов. 2020. № 7. С. 3–17.
8. Doc 10004. Глобальный план обеспечения безопасности полетов. Международная организация гражданской авиации. Издание второе, 2016. 122 с.
9. Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents Worldwide Operations 1959 – 2014. Aviation Safety. Boeing Commercial Airplanes. August 2015. URL: www.boeing.com/news/techissues/pdf/statsum.pdf.
10. Пилоту о предотвращении грубых посадок/ В. М. Буряков, Г. С. Егоров, В. А. Еремин и др. М.: Транспорт, 1990. 47 с.

REFERENCES

1. Popov Yu.V. Investigation of aviation incidents – safety of flights in a historical retrospective. *Problemy bezopasnosti poletov = Flight safety problems*, 2012, no. 1, pp. 4–22. (In Russian).
2. Popov Yu.V. Indicators of safety of aviation flights. Internet magazine of Technology of a technosphere safety. 2014, issue 6 (58). Available at: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-6/10-06-14.ttb.pdf>. (In Russian).

3. Novozhilov G.V., Neymark M.S., Tsesarsky L.G. *Bezopasnost' poleta samoleta, Kontseptsiya I tekhnologiya* [Aircraft flight safety. Concept and technology]. Moscow. Mashinostroenie Publ., 2003, 144 p. (In Russian).
4. Korolkova M.A. *Mirovaya sistema vozdushnogo transporta* [World system of air transport]. SPb. Politehnika Publ., 2019, 407 p. (In Russian).
5. Popov Yu.V., Avdeev N.N. The analysis of a temporary number of number of accidents for aviation transport system. *Nauchnyj Vestnik GosNII GA = Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation*, 2020, no. 31, pp. 130–139. (In Russian).
6. Bugaev B.P. *Predotvrashchenie aviatsionnykh proisshествij* [Prevention of aviation incidents]. Moscow. Transport Publ., 1982, 56 p. (In Russian).
7. Popov Yu.V., System of investigation of aviation incidents. *Problemy bezopasnosti poletov = Flight safety problems*, 2020, no. 7, pp. 3–17. (In Russian).
8. Doc 10004. Global plan of safety of flights. International Civil Aviation Organization. Second edition, 2016, 122 p. (In Russian).
9. Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents Worldwide Operations 1959 – 2014. Aviation Safety. Boeing Commercial Airplanes. August 2015. Available at: www.boeing.com/news/techissues/pdf/statsum.pdf.
10. *Pilotu o predotvrashchenii grubyykh posadok* [To the pilot about prevention of rough landings]. V.M. Buryakov, G.S. Egorov, V.A. Eremin, etc. Moscow, Transport Pub., 1990, 47 p. (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Попов Юрий Васильевич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, ФГУП Государственный научно-исследовательский институт гражданской авиации, Михалковская, 67, корпус 1, Москва, Российская Федерация, 125438; e-mail: tov_popov@rambler.ru.

Диогенов Евгений Сергеевич, командир воздушного судна, ПАО «Аэрофлот», ул. Арбат, д. 1, Москва, Российская Федерация, 119019.

ABOUT THE AUTHORS

Popov Yuriy V., Doctor of Technical Sciences, Leading Researcher, The State Scientific Research Institute of Civil Aviation, Mikhalkovskaya Street, 67, building 1, 125438 Moscow, Russian Federation; e-mail: tov_popov@rambler.ru.

Diogenov Evgenii S., Aircraft Commander, SU Aeroflot Public Joint Stock Company, Arbat Street, 1, 119019 Moscow, Russian Federation.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-61476 от 24 апреля 2015 г.

Подписано в печать 00.10.2021

Печать офсетная
15,8 усл. печ. л.

Формат 60/84/8
Заказ №

8,7 уч.-изд. л.
Тираж 70 экз.

Изготовлено и оформлено: ООО "Мегапринт"

e-mail: irkprint@yandex.ru

Автор верстки: Корнакова Ю.А.