

Том 21, № 03, 2018

ISSN 2079-0619

e-ISSN 2542-0119

# Научный Вестник МГТУ ГА

---

---

## Civil Aviation High TECHNOLOGIES

Vol. 21, No. 03, 2018

Издается с 1998 г.

Москва  
2018

*Научный Вестник МГТУ ГА решением Президиума ВАК Министерства образования и науки РФ включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.*

### Главная редакция

**Главный редактор:** *Елисеев Б.П.*, заслуженный юрист РФ, проф., д.т.н., д.ю.н., ректор МГТУ ГА, Москва, Россия.

**Зам. главного редактора:** *Воробьев В.В.*, проф., д.т.н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия.

**Ответственные секретари главной редакции:** *Наумова Т.В.*, доцент, к.филос.н., доцент кафедры МГТУ ГА, Москва, Россия;  
*Полешкина И.О.*, к.э.н., доцент кафедры МГТУ ГА, Москва, Россия.

### Члены главной редакции:

*Козлов А.И.*, заслуженный деятель науки и техники РФ, проф., д.ф.-м.н., советник ректората МГТУ ГА, Москва, Россия;

*Гаранина О.Д.*, почетный работник науки и техники РФ, проф., д.филос.н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

*Туркин И.К.*, проф., д.т.н., зав. каф. МАИ (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

*Калугин В.Т.*, проф., д.т.н., декан МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия;

*Лукин Д.С.*, заслуженный деятель науки РФ, проф., д.ф.-м.н., проф. МФТИ, Москва, Россия;

*Шапкин В.С.*, заслуженный работник транспорта РФ, проф., д.т.н., Москва, Россия;

*Дамиан Ривас Ривас*, проф., PhD, проф. Университета Севильи, Севилья, Испания;

*Сью Хаудзюнь*, PhD, Университет военно-воздушных сил, Хиан, Китай;

*Сайдахмедов Р.Х.*, проф., д.т.н., Ташкентский государственный технический университет им. Ислама Каримова, Ташкент, Узбекистан;

*Франко Персиани*, PhD, директор Межведомственного Центра промышленных исследований в авионавтике, Болонский университет, Болонья, Италия;

*Владимир Немец*, PhD, Факультет транспортных наук, Отделение воздушного транспорта, Чешский технический университет, Прага, Чешская республика;

*Станислав Сзабо*, PhD, Факультет авионавтики, Технический университет в Кошице, Кошице, Словацкая республика.

### Ответственный редактор выпуска:

*Воробьев В.В.*, проф., д.т.н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия.

Сайт: <http://avia.mstuca.ru>

E-mail: [vestnik@mstuca.aero](mailto:vestnik@mstuca.aero)

Тел.: +7 (499) 459-07-16

*Плата за публикацию в Научном Вестнике МГТУ ГА с аспирантов не взимается*

### Chief Editorial Board

- Editor-in-chief:** *Boris Eliseev*, Professor, Doctor of Sciences, Rector, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;
- Deputy Editor-in-chief:** *Vadim Vorobyev*, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;
- Executive Secretaries:** *Tatiana Naumova*, Associate Professor, Candidate of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;  
*Irina Poleshkina*, Associate Professor, Candidate of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia.

### Members of the chief editorial Board:

*Anatoly I. Kozlov*, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

*Olga D. Garanina*, Honorary Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

*Igor K. Turkin*, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia;

*Vladimir T. Kalugin*, Professor, Doctor of Sciences, Dean, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia;

*Dmitry S. Lukin*, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia;

*Vacily S. Shapkin*, Honored Worker of Transport of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, State Research Institute of Civil Aviation, Moscow, Russia;

*Damian Rivas Rivas*, Professor, PhD, University of Seville, Seville, Spain;

*Xu Haojun*, PhD, Air Force Engineering University, Xi'an, China;

*Ravshan H. Saydakhmedov*, Professor, Doctor of Sciences, Tashkent State Technical University, Tashkent, Uzbekistan;

*Franco Persiani*, PhD, Director of Centre, University of Bologna, Bologna, Italy;

*Vladimir Nemez*, PhD, Faculty of Transportation Sciences, Department of Air Transport, Czech Technical University in Prague, Czech Republic;

*Stanislav Szabo*, Associate Professor, PhD, Dean, Faculty of Aeronautics, Technical University of Košice, Košice, Slovak republic.

### Issue Editor:

*Vadim V. Vorobyev*, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia.

Web-site: <http://avia.mstuca.ru>

E-mail: [vestnik@mstuca.aero](mailto:vestnik@mstuca.aero)

### Редакционный совет

**Абрамов О.В.**, заслуженный деятель науки РФ, проф., д.т.н., Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия;

**Акиншин Р.Н.**, проф., д.т.н., в.н.с., секция оборонных проблем МО РФ при президенте РАН, Москва, Россия;

**Бачкало Б.И.** проф., д.т.н., в.н.с. ЦНИИ ВВС МО РФ, г. Щелково, Московская обл., Россия;

**Брусков В.С.**, проф., д.т.н., проф. МАИ (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

**Вышинский В.В.**, проф., д.т.н., проф. МФТИ, г.н.с. ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, Жуковский, Россия;

**Горелик А.Г.**, проф., д.ф.-м.н., проф. МИФИ, Москва, Россия;

**Гузий А.Г.**, д.т.н., зам. директора ПАО «Авиакомпания «ЮТэйр», Москва, Россия;

**Давидов А.О.**, доцент, д.т.н., Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина;

**Красильщик И.С.**, проф., д.ф.-м.н., проф. МНУ, Москва, Россия;

**Кубланов М.С.**, проф., д.т.н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

**Кузнецов В.Л.**, проф., д.т.н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия;

**Кузнецов С.В.**, проф., д.т.н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия;

**Логвин А.И.**, заслуженный деятель науки РФ, проф., д.т.н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

**Нечаев Е.Е.**, проф., д.т.н., зав. каф. МГТУ ГА, Москва, Россия;

**Пантелеев А.В.**, проф., д.ф.-м.н., зав. каф. МАИ (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

**Рухлинский В.М.**, д.т.н., председатель комиссии МАК по связям с Международной организацией гражданской авиации, Москва, Россия;

**Самохин А.В.**, д.т.н., проф. МГТУ ГА, Москва, Россия;

**Сарычев В.А.**, проф., д.т.н., г.н.с. АО «Радар-ММС», Санкт-Петербург, Россия;

**Татаринов В.Н.**, действительный член Академии электромагнетизма США, проф., д.т.н., проф. ТУСУР, Томск, Россия;

**Увайсов С.У.**, проф., д.т.н., зав. кафедрой МГУ, Москва, Россия;

**Халютин С.П.**, проф., д.т.н., ген. директор ООО «Экспериментальная мастерская НаукаСофт», Москва, Россия;

**Харитонов С.А.**, проф., д.т.н., зав. каф., НГТУ, Новосибирск, Россия;

**Ходаковский В.А.**, заслуженный деятель науки ЛССР, проф., д.т.н., Рига, Латвия;

**Чинючин Ю.М.**, проф., д.т.н., профессор МГТУ ГА, Москва, Россия;

**Шахтарин Б.И.**, академик РАЕН, заслуженный деятель науки и техники РФ, проф., д.т.н., проф. МГТУ им. Н.Э. Баумана (национального исследовательского университета), Москва, Россия;

**Юрков Н.К.**, заслуженный деятель науки РФ, почетный работник высшего профессионального образования РФ, проф., д.т.н., проф. ПГУ, Пенза, Россия.

### Editorial council

**Oleg V. Abramov**, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia;

**Ruslan N. Akinshin**, Professor, Doctor of Sciences, Section of Applied Problems under the Presidium of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

**Boris I. Bachkalo**, Professor, Doctor of Sciences, Leading Research Fellow, Russian Air Force Central Scientific Research Institute of Ministry of Defence, Shchelkovo, Russia;

**Vladimir S. Brusov**, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia;

**Viktor V. Vyshinsky**, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Institute of Physics and Technology, Chief Research Fellow, Central Aerohydrodynamic Institute, Zhukovskiy, Russia;

**Andrey G. Gorelik**, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia;

**Anatoliy G. Guzyi**, Doctor of Sciences, UTair Airlines, Moscow, Russia;

**Albert O. Davidov**, Assistant Professor, Doctor of Sciences, National Aerospace University Kharkiv Aviation Institute, Kharkiv, Ukraine;

**Iosif S. Krasilschik**, Professor, Doctor of Sciences, Moscow Independent University, Moscow, Russia;

**Michael S. Kublanov**, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

**Valeriy L. Kuznetsov**, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

**Sergey V. Kuznetsov**, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

**Aleksandr I. Logvin**, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation Moscow, Russia;

**Evgeniy E. Nechaev**, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

**Andrey V. Panteleev**, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia;

**Victor M. Rukhlinskiy**, Doctor of Sciences, Chairman of the Commission for Relations with ICAO Board, International and Interstate Organizations of the Interstate Aviation Committee, Moscow, Russia;

**Aleksey V. Samokhin**, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia.

**Valentin A. Sarychev**, Professor, Doctor of Sciences, "Radar-MMS" Joint-Stock Company, St.Petersburg, Russia;

**Viktor N. Tatarinov**, Actual Member of the US Electrical Magnetism Academy, Professor, Doctor of Sciences, Tomsk State Radio Electronic and Control Systems University, Tomsk, Russia;

**Saygid U. Uvaysov**, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Moscow Technological University, Moscow, Russia;

**Sergey P. Khalyutin**, Professor, Doctor of Sciences, Director General, CEO LLC "Experimental laboratory NaukaSoft", Moscow, Russia;

**Sergey A. Kharitonov**, Professor, Doctor of Sciences, Head of Chair, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia;

**Vladimir A. Hodakovskiy**, Honored Worker of Science of Latvian Soviet Socialist Republic, Professor, Doctor of Sciences, Riga, Latvia;

**Yuriy M. Chinyuchin**, Professor, Doctor of Sciences, Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia;

**Boris I. Shakhtarin**, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia;

**Nikolay K. Urkov**, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Professor, Doctor of Sciences, Penza State University, Penza, Russia.

## СОДЕРЖАНИЕ

### *ТРАНСПОРТ*

<b>Соболев А.В., Попов В.А., Селезнев А.В.</b> Вариант целесообразного применения воздушных судов при проведении длительных поисково-спасательных операций .....	8
<b>Крыжановский Г.А., Пономарев К.Ю., Тимошко М.В.</b> К оптимизации управления воздушным движением при развитии визуально-когнитивной составляющей .....	16
<b>Волков Ан.К., Ионов В.В.</b> Совершенствование организации профессиональной подготовки операторов досмотра с применением системы регистрации движения глаз и методов кластерного и дискриминантного анализа .....	25
<b>Завалишин О.И.</b> О двухсозвездных GBAS .....	37
<b>Борисов В.Е., Борсоева В.В., Степанов С.М., Степнова А.И.</b> Определение вероятности безошибочной работы диспетчера .....	47
<b>Зубков Б.В., Волков Ал.К.</b> Оценка профессиональной подготовленности операторов досмотровой техники с применением двухпараметрической модели А. Бирнбаума .....	56
<b>Дормидонтов А.В., Миронова Л.В., Миронов В.С.</b> О возможности применения математической модели противодействия к оценке уровня безопасности объектов транспортной инфраструктуры .....	67
<b>Егошин С.Ф., Смирнов А.В.</b> Авиатранспортная доступность и транспортная дискриминация населения в субъектах Российской Федерации .....	78

### *АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА*

<b>Овчинников В.В., Петров Ю.В.</b> Методика расчета характеристик аэродинамического нагружения двухоболочковых планирующих парашютов .....	91
--	----

### *МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ*

<b>Рыбалкина А.Л., Спирин А.С., Трусова Е.И.</b> Уменьшение влияния неблагоприятных внешних условий в аэропортах местного значения .....	101
<b>Тер-Саакова И.М., Подалякина Н.И., Ходаковский В.А.</b> Влияние уровня безотказности на затраты, связанные с производством и гарантийным обслуживанием инновационных изделий .....	115

### *ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ*

<b>Федотов А.А., Ципенко А.В., Лебедев А.И.</b> Численное моделирование клевого ремонтного соединения .....	125
<b>Пантелеев А.В., Родионова Д.А.</b> Применение гибридного метода случайного поиска в задачах оптимизации элементов технических систем ...	139
<b>Хорькова Н.Г.</b> О бесконечных сериях нелокальных законов сохранения дифференциальных уравнений в частных производных .....	150

### *РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ*

<b>Козлов А.И., Маслов В.Ю.</b> Решение обратной задачи рассеяния и восстановление формы объекта по структуре поля отраженной электромагнитной волны .....	160
<b>Корнеев П.Е.</b> Дискретизация поляризованного сигнала .....	169

## CONTENTS

### *TRANSPORT*

<b>Sobolev A.V., Popov V.A., Seleznev A.V.</b> Option for the advisability of appropriate aircraft use during the prolonged search and rescue operations .....	8
<b>Kryzhanovskiy G.A., Ponomarev K.Yu., Timoshko M.V.</b> To optimization of air traffic control by visual-cognitive component development .....	16
<b>Volkov An.K., Ionov V.V.</b> The improvement of professional training organization of the x-ray screening systems operators by using the eye movements registration system and methods of cluster and discriminant analysis .....	25
<b>Zavalishin O.I.</b> About two-star GBAS .....	37
<b>Borisov V.E., Borsoeva V.V., Stepanov S.M., Stepnova A.I.</b> The probability determination of error-free air traffic controller operation .....	47
<b>Zubkov B.V., Volkov A.K.</b> Assessment of aviation security screeners proficiency by means of applying the A. Birnbaum two-parameter model .....	56
<b>Dormidontov A.V., Mironova L.V., Mironov V.S.</b> Possibility of the mathematical model of counteraction application to the assessment of transport infrastructure security level .....	67
<b>Egoshin S.F., Smirnov A.V.</b> Air transport accessibility and transport discrimination of population in constituents of the Russian Federation .....	78

### *AVIATION, ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY*

<b>Ovchinnicov V.V., Petrov Yu.V.</b> The aerodynamic characteristics calculation methodology of two-shell paragliders.....	91
--	----

### *MECHANICAL ENGINEERING AND THEORY OF MACHINES*

<b>Rybalkina A.L., Spirin A.S., Trusova E.I.</b> Reducing influence of adverse external conditions in the local airports .....	101
<b>Ter-Saakova I.M., Podalyakina N.I., Khodakovskiy V.A.</b> Influence of failure-free operation level on costs related to production and guarantee service of innovative products .....	115

### *INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT*

<b>Fedotov A.A., Tsipenko A.V., Lebedev A.I.</b> Numerical modelling of the airframe damage growth for the adhesive repair joint calculation .....	125
<b>Panteleev A.V., Rodionova D.A.</b> Application of hybrid random search method to optimisation of engineering systems' parameters .....	139
<b>Khor'kova N.G.</b> On infinite series of nonlocal conservation laws for partial differential equations .....	150

### *RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATIONS*

<b>Kozlov A.I., Maslov V.Yu.</b> The inverse-scattering problem solution and shape from the reflected electromagnetic wave field structure .....	160
<b>Korneev P.E.</b> The discretization of the polarized signal .....	169

ТРАНСПОРТ

УДК656.7.08

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-8-15

## ВАРИАНТ ЦЕЛЕСООБРАЗНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ДЛИТЕЛЬНЫХ ПОИСКОВО-СПАСАТЕЛЬНЫХ ОПЕРАЦИЙ

А.В. СОБОЛЕВ<sup>1</sup>, В.А. ПОПОВ<sup>2</sup>, А.В. СЕЛЕЗНЕВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Якутский поисково-спасательный отряд МЧС России, г. Якутск, Россия

<sup>2</sup>Ульяновский институт гражданской авиации им. Главного маршала авиации Б.П. Бугаева,  
г. Ульяновск, Россия

Проведение поисково-спасательных работ (ПСР) в единой системе авиационно-космического поиска и спасания (АКПС) связано не только с использованием дежурных поисково-спасательных (ПС) воздушных судов (ВС), но и с необходимостью привлечения дополнительных сил и средств, в том числе нештатных ВС. При этом расходы на проведение ПСР значительно увеличиваются при проведении длительных поисков. В статье представлено решение задачи уменьшения расходов на проведение длительных ПСР способом целесообразного применения воздушных судов с соблюдением необходимых требований системы. Исследования прошлых лет в данной области практически не рассматривали особенности проведения поисков в таком контексте. С этой целью проводится анализ современных условий выполнения ПСР, рассмотрены ключевые варианты применения ВС. Выявлено, что объем работ по поиску значительно превосходит объем работ по эвакуации. Следовательно, основной расход финансовых средств на задействование авиации при выполнении ПСР приходится на фазу поиска. Предложено обоснование применения легких ВС в фазе поиска, например, замена некоторых штатных (дежурных) вертолетов типа Ми-8 на Ми-2, поисковые возможности которых практически идентичны. Особенностью применения является возможность осуществления полетов способом «по наведению». В качестве примера рассмотрены проведенные ПСР с длительной фазой поисков, в которой теоретически было возможно уменьшение расходов на 8,3 %. Предлагаемый способ дает основание для переосмысления современного оснащения воздушными судами региональных поисково-спасательных баз в пользу небольших и менее грузоподъемных при проведении длительных ПСР. При этом обеспечивается экономия финансовых средств с учетом соблюдения необходимых требований системы АКПС относительно ее эффективного функционирования в целом.

**Ключевые слова:** длительный поиск, целесообразность, воздушное судно, оперативность, уменьшение затрат, поиск и спасание, альтернатива.

### ВВЕДЕНИЕ

В нашей стране для обеспечения полетов авиации и космических объектов в поисково-спасательном отношении функционирует единая система авиационно-космического поиска и спасания (АКПС). Только за 2016 год в рамках проводимых мероприятий выполнено 39 поисково-спасательных операций, в результате которых было спасено 47 человек<sup>1</sup>, а также проведено восемь работ по обеспечению запуска и посадки космических аппаратов. Основными ресурсами системы являются дежурные силы и средства, осуществляющие поисково-спасательное обеспечение (ПСО) полетов, в том числе поисково-спасательные воздушные суда (ПСВС), выполняющие функции по поиску и спасанию самостоятельно или совместно со спасательными парашютно-десантными группами (СПДГ), десантируемыми к месту бедствия.

В дополнение к дежурным ПСВС обязательно привлекаются (по согласованию) нештатные ВС, если их маршруты пролегают вблизи предполагаемого места авиационного происше-

<sup>1</sup> Анализ поисково-спасательных операций (работ), проведенных в 2016 году [Электронный ресурс]. URL: <http://www.favt.ru/public/materials/0/d/5/6/1/0d561f1d84e1c133a562b4ce52bb9fae.pdf> (дата обращения: 01.09.2017).

ствия (АП) или для наращивания усилий по поиску<sup>2,3,4</sup>. Подобная практика взаимодействия имеет широкое распространение при организации ПСР за рубежом и в нашей стране. Анализ проведенных ПСР за период с 2010 по 2015 год показал, что примерно в половине (47 %) случаев пострадавшим была оказана помощь привлекаемыми нештатными ВС<sup>5,6,7,8,9,10</sup> [1].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

После проведения поисково-спасательных работ Министерству транспорта РФ необходимо компенсировать затраты на проведение ПСР их участникам [2]. В этой связи актуализируется проблема целесообразного использования ВС, выделенных для целей поиска и спасания. В нашем контексте целесообразность следует понимать как возможность уменьшения финансовых расходов на ПСР при применении конкретных ВС.

Исследованиями вопросов определения и выбора типов ВС для целей авиационного поиска и спасания, а также определения расходов на их финансирование были посвящены работы С. Батмунх, М.Я. Кульмухаметова, Л.П. Паристойой, В.В. Романенко [3–7]. Однако в этих работах не нашли отражение особенности проведения длительных ПСР в контексте современных условий.

Основная логика проведения ПСР заключается в том, что если первоначальный поиск потерпевших бедствие пассажиров и экипажей воздушных судов с использованием дежурных сил и средств системы АКПС не дает результата, то привлекаются, как правило, все возможные силы и средства с целью скорейшего обнаружения потерпевших и оказания им помощи.

Необходимость своевременной помощи людям, находящимся в стрессовых условиях автономного существования на месте вынужденной посадки (падения) ВС подтверждается многочисленными экспериментами и данными, полученными при расследовании авиакатастроф. Известно, что в автономных условиях за первые сутки погибает 80 % раненых [8]. Среди людей, не получивших ранения, столько же погибает от воздействия факторов и стрессоров выживания за первые трое суток. Количество оставшихся в живых, в зависимости от времени пребывания в автономных условиях после АП, подчинено экспоненциальному закону распределения (рис. 1).

<sup>2</sup> Поиск и спасание. Приложение 12 к Конвенции о международной гражданской авиации // Конвенция о Международной гражданской авиации: Дос. 7300. Монреаль: ICAO, 1990.

<sup>3</sup> Воздушный кодекс Российской Федерации: федер. закон РФ от 19.03.1997 № 60-ФЗ.

<sup>4</sup> О введении в действие Положения о привлечении гражданской авиации к ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций: приказ МЧС России и Минтранса России от 20.10.95 № 714/87.

<sup>5</sup> Анализ поисково-спасательных операций (работ), проведенных в 2010 году [Электронный ресурс]. URL: <http://www.favt.ru/public/materials//0/d/5/6/1/0d561f1d84e1c133a562b4ce52bb9fae.pdf> (дата обращения: 01.09.2017).

<sup>6</sup> Анализ организации авиационно-космического поиска и спасания в 2011 году [Электронный ресурс]. URL: <http://www.favt.ru/public/materials//a/f/5/7/6/af576730da30e5a70cb55fe2e6608f12.pdf> (дата обращения: 01.09.2017).

<sup>7</sup> Анализ поиска и спасания в РФ в 2012 году [Электронный ресурс]. URL: <http://www.favt.ru/public/materials//3/1/a/2/a/31a2ae3c66bea02647a8fd3b686a407f.pdf> (дата обращения: 01.09.2017).

<sup>8</sup> Анализ поиска и спасания в РФ в 2013 году [Электронный ресурс]. URL: <http://www.favt.ru/public/materials//f/f/5/f/4/ff5f4d6f091a8a4b06d7bd14dfdef833.pdf> (дата обращения: 01.09.2017).

<sup>9</sup> Анализ поиска и спасания в РФ в 2014 году [Электронный ресурс]. URL: <http://www.favt.ru/public/materials//c/2/4/6/4/c2464e2fc90ee8d745df0ab04bd7e5e3.pdf> (дата обращения: 01.09.2017).

<sup>10</sup> Анализ поиска и спасания в РФ в 2015 году [Электронный ресурс]. URL: <http://www.favt.ru/public/materials//e/4/9/1/2/e49126c172a607a0104176d6d4d09176.pdf> (дата обращения: 01.09.2017).

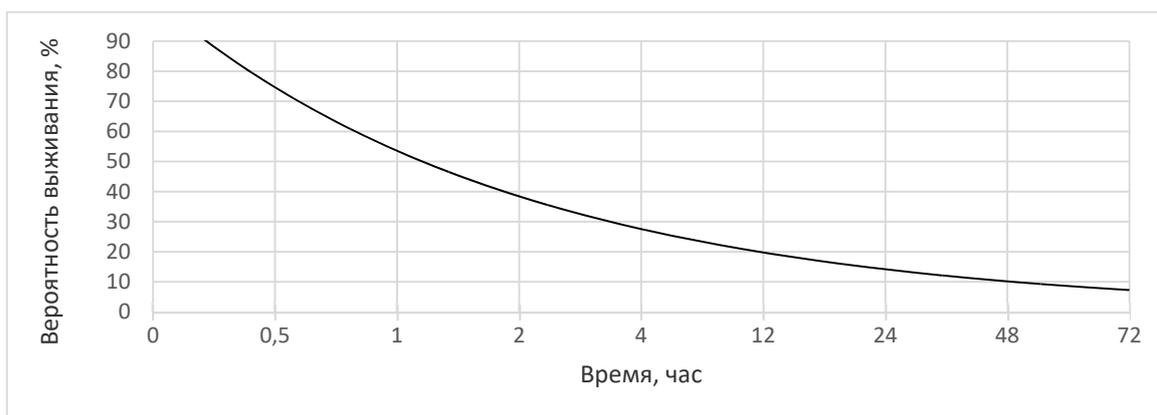


Рис. 1. Динамика вероятности выживания людей, получивших ранения при АП, в зависимости от времени

Fig. 1. Dynamics of the survival probability of the people at the AA, depending on time

С течением времени значимость немедленного оказания помощи уменьшается и актуализируются поисковые мероприятия по причине низкой вероятности выживания. Таким образом, для современного поиска и спасания потерпевших бедствие ВС не всегда необходимо привлекать все имеющиеся силы и средства.

## МЕТОДОЛОГИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Одним из вариантов решения рассматриваемой проблемы является целесообразное распределение ВС при проведении длительных ПСР, общий принцип которого заключается в том, чтобы во вторые и последующие сутки поиск проводили легкие ВС, а специализированные (штатные) ПСВС привлекались «по наведению» уже после обнаружения пострадавших, в случае, если это потребуется для экстренной эвакуации.

Превалирующим параметром, которым следует руководствоваться в заданных условиях, будет «себестоимость часа работ», т. к. он позволяет оценить ВС с точки зрения финансовых расходов на ПСР.

При сопоставлении наиболее привлекаемых к длительным ПСР типов воздушных судов оказывается, что самой высокой себестоимостью часа работ обладает вертолет Ми-8 (табл. 1).

Таблица 1  
Table 1

Среднее значение себестоимости работы некоторых ВС, привлекаемых к ПСР  
The average value of the cost of some aircraft involved in the AKP

Тип ВС	Себестоимость, руб/ч
Ми-8	200000
Ан-2	100000
Ан-26	150000
Р-44	80000
SA-341	80000
Еврокоптер EC 120	70000
AS-350	70000

Высокая себестоимость работы Ми-8 объясняется, например, многофункциональностью ВС, потому как это ВС обладает высокими оперативными поисково-эвакуационными возмож-

ностями, а также возможностью десантировать СПДГ парашютным способом, на спусковых устройствах и подъемом пострадавших в режиме «висения».

Однако следует учесть, что в соответствии с международными правилами поиска и спасения<sup>11</sup> воздушный визуальный поиск проводится на высотах до 600 метров с рекомендуемыми скоростями полета для вертолетов и легких самолетов – до 180 км/ч. Следовательно, поисковая производительность, принимаемая как площадь суши или водной поверхности, которую ВС может обследовать визуально или с помощью поисковых радиотехнических средств в течение одного часа, идентична для вертолетов и легких самолетов. Поэтому многофункциональность Ми-8 при проведениях поисков не является необходимым условием.

Предположим вариант, когда в ходе ПСР необходимо выполнить последовательность некоторых фаз с учетом временных параметров: поиск –  $t_1$ , оказание помощи и эвакуация –  $t_2$ , передислокация к постоянному месту базирования –  $t_3$ , частным ВС – R-44 и ПСВС – Ми-8, при условии выполнения каждой фазы ВС за один час.

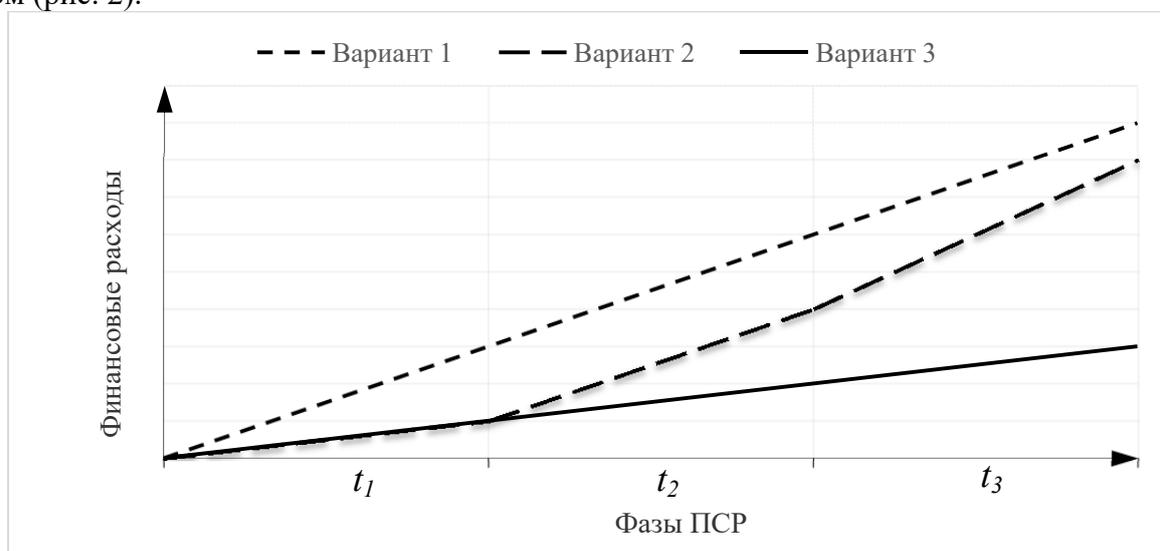
Рассмотрим три варианта выполнения ПСР с привлечением воздушных судов:

вариант 1 («стандартный»): работы выполняются только штатным ПСВС;

вариант 2 («по наведению»): после поиска и обнаружения пострадавших частным ВС привлекается ПСВС для оказания помощи и эвакуации пострадавших, в связи с невозможностью самостоятельного проведения работ частным ВС по причине отсутствия площадки приземления;

вариант 3 («экономичный»): работы выполняются только частным ВС ввиду избыточности функциональных возможностей для оказания помощи и осуществления эвакуации.

Тогда график зависимости финансовых затрат от фаз ПСР будет выглядеть следующим образом (рис. 2).



**Рис. 2.** Динамика зависимости финансовых затрат от фаз ПСР с привлечением ВС по вариантам  
**Fig. 2.** Dynamics based on the financial costs of the phases of the SAR, with the involvement of the aircraft on options

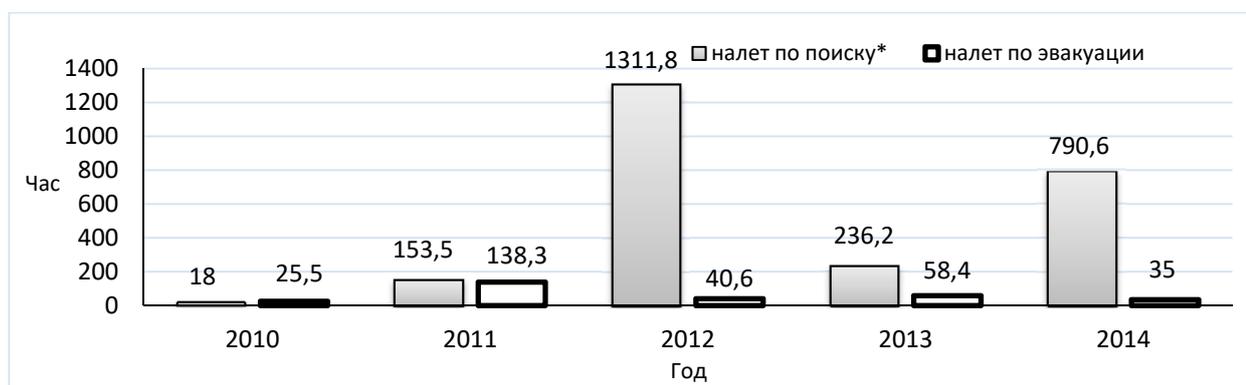
По варианту 1 – величина финансовых затрат в интервале от  $t_1$  до  $t_3$  для ПСВС равномерно увеличивается, в связи с тем что ПСР выполняется одним ВС, значение себестоимости часа работы которого – постоянно.

<sup>11</sup> Руководство по международному морскому и авиационному поиску и спасанию (МАМПС). Ч. 2. Координация действий: ИМО/ИКАО, Лондон/Монреаль, 2013. 478 с.

По варианту 2 – величина финансовых расходов при фазе поиска  $t_1$  частным ВС, будет равномерно увеличиваться в зависимости от продолжительности поиска. После обнаружения пострадавших, привлекают штатное ПСВС, а частное ВС возвращается на место дислокации. В фазе  $t_2$  учитываются финансовые расходы только ПСВС, поскольку оказание помощи и эвакуация выполняется только одним воздушным судном. В фазе  $t_3$  учитываются финансовые расходы двух ВС.

По варианту 3 – величина расходов по всем фазам для частного ВС равномерно увеличивается, в связи с тем, что ПСР выполняется одним ВС, значение себестоимости часа работы которого – постоянно, но значительно меньше, чем штатного ПСВС.

Статистически объем работ по поиску значительно превосходит объем работ по эвакуации (рис. 3).



\*учтены те ПСР, время налета по которым составляет 5 часов и более  
\*account of the SAR, the attack time which is 5 hours or more

**Рис. 3.** Динамика налета часов ВС, привлекаемых к ПСР за период с 2010 по 2015 г.  
**Fig. 3.** Dynamics of flight hours, aircraft, brought to the SAR in the period from 2010 to 2015

Следовательно, основной объем затрат на полеты авиации при выполнении ПСР приходится на фазу поиска. Поэтому способ применения ВС «по наведению» будет наиболее подходящим.

Для примера рассмотрим АП 14.05.2014 года с длительной фазой поисков.

Обстоятельства: 13.05.2014 вертолет вылетал с площадки «Поселковая» Всевожского района Ленинградской области на площадку в Приозерский район, в пункт назначения в установленное время не прибыл.

После проведения ПСР и обнаружения (18.05.2014) потерпевшего бедствие вертолета для обследования места происшествия «по наведению» привлекался ПСВС Ми-8. Общий налет авиационных сил и средств представлен в табл. 2.

**Таблица 2**  
**Table 2**

Применение авиационных сил и средств в ПСР  
The use of aviation forces and means in the SAR

Авиационные силы и средства поиска	Налет, час
ПСВС	12,67
ПСВС («по наведению»)	1,22
Частные ВС	175

Учитывая предложенный подход, возможно исключить применение ПСВС по поиску, распределяя эту нагрузку (11,45 ч) на другие, более «легкие» ВС. При условии, что средняя себестоимость этих ВС – 80000 руб/ч, а Ми-8 – 200000 руб/ч, экономия составит 1374000 рублей, или 8,3 % от общих расходов на обеспечение полетов авиации.

## ВЫВОДЫ

Решение задачи повышения эффективности и экономичности при проведении ПСР в системе ПСО полетов авиации возможно путем применения «легких» ВС в качестве альтернативы более «тяжелым». Например, в центральной России, где высокая плотность аэродромов базирования<sup>12</sup> и хорошие климатогеографические условия, заменить некоторые штатные (дежурные) вертолеты типа Ми-8 на Ми-2 или «Ансат», поисковые возможности которых практически останутся идентичными. При этом, по нашему мнению, будет наблюдаться:

увеличение оперативности реагирования за счет уменьшения времени на подготовку вертолета к вылету. Известно, что «большие» вертолеты более требовательны к процессу предстартового обслуживания;

уменьшение финансовых затрат на оперативное техническое обслуживание ПСВС. Ежегодные затраты на обеспечение дежурства ПСВС типа Ми-8 в среднем составляют 1 млн руб. В основном это расходы на горюче-смазочные материалы (ГСМ), но меньший объем двигателя потребует и меньшего расхода ГСМ;

уменьшение финансовых затрат на проведение ПСР за счет меньшей их себестоимости, особенно при проведении длительных ПСР.

Анализ выполненных ПСР дает основание для переосмысления современного оснащения авиационных поисково-спасательных подразделений ПСВС в пользу небольших и менее грузоподъемных ВС, особенно при проведении длительных ПСР. Такой подход позволит обеспечить экономию финансовых средств без ущерба потерпевшим бедствие, при соблюдении необходимых требований к функционированию системы АКПС в масштабах государства.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Соболев А.В., Попов В.А., Селезнев А.В.** Основы методики оптимизации количественного и качественного состава поисково-спасательных воздушных судов в системе авиационно-космического поиска и спасания // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20, № 10. С. 184–190. DOI: 10.21285/1814–3520–2016–10–184–190.
2. **Соболев А. В.** Оценка затрат на поисково-спасательное обеспечение полетов авиации // Гражданская авиация: XXI век: сборник материалов VI Международной молодежной научной конференции 10–11 апреля 2014 г. Ульяновск: УВАУ ГА (И), 2014. С. 108–110.
3. **Кульмухаметов М.Я.** Разработка методов прогнозирования эксплуатационных показателей ВС ГА. М.: Транспорт, 1986. 248 с.
4. **Паристова Л.П.** Постановка задачи оптимизации поисково-спасательного обеспечения полетов // Межвузовский сборник научных трудов Академии гражданской авиации. Т. X. СПб., 2004. 36 с.
5. **Романенко В.В.** Совершенствование процесса эксплуатации ВС на авиалиниях по критерию эффективности. М.: Транспорт, 1986. 386 с.

<sup>12</sup> Дежурные силы и средства по зонам авиационно-космического поиска и спасания по состоянию на 22 августа 2017 года [Электронный ресурс]. URL: <http://www.favt.ru/public/materials//2/c/2/b/7/2c2b78df143bfadc612097df603141ee.pdf> (дата обращения: 01.09.2017).

6. **Паристова Л.П.** Экономическое обоснование деятельности службы поискового и аварийно-спасательного обеспечения полетов гражданской авиации России: дисс. канд. эконом. наук. СПб., 2004. 197 с.

7. **Батмунх С.** Комплексная методика проектирования развития структуры системы воздушного транспорта Монголии: автореферат дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. СПб., 2003. 24 с.

8. **Попов В.А.** Выживание, поиск и спасание должны обеспечиваться на системной основе // Авиапанорама. 2016. № 5. С. 17–30.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Соболев Алексей Вячеславович**, спасатель 3 класса Якутского поисково-спасательного отряда МЧС России, al-4112@mail.ru.

**Попов Владимир Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры поискового и аварийно-спасательного обеспечения полетов и техносферной безопасности УИГА, vpopov51@rambler.ru.

**Селезнев Андрей Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры поискового и аварийно-спасательного обеспечения полетов и техносферной безопасности УИГА, anceleznev@yandex.ru.

## OPTION FOR THE ADVISABILITY OF APPROPRIATE AIRCRAFT USE DURING THE PROLONGED SEARCH AND RESCUE OPERATIONS

**Aleksei V. Sobolev<sup>1</sup>, Vladimir A. Popov<sup>2</sup>, Andrei V. Seleznev<sup>2</sup>**  
<sup>1</sup>*Yakutsk Search and Rescue Team EMERCOM of Russia, Yakutsk, Russia*  
<sup>2</sup>*Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia*

### ABSTRACT

Carrying out search and rescue operations (SAR) in a unified system of aerospace search and rescue (ASR) is not only related to the use of on-duty search and rescue (OSR) aircraft, but also with the need to attract additional forces and assets, including non-regular aircraft. At the same time, the cost of carrying out the SAR is significantly increased during prolonged searches. The article presents a problem solution for reducing the cost of conducting prolonged SAR by the method of expedient use of aircraft in compliance with the necessary system requirements. Studies of last years in this field have hardly considered the specifics of conducting searches in this context. For this purpose, an analysis of the current conditions for the implementation of the SAR is carried out and key options for the use of aircraft are considered. It has been revealed that the amount of the search work is much greater than the amount of evacuation work. Therefore, the main charge of financial resources for the use of aviation in the SAR falls to the search phase. A rationale for the use of light aircraft in the search phase is suggested, for example, to replace some regular (on duty) Mi-8 helicopters instead of the Mi-2, the search capabilities of which are almost identical. The peculiarity of the application is the possibility of carrying out flights by the guidance method. As an example, an SAR with a prolonged phase was considered, in which it was theoretically possible to reduce costs by 8.3%. The proposed method provides a basis for a rethinking of the aircraft modern equipment for the SAR of the regional search and rescue bases in favor of small and less heavy lifting when carrying out prolonged SAR. At the same time, the economy of financial resources is ensured, taking into account the observance of the necessary requirements of the ASR system regarding its effective functioning as a whole.

**Key words:** prolonged search, advisability, aircraft, efficiency, cost reduction, search and rescue, alternative.

### REFERENCES

1. **Sobolev, A.V., Popov, V.A. and Seleznev, A.V.** (2016). *Osnovy metodiki optimizacii kolichestvennogo i kachestvennogo sostava poiskovo-spasatel'nyh vozdushnyh sudov v sisteme avi-*

*acionno-kosmicheskogo poiska i spasaniya* [Fundamentals of the methodology for optimizing the quantitative and qualitative composition of search and rescue aircraft in the aerospace search and rescue system]. Bulletin of the Irkutsk State Technical University, vol. 20, no. 10. pp. 184–190. DOI: 10.21285/1814–3520–2016–10–184–190. (in Russian)

2. **Sobolev, A.V.** (2014). *Ocenka zatrat na poiskovo-spasatel'noe obespechenie poletov aviacii* [Estimate of costs for search and rescue support of aviation flights]. Civil aviation: XXI century: a collection of materials of the VI International Youth Scientific Conference on April 10–11, 2014, Ulyanovsk, pp. 108–110. (in Russian)

3. **Kul'muhametov, M.Ja.** (1986). *Razrabotka metodov prognozirovaniya jekspluatacionnyh pokazatelej VS GA* [Development of methods for forecasting operational performance of the aircraft]. Moscow: Transport, 248 p. (in Russian)

4. **Paristova, L.P.** (2004). *Postanovka zadachi optimizacii poiskovo-spasatel'nogo obespecheniya poletov* [Statement of the problem of optimization of search and rescue support of flights]. Inter-university collection of scientific papers of the Academy of Civil Aviation, tom X, St. Petersburg, 36 p. (in Russian)

5. **Romanenko, V.V.** (1986). *Sovershenstvovanie processa jekspluatatsii VS na avialinijah po kriteriju jeffektivnosti* [Improving of the process of aircraft operation on airlines by the criterion of efficiency]. Moscow: Transport, 386 p. (in Russian)

6. **Paristova, L.P.** (2004). *Jekonomicheskoe obosnovanie dejatel'nosti sluzhby poiskovogo i avarijno-spasatel'nogo obespecheniya poletov grazhdanskoj aviacii Rossii* [The economic substantiation of the activity of the search and rescue service of flights of civil aviation in Russia]: the Thesis of the candidate of economic sciences, St. Petersburg, 197 p. (in Russian)

7. **Batmunh, S.** (2003). *Kompleksnaja metodika proektirovaniya razvitija struktury sistemy vozdušnogo transporta Mongolii* [Integrated methodology for designing the development of the structure of the air transport system in Mongolia]. Abstract of the dissertation. St. Petersburg, 24 p. (in Russian)

8. **Popov, V.A.** (2016). *Vyzhivanie, poisk i spasanie dolzhny obespechivat'sja na sistemnoj osnove* [Search and rescue should be provided on a system basis]. AviaPanorama, no. 5. pp. 17–30. (in Russian)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Aleksei V. Sobolev**, Class 3 Rescuer of Yakutsk Search and Rescue Team EMERCOM of Russia, al-4112@mail.ru.

**Vladimir A. Popov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Search and Rescue Support of Flight and Technosphere Security Chair, Ulyanovsk Civil Aviation Institute, vpopov51@rambler.ru.

**Andrei V. Seleznev**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Search and Rescue Support of Flight and Technosphere Security Chair, Ulyanovsk Civil Aviation Institute, anceleznev@yandex.ru.

Поступила в редакцию 21.12.2017  
Принята в печать 15.05.2018

Received 21.12.2017  
Accepted for publication 15.05.2018

УДК 65.012.123

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-16-24

## К ОПТИМИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ВОЗДУШНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ПРИ РАЗВИТИИ ВИЗУАЛЬНО-КОГНИТИВНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ

Г.А. КРЫЖАНОВСКИЙ<sup>1</sup>, К.Ю. ПОНОМАРЕВ<sup>1,2</sup>, М.В. ТИМОШКО<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации,  
г. Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Государственное предприятие «Белаэронавигация», г. Минск, Беларусь

Статья обращена к развитию визуально-когнитивной составляющей взаимодействия специалиста по обслуживанию воздушного движения с цветографическим интерфейсом информационной среды средств наблюдения за динамической воздушной обстановкой типовой автоматизированной системы управления воздушным движением. Из практики наблюдения за взаимодействием диспетчеров по управлению воздушным движением районно-диспетчерского центра с информационной средой интерфейса средств наблюдения за динамической воздушной обстановкой выявлены существующие недостатки, преодоление которых способствует достижению наиболее рационального состояния функционирования системы управления воздушным движением. Особенно важным является устранение подобных недостатков в периоды повышенной рабочей нагрузки, в частности, в ситуациях исключительной срочности: при возникновении краткосрочных конфликтных ситуаций (когда времени до нарушения установленных минимальных значений эшелонирования остается меньше чем 80–120 секунд), в сложных метеорологических условиях, возникновении непредвиденных или чрезвычайных ситуаций в полете и др. Рассмотрен способ оптимизации процесса непосредственного управления воздушным движением в автоматизированной системе применением доступных в настоящее время визуально-когнитивных инструментов взаимодействия пользователя с цветографическим интерфейсом информационной среды. В определенном смысле можно говорить о разработке когнитивной системы поддержки принятия рациональных решений по выявлению потенциально конфликтных ситуаций и парирования подобных ситуаций невыявленного типа. Разработка средств поддержки принятия решений рациональной направленности требует анализа деятельности лица, принимающего решения, с учетом его личностного фактора, при котором целесообразна совместная экспликация личностного фактора с информационным обеспечением. В связи с чем, выделяется направление разработки информационного обеспечения с применением цветографического сопровождения меток и формуляров воздушных судов, когда происходит сокращение представления информации до минимально необходимой и достаточной для принятия решения на рациональной основе. Представлены результаты применения разработанных визуально-когнитивных решений в испытательной группе из числа диспетчерского состава производственных коллективов районно-диспетчерского центра предприятия по аэронавигационному обслуживанию воздушного движения.

**Ключевые слова:** управление воздушным движением, интерфейс информационной среды, поддержка принятия решения, цветографическое решение.

### ВВЕДЕНИЕ

Необходимость развития компонентов процесса непосредственного управления воздушным движением (УВД) в автоматизированных системах вызвана поддержанием показателей их эффективного функционирования в условиях неугасающей потребности в использовании воздушного пространства при ограничениях по объему и качеству производства аэронавигационных услуг, а также многообразия оперативных ситуаций в полете, требующих максимального использования комплекса имеющихся ресурсов. Также немаловажным является и получение гарантий по обеспечению должного уровня безопасности полетов в периоды отклонения состояния системы организации воздушного движения от планируемого или функционирования с предельно допустимыми показателями.

Такие условия определяют параметры информационной среды, представляющей сведения для лица, принимающего решения (ЛПР) – диспетчера УВД, возможности которого, в свою очередь, обусловлены имеющимися средствами технико-методологического инструментария.

Аудиовизуальные средства автоматизированной системы управления воздушным движением (АС УВД) являются основным инструментом подготовки и реализации решений по обеспечению установленного уровня безопасного воздушного движения. При этом следует учитывать субъективный характер когнитивных составляющих функционирования каждого Специалиста, обуславливающий реализацию профессиональных компетенций к исполнению своих функций в многофакторной динамической среде.

Под когнитивными составляющими функционирования подразумеваются компоненты системы познавательной деятельности индивидуума [1] в процессе интеллектуального труда, каким является ОВД. Другими словами, в рамках интеллектуального тренда М. Мерло-Понти: «...именно сам организм – в соответствии с собственной природой своих рецепторов, порогами восприятия своих нервных центров и движениями органов – отбирает те стимулы в физическом мире, к которым он будет чувствителен».

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время приобретают актуальность вопросы оперативного анализа большого объема динамически изменяющихся параметров всего комплекса исследуемых объектов [2]. Поэтому этапу совершенствования когнитивных составляющих процесса принятия решения при обслуживании воздушного движения в АС УВД уделяется достаточно внимания как их разработчиками, так и специалистами авиационных предприятий.

Так, к примеру, практика наблюдения за взаимодействием диспетчера районно-диспетчерского центра с информационной средой интерфейса средств наблюдения за ДВО (далее – Информационная среда) в типовой АС УВД выявляет в интерфейсе следующее:

- наличие нагромождения формуляров ВС в часы высокой интенсивности воздушного движения, что сопровождается наложением цифр и букв, затрудняющим быстрое действие и корректность восприятия ДВО. В связи с чем появляется необходимость постоянного перемещения формуляров с целью организации их удобного визуального расположения;

- наличие нагромождения визуальной информации о деятельности государственных ведомств, осуществляющих использование воздушного пространства, что влечет нарушение качества восприятия ДВО;

- наличие не выявленных (не обнаруженных) диспетчером потенциально-конфликтных (ПКС) и конфликтных ситуаций (КС), в связи с наложением визуальной реализации одних функций на другие. Например, при изменении высоты полета воздушного судна, затрагивающего интересы смежных секторов (функционирующих на соседних высотах). А также наличием первого замечания;

- наличие не выявленных (не обнаруженных) диспетчером ПКС и КС в связи с нерациональным использованием возможностей визуальной информационной среды в современных условиях компьютеризации автоматизированных процессов и визуально-когнитивных методов овладения ситуативной осведомленностью;

- наличие неудобств, связанных с определением продольных интервалов с использованием одновременно нескольких векторов экстраполяции при потенциальном конфликте ВС попутного направления;

- избегание (либо же невозможность) использования дисплея среднесрочных потенциальных конфликтов в условиях высокой загруженности в связи с дефицитом времени на функциональные операции (особенно при наличии большого количества отметок о ПКС), а также в связи с энергоемкой операцией поиска конфликтующих воздушных судов в условиях, описанных первым замечанием;

- наличие весьма ограниченного функционала поддержки принятия оптимальных решений по устранению КС;

– некорректное применение иерархии плоскостей (перспективы) цветового пространства в функции выделения ВС одним цветом (желтым) при необходимости изменения высоты полета более чем на один эшелон. Что в условиях высокой интенсивности вызывает трудности восприятия ДВО.

Вышепредставленный перечень замечаний далеко не полон, однако в некоторой мере отражает причины поднимаемого в статье вопроса.

Использование принципов информационного дизайна, в частности инфографики [3], и сопутствующих средств в последние десятилетия во многих отраслях способствует повышению эффективности взаимодействия специалистов (пользователей) с информационной средой производственных и иных систем, обеспечивая поддержку формирования иерархии восприятия по различным аспектам: актуальности, свойствам и характеру явлений, их применимости и другим, – и, как следствие, фокусированию имеющихся сил, внимания и мотивации специалиста (пользователя) на объекте управления с наиболее благоприятным исходом.

Так, в широком смысле стоит задача исследования целесообразности использования подобных принципов информационного дизайна в современном интерфейсе АС УВД. А именно конкретных цветографических решений, согласующихся с естественной визуальной составляющей познавательной деятельности, с целью повышения эффективности процесса принятия решений (ППР) по определению и возможному разрешению КС при ОВД, в частности в условиях повышенной рабочей нагрузки (высокая интенсивность, отклонения от запланированного потока по метеорологическим причинам, чрезвычайным или аварийным ситуациям и т. п.), а также парирования неясных и обнаружения невыявленных диспетчером конфликтных ситуаций.

Целесообразность следует рассматривать прежде всего с точки зрения отклика параметров функционирования диспетчера в качестве ЛПП на вводимые изменения [4], или, другими словами, оптимизации достижения целей УВД при исполнении своих должностных обязанностей. Критериями оптимальности в данном случае послужат сокращение времени запаздывания  $\tau_k$  и повышение правильности принимаемых решений при минимальных показателях психофизиологической нагрузки. Стоит отметить, что данные по этим критериям в конкретных условиях и закладывают основы для расчета нормативов пропускной способности определенных зон и секторов обслуживания воздушного движения [5]. Что, в свою очередь, во многом определяет воздушный поток.

Данная же статья рассматривает цветографическое решение, разработанное применительно к Информационной среде в целях создания необходимого когнитивно-методологического инструмента поддержки принятия оптимальных решений по выявлению КС и парирования невыявленных КС/ПКС, при котором отображению стандартных установленных эшелонов следования ВС вмещается определенное графическое и цветохроматическое сопровождение в конкретных условиях в заведомо известных целях [6].

## СОВРЕМЕННАЯ ПРАКТИКА УВД НА МАРШРУТЕ

Специфика деятельности ЛПП на маршруте (прерогатива районно-диспетчерского центра) имеет негласное аллегоричное правило, надежность которого проверена поколениями диспетчеров УВД: «один самолет – один эшелон». Данное правило-аллегория закладывает принцип расстановки приоритетов в методах создания установленных интервалов при УВД в районно-диспетчерском центре прежде всего для обеспечения надлежащего уровня безопасности полетов при высокой загруженности диспетчера (или же сложности ДВО). Что связано с формирующимся временным дефицитом и необходимостью рационального распределения усилий  $\Sigma W_E^k$  по выполнению надлежащих функциональных операций, в т. ч. и возможностью обладать наивысшей конгруэнтностью в ситуативной осведомленности, а также тенденцией к ее изменению со временем [7].

Поэтому успешный ЛПР следует принципу:  $\tau_k, \Sigma W_E^k \rightarrow \min$ .

Помимо прочего, необходимость в изменении эшелона также возникает при запросе со стороны экипажа ВС снижения/набора по широкому спектру обстоятельств в полете. Причем, подобный запрос вполне может иметь характер исключительной срочности при чрезвычайно высоком временном дефиците и психологической напряженности.

Так, при решении задачи изменения эшелона полета Специалист анализирует информационную среду на наличие следующих возможных ПКС:

- метки встречных и попутных ВС на пересекаемых эшелонах;
- метки встречных и попутных ВС на занимаемом эшелоне.

Возьмем типовую ситуацию (Задача 1), соответствующую работе секторов РДЦ. При запросе ВС, находящегося на 360 эшелоне, снижения до 340 диспетчеру необходимо проанализировать краткосрочные конфликты на 350 эшелоне при горизонтальном интервале 30 км<sup>1</sup> и краткосрочные, среднесрочные на 340-м при интервале 10 км (а также при возможности и долгосрочные). При запросе же 320 (Задача 2) соответственно увеличивается количество эшелонов для анализа: 350, 330 с интервалом 30 км, 340 – 10 км на краткосрочные и 320 на краткосрочные, среднесрочные и по возможности долгосрочные.

Причем в оформлении визуальной информационной среды существуют некоторые особенности (Задача 3). Метки ВС смежных секторов при вертикальном делении воздушного пространства исполнены темно-серым цветом и практически сливаются с серым фоном, что формирует дефицит восприятия и потенциальное образование невыявленных диспетчером конфликтных ситуаций. Так, при необходимости снижения/набора ВС на эшелон другой зоны ответственности велика вероятность пропуска конфликтующих ВС. Поэтому его пересечение/занятие помимо собственного анализа ДВО смежной зоны ответственности, как правило, сопровождается дополнительными согласованиями Специалистов смежных секторов возможности изменения высоты – анализа ДВО на кратко-, средне- и долгосрочные конфликты. При том данный пример является частным случаем принципиальной цветографической организации интерфейса.

Имеющиеся средства АС УВД предлагают к использованию цветовое выделение вовлеченных ВС одним цветом (однотонного цветового обозначения всех ВС от эшелона 360 до 320 – задача 2). Это сопровождается формированием в восприятии новой ДВО, притом не всегда в удачной когнитивной схеме. Имеющаяся функция PPD (potential problem display), практически неприемлема ввиду острого дефицита времени и переизбытка информации.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Группе диспетчеров (со стажем ОВД не менее 5 лет, 1, 2-го класса) предлагалось решить схожие задачи 1 и 2 для типовых ситуаций ДВО различной плотности ВД (8, 12, 16 ВС) на не-динамической имитационной модели средств наблюдения АС УВД при использовании цветографического решения – далее Решение (рис. 1, 2, 3 – пометка II) – и в его отсутствие (рис. 1, 2, 3 – пометка I). Также исследовалась задача анализа ДВО на наличие ПКС (задача 0) в динамической модели (рис. 1, 4), в которой метки двигались из точки А в В, из С в D.

Перед началом испытаний группа была ознакомлена с целью исследования и принципами использования Решения. Практика применения Решения у группы отсутствовала. Предварительно давалась возможность недолго ознакомиться с ситуацией. Затем предлагалось оценить воздушную обстановку на наличие ПКС (в среднем 3,3 ПКС на ситуацию) и зафиксировать их количество и время.

<sup>1</sup> AIP Republic of Belarus. ENR 1.6-1.1.2. The application of ATS surveillance service. 2017. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.ban.by/images/files/eAIP/12-2017/ENR/UM\\_ENR\\_1\\_6\\_en.pdf](http://www.ban.by/images/files/eAIP/12-2017/ENR/UM_ENR_1_6_en.pdf)

В задаче 0 предполагалось отсутствие изменения высоты полета ВС. В последующих заданиях имитировалось, что некоторое ВС запрашивает снижение (задача 1, 2), задание теста зафиксировать количество и время оставалось прежним.

В сравнении с эталонным количеством ПКС оценивалась правильность анализа в штрафных баллах. Пропуск одной ПКС расценивался как 1 штрафной балл, сверхколичество – как 0,25 балла за 1 сверх ПКС.

Идентичность сложности тестов обеспечивалась зеркальным отражением воздушной обстановки и изменением цифр обозначения меток и их высотного положения, что, по мнению эксперт-группы, устраняло узнаваемость и запоминание ситуаций.

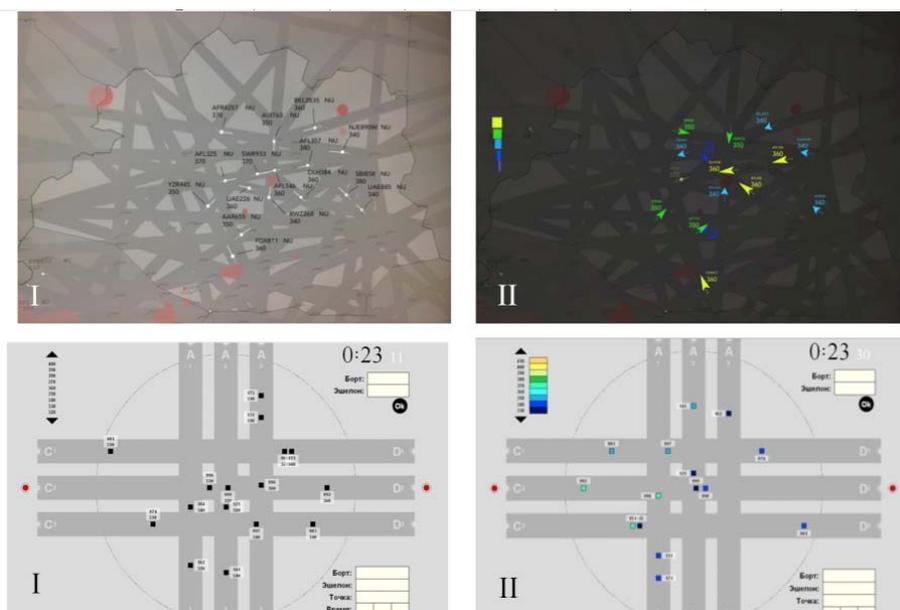


Рис. 1. Имитационные модели информационной среды средств наблюдения АС УВД – сверху нединамические, внизу – динамические

Fig. 1. Imitative models of information environment in ATC automated system – upper one is non-dynamic, lower – dynamic.

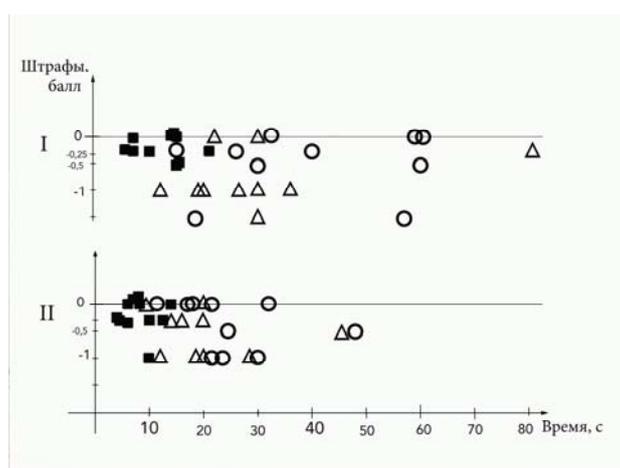


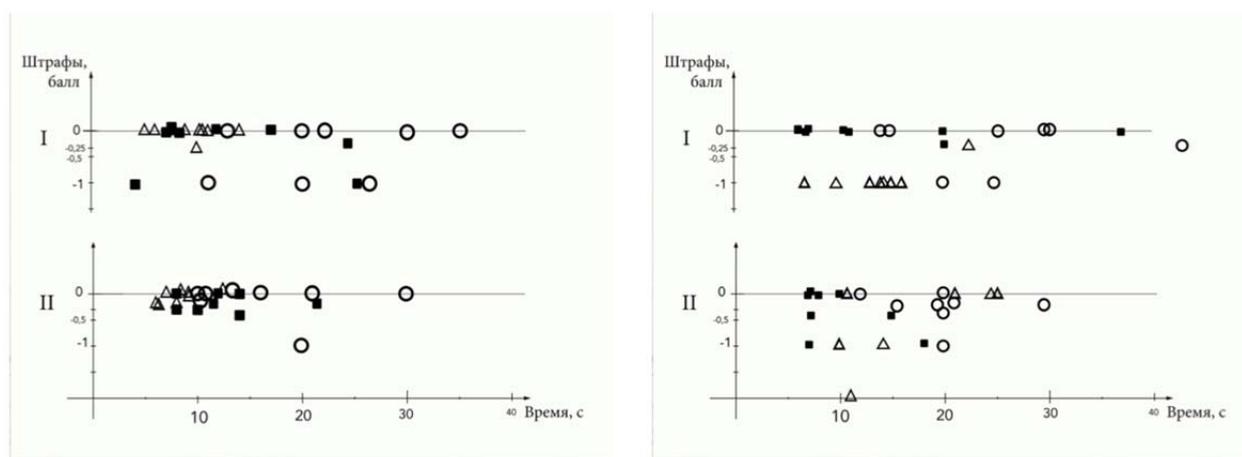
Рис. 2. График время/штрафы, задача 0, нединамическая модель (квадрат – при 8 ВС, треугольник – при 12 ВС, круг – при 16 ВС)

Fig. 2. Time/error diagram, task 0, non-dynamic model (square per 8 aircrafts, triangle per 12, circle per 16)

Представление данных нединамической (рис. 2, 3) и динамической модели (рис. 4) принципиально одинаковы. Однако график нединамического варианта отображает в плоскости

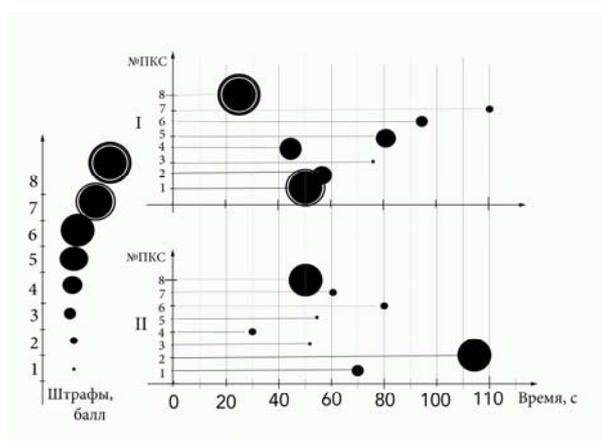
«штрафы/время решения задач» персональные данные каждого участника при различном количестве ВС – 8, 12, 16. Тогда как график динамического варианта представляет коллективные данные исследования решения задачи 0 при одновременном количестве меток ВС равном 15 по восьми отдельным ПКС (рис. 4), несколько из которых возникают в разное время. Здесь «время решения задачи» – это среднее время обнаружения отдельного ПКС группой (от момента представления ДВО с 15 метками и 5 ПКС, а также появления последующих меток – 3 ПКС, до записи номера ПКС-меток и времени обнаружения), а штрафы начисляются за каждый пропуск этой ПКС одним из участников и суммируются для группы.

Как можно заметить, полученные результаты для Решения (II) имеют общую тенденцию к сокращению времени на оценку количества ПКС при довольно высоких показателях правильности, по крайней мере не худших существующего решения (I) и в некоторых моментах даже лучших, с учетом отсутствия опыта работы в данном цветографическом решении.



**Рис. 3.** График время/штрафы в задаче определения количества ПКС при снижении на два эшелона – слева – задача 1, на четыре эшелона – справа – задача 2 (квадрат – при 8 ВС, треугольник – при 12, круг – при 16)

**Fig. 3.** Time/error diagram in the task of "how many" potential conflicts in aircraft descend by two flight levels – left picture – task 1, descend by four flight levels – right one – task 2 (square per 8 aircrafts, triangle per 12, circle per 16)



**Рис. 4.** График коллективное время/штрафы, задача 0, динамическая модель, 15 ВС  
**Fig. 4.** Team time/error diagram, task 0, dynamic model, 15 aircraft

Справедливо, что бóльшая достоверность результата достигается проведением бóльшего количество испытаний. При этом необходимым является также и соблюдение достаточной идентичности проводимых экспериментов. Идентичность предполагает неизменность условий

испытания. В нашем случае это практически осуществимо только при проведении исследования с интервалами времени, обеспечивающими полное забывание предлагаемых схем у испытуемых, а также наличие моделей оценки идентичности откликов на ту или иную визуальную схему. Также замечено, что в разные периоды времени (интервал в один месяц) диспетчеры выбирают разные стратегии (или, вернее, техники) ППР: увеличения времени оценки и анализа для достижения более высокой правильности либо же конкурентную –  $\Sigma W_E^k \rightarrow \max, \tau_k \rightarrow \max \min$  – борьбу за лидерство, с накоплением штрафов.

Так, прибегая к представленной в [4] мере характеристики понятия информационного обеспечения ППР через компонент-вектор характеристик личностного фактора  $V_k^{(S_t)}$ , а также используя при ограничениях по количеству испытаний инструменты теории возможностей [8, 9], где надежность сложных систем оценивается возможностью безошибочности работы –  $\Pi_{\text{прав}} \in [N, 1] | N = 1 - Q$  – и необходимостью правильности ППР –  $N$ , выражаемую через  $Q$ , – возможность появления ошибки, в нашем случае соответствующей мере штрафа, можно представить результат отклика диспетчера на вводимые в первоначальной стадии исследования целесообразности применения цветowych Решений в информационной среде в виде неравенства

$$\frac{(II)V_k^{(S_t)}}{(I)V_k^{(S_t)}} = \frac{(\Pi_{\text{прав}})[\tau_k, \Sigma W_E^k][y_k]^{II}}{(\Pi_{\text{прав}})[\tau_k, \Sigma W_E^k][y_k]^I} \gtrsim 1. \quad (1)$$

Также в ходе проведения эксперимента диспетчеры неоднократно отмечали визуальное уменьшение количества меток цветографического решения. Это свидетельствует о сокращении усилий, требуемых для восприятия –  $W_{\text{воспр}}^k$ , являющихся частью общих усилий по выполнению функциональных операций. Проведение дополнительного эксперимента по подсчету количества меток ВС на каждом эшелоне (21 метка, 5 эшелонов) показывает абсолютное превосходство по правильности и почти двукратное временное превосходство.

Принимая мотивацию  $u_k$  для двух вариантов одинаковой, неравенство (1) с высокой степенью уверенности может считаться правильным. Притом Решение практически устраняет ограничения, накладываемые в ППР задачей 3.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Безусловно, разработке визуально-когнитивных решений информационной среды средств наблюдения ДВО следует уделять внимание разработчикам автоматизированных систем с акцентом на то, что по сути в настоящее время АС УВД содержат в себе колоссальный потенциал развития человеко-машинного взаимодействия.

Целевая установка модернизации современной системы УВД направлена на достижение наивысшей точки оптимальности протекающих в ней процессов, что откликается в эффективности функционирования всей системы ОрВД. Эффективность в данном контексте понимается как результативность деятельности, которая характеризуется достижением наибольшего качества услуг с оптимальным применением комплекса имеющихся ресурсов, в частности когнитивных и психофизиологических, как фундамента профессионального долголетия специалистов, так и безопасных, экономичных и регулярных воздушных перевозок.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Князева Е.Н. Когнитивная сложность // Философия науки и техники. 2013. Т. 18, № 1. С. 81–94.
2. Цаплин В.В., Горохов В.Л., Витковский В.В. Когнитивные технологии визуализации многомерных данных для интеллектуальной поддержки принятия решений // Программные продукты и системы. 2014. № 3(107). С. 22–25.

3. Никулова Г.А., Подобных А.В. Средства визуальной коммуникации – инфографика и метадизайн // Образовательные технологии и общество. 2010. Т. 13, № 2. С. 369–387.
4. Крыжановский Г.А. Оптимизация процессов принятия решений в системе УВД // Межвузовский сборник научных трудов. Л., 1982. С. 131–135.
5. Бутюгин М.А., Кузнецов В.Л. К оценке пропускной способности воздушной трассы с учетом ограничений на загрузку диспетчера // Научный Вестник МГТУ ГА. 2010. № 157. С. 113–117.
6. Пономарев К.Ю. Оценка влияния хроматизма на формирование первоначального образа динамической воздушной обстановки // Вестник СПбГУ ГА. 2017. № 1(14). С. 59–70.
7. Пономарев К.Ю. Человеческий фактор в организации воздушного движения // Вестник СПбГУ ГА. 2016. № 3 (12). С. 65–77.
8. Кузьминов А.Л., Уткин В.С., Кожевников А.В. Применение возможностей моделей для оценки безопасности грузоподъемных машин // Известия ТулГУ. Технические науки. 2009. № 2. С. 104–110.
9. Dubois, Didier, Prade, Henri. Possibility Theory: An Approach to Computerized Processing of Uncertainty. New York: Plenum Press, 1988, 263 p.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Крыжановский Георгий Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой организации и управления в транспортных системах СПбГУ ГА, [srbguga\\_22@mail.ru](mailto:srbguga_22@mail.ru).

**Пономарев Кирилл Юрьевич**, аспирант кафедры организации и управления в транспортных системах СПбГУ ГА, диспетчер УВД государственного предприятия «Белаэронавигация», [kirpon1@gmail.com](mailto:kirpon1@gmail.com).

**Тимошко Максим Викторович**, диспетчер УВД государственного предприятия «Белаэронавигация», [maxtimon@yandex.ru](mailto:maxtimon@yandex.ru).

### TO OPTIMIZATION OF AIR TRAFFIC CONTROL BY VISUAL-COGNITIVE COMPONENT DEVELOPMENT

**Georgy A. Kryzhanovskij<sup>1</sup>, Kiryl Yu. Ponomarev<sup>1,2</sup>, Maxim V. Timoshko<sup>2</sup>**  
<sup>1</sup>*Saint-Petersburg State University of Civil Aviation, Saint-Petersburg, Russia*  
<sup>2</sup>*Belaeronavigatsiya SOE, Minsk, Belarus*

### ABSTRACT

The article deals with the development of visual-cognitive component in interaction of the air traffic service specialist with the colour-graphic interface (of the information environment for monitoring the dynamic air situation) of a typical automated air traffic control system. Some weak points were found through monitoring of the air traffic controller interaction with information environment of interface. Elimination of the revealed drawbacks contributes to the most rational functional condition of air traffic control system. It becomes extremely important in high workload periods and especially in the situations of sharp urgency, e.g. in a short-term conflicts, in hazardous meteorological conditions, in unforeseen or emergency situations in flight etc. The way of optimization of the air traffic control in the automated system is examined by applying visually-cognitive aids (tools) of user interaction available nowadays with the colour-graphic interface of the information environment. In a sense, we can talk about developing a cognitive support system for making rational decisions to identify potentially conflict situations and to counteract latent type of such situations. The development of decision support tools of rational orientation requires an analysis of the activity of the decision-maker, taking into account his personal factor, where the joint explication of the personal factor with information provision is appropriate. In this connection, the key priority is the development of information provision with colour-chromatic supplement of labels and aircraft marks. It results in information reduction to the minimum necessary and sufficient for making a decision on a rational basis. Application effect of the developed visual-cognitive solutions in the real route air traffic controllers test group is presented.

**Key words:** air traffic control, information environment interface, decision-making support, colour-graphic solution.

## REFERENCES

1. **Knjazeva, E.N.** (2014). *Kognitivnaja slozhnost'* [Cognitive complexity]. *Filosofija nauki i tehniki* [Science and engineering philosophy], no. 1, vol. 18, pp. 81–94. (in Russian)
2. **Caplin, V.V., Gorohov, V.L. and Vitkovskij, V.V.** (2014). *Kognitivnye tehnologii vizualizacii mnogomernyh dannyh dlja intellektual'noj podderzhki prinjatija reshenij* [Cognitive technologies in multidimensional data visualization for intellectual decision making support]. *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems], no. 107(3), pp. 22–25. (in Russian)
3. **Nikulova, G.A. and Podobnyh, A.V.** (2010). *Sredstva vizual'noj kommunikacii – infografika i metadizajn* [Visual communication means – infographics and metadesign]. *Obrazovatel'nye tehnologii i obshchestvo* [Education technologies and society], vol. 13, no. 2, pp. 369–387. (in Russian)
4. **Kryzhanovskij, G.A.** (1982). *Optimizacija processov prinjatija reshenij v sisteme UVD* [Decision making process optimization in ATC system]. *Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov, Leningrad* [Interacademic collection of scientific works, Leningrad], pp. 131–135. (in Russian)
5. **Butjugin, M.A. and Kuznecov, V.L.** (2010). *K ocenke propusknoj sposobnosti vozduшной trassy s uchetom ogranichenij na zagruzku dispetchera* [To air-route capacity assessment in the ATCo's workload restrictions context]. *The Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*, no. 157, pp. 113–117. (in Russian)
6. **Ponomarev, K.Yu.** (2017). *Otsenka vliyaniya khromatizma na formirovanie pervonachal'nogo obraza dinamicheskoi vozduшной obstanovki* [Chromatism impact assessment on a primary dynamic air situation image]. *Vestnik SPbGUGA* [Bulletin of the SPBGUGA], no. 14(1), pp. 59–70. (in Russian)
7. **Ponomarev, K.Yu.** (2016). *Chelovecheskii faktor v organizatsii vozdušnogo dvizheniya* [Human handicap in ATC]. *Vestnik SPbGUGA* [Bulletin of the SPBGUGA], no. 12(3), pp. 65–77. (in Russian)
8. **Kuz'minov, A.L., Utkin, V.S. and Kozhevnikov, A.V.** (2009). *Primenenie vozmozhnostnyh modelej dlja ocenki bezopasnosti gruzopod'emnyh mashin* [Safety evaluation in lifting machine based on theory of possibility and modeling]. *Izvestija TulGU. Tehnicheskie nauki* [TulGU news. Engineering science], no. 2, pp. 104–110. (in Russian)
9. **Dubois, Didier and Prade, Henri.** (1988). *Possibility Theory: An Approach to Computerized Processing of Uncertainty*. New York: Plenum Press, 263 p.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Georgy A. Kryzhanovskij**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Civil Aviation Organization and Management in Transport Systems Chair, Saint-Petersburg State University of Civil Aviation, spbguga\_22@mail.ru.

**Kiryl Yu. Ponomarev**, Postgraduate Student of Civil Aviation Organization and Management in Transport Systems Chair, Saint-Petersburg State University of Civil Aviation, Air Traffic Controller of Belaeronavigatsiya SOE, Republic of Belarus, kirpon1@gmail.com.

**Maxim V. Timoshko**, Air Traffic Controller of Belaeronavigatsiya SOE, Republic of Belarus, maxtimon@yandex.ru.

Поступила в редакцию 27.12.2017  
Принята в печать 15.05.2018

Received 27.12.2017  
Accepted for publication 15.05.2018

УДК 658.71.08,519.87

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-25-36

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ ДОСМОТРА С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМЫ РЕГИСТРАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ГЛАЗ И МЕТОДОВ КЛАСТЕРНОГО И ДИСКРИМИНАНТНОГО АНАЛИЗА

Ан.К. ВОЛКОВ<sup>1</sup>, В.В. ИОНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева,  
г. Ульяновск, Россия

Профессиональная подготовка операторов рентгенотелевизионных интроскопов осуществляется с применением компьютерных тренажеров, которые имеют алгоритмы адаптивной подготовки. Данные алгоритмы в существующих тренажерах включают в себя механизмы обратной связи, на основе показателей обучаемости, в частности, таких как частота обнаружений опасных предметов, частота ложных тревог и время обнаружения. Дальнейшее повышение эффективности тренажерной подготовки операторов связано с интеграцией механизмов психофизиологического мониторинга их функционального состояния. Исходя из анализа особенностей профессиональной подготовки операторов рентгенотелевизионных интроскопов, связанных с формированием компетенций по зрительному поиску опасных предметов, наиболее перспективным является использование технология Eye tracking. Отечественные и зарубежные исследования особенностей движения глаз при решении профессиональных задач в процессе подготовки активно развиваются в различных областях деятельности. В отечественной практике отсутствуют исследования особенностей зрительного поиска в отличие от зарубежных исследований. Данная работа направлена на рассмотрение вопроса применения технологии Eye tracking в сфере подготовки операторов рентгенотелевизионных интроскопов. В результате экспериментальных исследований с использованием мобильного ай-трекера Sensomotoric Instruments Eye Tracking Glasses 2.0 были получены статистические данные параметров перемещения взгляда для двух групп испытуемых с различными уровнями подготовки. Применение методов кластерного и дискриминантного анализов позволило выделить общие классы данных параметров, а также получить функции дискриминации для каждой исследуемой группы. Теоретическая значимость исследований особенностей движения глаз операторов заключается в выявлении закономерностей зрительного поиска запрещенных предметов. Практическая значимость применения технологии Eye tracking и методов статистического анализа заключается в повышении достоверности оценки уровня сформированности компетенции по зрительному поиску операторов рентгенотелевизионных интроскопов, а также в возможности разработки систем контроля состояния операторов и оценки зрительной усталости.

**Ключевые слова:** оператор рентгенотелевизионного интроскопа, зрительный поиск, регистрация движения глаз, технология Eye tracking, профессиональная подготовка.

### ВВЕДЕНИЕ

Подготовка операторов рентгенотелевизионных интроскопов (РТИ) проводится с учетом рекомендаций Международной организации гражданской авиации (ИКАО)<sup>1</sup>. Основными этапами подготовки операторов являются начальная подготовка и обучение на рабочем месте. Начальная подготовка реализуется с применением специализированных компьютерных тренажеров. Одним из важных требований ИКАО к тренажерам подготовки операторов РТИ является возможность организации обучения в саморегулируемом темпе и адаптации подготовки к индивидуальным потребностям обучающегося путем регулирования уровней трудности и сосредоточивания внимания на конкретных областях, требующих развития<sup>2</sup>. На сегодняшний день компьютеризированная подготовка операторов осуществляется с применением следующих тренажеров: SIMFOX компании Renful Premier Technologies; Operator Training System компании Security Training International; X-rayTutor, разработанного Университетом Цюриха; «Студент»,

<sup>1</sup> Человеческий фактор в системе мер безопасности гражданской авиации. Дос 9808. 1-е изд. Монреаль: ИКАО, 2002. 120 с.

<sup>2</sup> Там же.

разработанного научно-учебным центром «АБИНТЕХ» [1]. Алгоритмы адаптивной подготовки в представленных тренажерах включают в себя механизмы обратной связи на основе показателей обучаемости, в частности таких, как частота обнаружений опасных предметов, частота ложных тревог и время обнаружения. По результатам тестового контроля на основе анализа показателей обучаемости опытные инструкторы определяют стратегию индивидуального обучения оператора.

Дальнейшее повышение эффективности тренажерной подготовки операторов связано с интеграцией механизмов психофизиологического мониторинга их функционального состояния. Практическая реализация данного вида контроля может осуществляться с применением следующих методов оценки психофизиологического состояния обучающегося [2]:

– методов контактного измерения электрических параметров кожи (электрокожное сопротивление, кожно-гальваническая реакция);

– метода анализа клавиатурного почерка;

– метода вариационной пульсометрии;

– метода электроокулографии;

– метода видеоокулографии.

Исходя из анализа особенностей профессиональной подготовки операторов РТИ, связанных с формированием компетенций по зрительному поиску опасных предметов, наиболее перспективным является использование метода видеоокулографии.

Метод видеоокулографии (технология Eye tracking) находит все большее применение в различных направлениях и исследованиях, касающихся профессиональной подготовки и деятельности операторов. Технология Eye tracking – это «метод определения координат взгляда: точки пересечения оптической оси глазного яблока и плоскости наблюдаемого объекта или экрана, на котором находится некий визуальный стимул» [3]. Наиболее общую информацию о движении глаз, используемую для исследования когнитивных процессов и задач, дают такие характеристики, как фиксации взгляда и саккады. Фиксациями взгляда считается набор соседних отсчетов, находящихся внутри пространства заданного диаметра (как правило, это круг), общей продолжительностью не меньше заданной [4]. Саккады – это «быстрые согласованные скачкообразные движения глаз между точками фиксации взгляда» [5]. Относительно процессов когнитивной обработки данных, короткие фиксации взгляда между саккадами большей частью связаны с поверхностной, автоматической обработкой зрительной информации, в то время как долгие сгруппированные фиксации взгляда связаны с более глубокой обработкой и анализом зрительной информации.

Исследования особенностей движения глаз при решении профессиональных задач в процессе подготовки активно развиваются в различных областях деятельности. При этом особый интерес представляет адаптация зарубежного опыта подготовки рентгенологов [6], касающегося исследований такого феномена, как «пропуски при продолжении поиска» (subsequent search issues, SSM), в целях повышения эффективности обучения операторов РТИ по выявлению опасных предметов. Феномен SSM характеризует преждевременное прекращение зрительного поиска аномалий рентгенологами после обнаружения первого целевого стимула, что влечет за собой пропуск последующих стимулов [7]. Применение технологии Eye tracking позволит решить задачу нейтрализации данного типа ошибок в процессе тренажерной подготовки операторов РТИ.

Ряд исследований [8, 9] касается использования систем регистрации движения глаз для оценки параметров зрительного восприятия и распределения внимания пилотов в ходе тренажерной подготовки при решении различных задач. Проблема распределения внимания операторов РТИ в процессе зрительного поиска опасных предметов требует решения в связи с отсутствием четко установленных правил взаимодействия с функциями улучшения изображений рентгеновской аппаратуры. Зарубежные исследования показали, что применение данных функ-

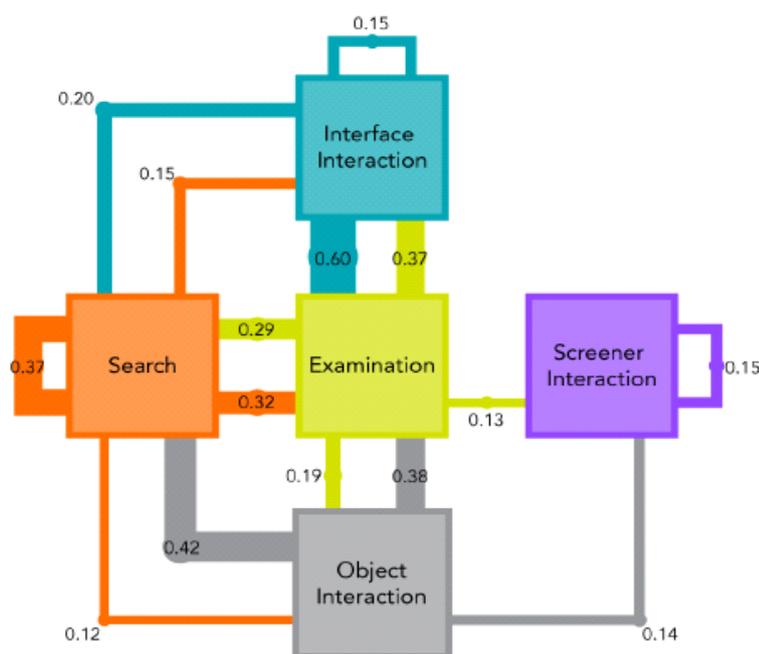


Рис. 1. Структура деятельности оператора досмотра [14]  
Fig. 1. Activity structure of security screeners [14]

ций не только не помогает обнаружению опасных предметов, но и в некоторых случаях даже ухудшает характеристики обнаружения [10].

Исходя из анализа результатов применения технологии Eye tracking в подготовке спортсменов, системы регистрации движений глаз могут выступать в качестве инструмента для решения таких задач, как [11, 12, 13]:

- формирование эффективных стратегий зрительного поиска;
- сравнение глазодвигательных паттернов обучающихся различных уровней подготовленности;
- реализация адаптивной подготовки, основанной на введении дополнительного контура

обратной связи по результатам глазодвигательной деятельности испытуемого.

В исследовании, касающемся деятельности операторов РТИ [14], анализировалась структура деятельности операторов непосредственно в процессе выполнения профессиональных задач. Одним из основных результатов явилось выявление видов деятельности операторов и их взаимодействия. Выделены такие виды деятельности, как зрительный поиск, экспертиза изображения, взаимодействие с интерфейсом оборудования, взаимодействие с другими сотрудниками досмотра, взаимодействие с объектом исследования (рис. 1). Представленная когнитивная модель позволяет анализировать последовательности выделенных видов деятельности, а также связи между ними.

Согласно рис. 1, экспертиза изображения переходит во взаимодействие с интерфейсом оборудования с частотой 0,37, в свою очередь, она переходит в экспертизу изображения с частотой 0,6. Этот тип перехода характеризует применение операторами функций улучшения изображения.

Таким образом, применение технологии Eye tracking при исследовании процессов зрительного поиска опасных предметов операторами РТИ открывает возможность для повышения уровня обеспечения авиационной безопасности [15]. Целью данной работы является исследование особенностей зрительного поиска запрещенных предметов операторами рентгенотелевизионных интроскопов с применением технологии Eye tracking.

### МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ЗРИТЕЛЬНОГО ПОИСКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ РЕГИСТРАЦИИ ДВИЖЕНИЯ ГЛАЗ

В целях оценки возможности применения метода видеоокулографии для оценки эффективности зрительного поиска операторами досмотра, были проведены экспериментальные исследования с использованием мобильного айтрекера Sensomotoric Instruments Eye Tracking Glasses 2.0 (ETG 2.0).

Регистрация наблюдений проводилась бинокулярно (отслеживалось движение обоих глаз) с автоматической компенсацией параллакса (что обеспечивает высокую точность при различных дистанциях от участника эксперимента до наблюдаемого объекта) с разрешением  $0,1^\circ$  и погрешностью  $0,5^\circ$ . Запись видео проводилась в формате H264/MPEG-4 с 30 кадрами в секунду и разрешением 1280 x 960 p (HD). Также проводилась запись звука через встроенный микрофон (для фиксации ответов испытуемых). Последующая обработка полученных данных проводилась с использованием программного обеспечения SMI BeGaze.

Участниками эксперимента были выбраны 66 курсантов очной формы обучения направления подготовки 25.03.03 Аэронавигация, профиля подготовки 9. Обеспечение авиационной безопасности ФГБОУ ВО «Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева».

Первоначально все курсанты прошли подготовку на тренажере «Студент». В процессе прохождения тестирования на тренажере испытуемым было рекомендовано использовать стратегию зрительного поиска, предложенную ИКАО. В качестве минимального порогового уровня компетентности было установлено относительное количество обнаруженных запрещенных предметов, равное 80 %. По результатам итогового тестирования 32 курсанта преодолели установленный пороговый уровень компетентности. Затем данной группе испытуемых было присвоено кодовое значение 1, а остальной группе испытуемых – 0.

Для проведения исследований с использованием айтрекера ETG 2.0 был сформирован банк тестовых заданий, содержащий 10 изображений запрещенных предметов (5 изображений, содержащих самодельные взрывные устройства, и 5 изображений, содержащих огнестрельное оружие). Каждое изображение было разбито на так называемые области интересов (Area of Interest, AOI) в целях дальнейшей обработки данных с помощью программного обеспечения SMI BeGaze.

Перед началом каждого эксперимента проводилась калибровка взгляда испытуемого по трем точкам плоскости. Затем с экспозицией в 20 секунд испытуемым предъявлялся сформированный банк изображений рентгеновских снимков. Задачей испытуемых было найти опасный предмет и сказать об этом эксперту. В процессе обработки полученного видео время ответа испытуемого заносилось в учетную ведомость.

В качестве параметров движения взгляда были использованы следующие параметры:

- Entry time (время начала цикла) – средняя продолжительность от начала эксперимента до первой фиксации в выбранной AOI;
- Dwell time (среднее время удержания взгляда в выбранной AOI) – отношение суммы всех фиксаций и саккад к их общему количеству;
- Average fixation (средняя длительность фиксации) – средняя длительность фиксации в выбранной AOI;
- First fixation (первая фиксация в выбранной AOI) – момент первой фиксации испытуемого на выбранной области;
- Intake и Saccade – это количество переводов взгляда в выбранную AOI и из нее соответственно;
- Blink (моргания) – количество морганий за время предъявления стимула (рентгеновского изображения).

В табл. 1 представлен фрагмент данных по одному из изображений, содержащих огнестрельное оружие, для первых десяти испытуемых из первой группы. В столбце Hit отмечено время обнаружения пистолета.

Таблица 1  
Table 1

Результаты исследования зрительного поиска  
The results of the study of visual search

Испытуемые	Параметры							
	Hit, с	Entry time, мЛс	Dwell time, мЛс	Average fixation, мЛс	First fixation, мЛс	Intake	Saccade	Blink
Курсант 1 (R1)	0	4625,4	3260,3	279,4	99,6	52	53	3
Курсант 2 (R2)	6	366,0	233,0	233,0	233,0	60	57	2
Курсант 3 (R3)	0	366,0	2761,8	347,0	299,5	66	64	1
Курсант 4 (R4)	7	865,4	2395,2	199,7	299,4	45	43	1
Курсант 5 (R5)	2	2362,5	1764,1	588,0	166,4	40	39	0
Курсант 6 (R6)	10	4691,8	3792,6	245,7	99,6	42	37	15
Курсант 7 (R7)	5	0,0	2262,8	290,0	100,0	47	46	0
Курсант 8 (R8)	0	299,6	1065,1	332,8	332,8	41	40	0
Курсант 9 (R9)	7	1331,0	3427,3	332,7	266,1	36	35	0
Курсант 10 (R10)	0	1397,7	3593,8	326,1	99,8	46	43	4

Для выявления информативных показателей глазодвигательной деятельности, которые выступают в роли предикторов, были использованы следующие статистические методы: кластерный и дискриминантный анализ [16]. Для выполнения данных анализов был использован программный пакет для статистического анализа Statistica 10. Перед началом проведения анализа все полученные статистические значения были стандартизированы. На рис. 2 представлен фрагмент таблицы стандартизированных данных в программе Statistica для первых 10 испытуемых.

	1 Entry	2 Dwell	3 Average	4 First	5 Intake	6 Saccade	7 Blink	8 Hit	9 Cod
R1	-0,5207	2,16789	-0,9645	-0,1673	1,84669	2,074	1,11939	-0,8053	0
R2	0,51005	-1,3251	-1,1197	-0,1899	0,71896	0,69221	0,14085	-0,8053	0
R3	-0,0756	0,1662	-0,9519	-0,1808	0,45872	0,34676	0,14085	2,29518	0
R4	-0,3567	-0,4445	-0,8146	-0,1808	0,54546	0,60584	0,14085	-0,8053	0
R5	1,47049	-1,5234	-1,0395	-0,1899	0,19847	0,26039	-0,3484	0,74493	0
R6	-0,5207	-1,2394	-1,39	-0,1402	0,28522	0,17403	1,11939	-0,8053	0
R7	-0,3097	-0,0612	0,62751	-0,1899	1,93344	1,98764	-0,8377	0,302	0
R8	0,04166	-1,0975	0,26539	-0,1854	1,75994	1,72855	0,14085	-0,8053	0
R9	-0,3805	1,28757	0,7901	-0,1538	1,06595	1,12402	-0,8377	-0,8053	0
R10	-0,4036	-0,0752	-0,3132	-0,1718	0,80571	0,86493	1,60866	-0,8053	0

Рис. 2. Фрагмент таблицы стандартизированных данных  
Fig. 2. The fragment of the table of standardized data

Кластерный анализ проводился иерархическим методом, в частности методом Варда. В результате данного анализа получена дендограмма, из которой вся совокупность исходных переменных была разделена на пять классов (рис. 3).

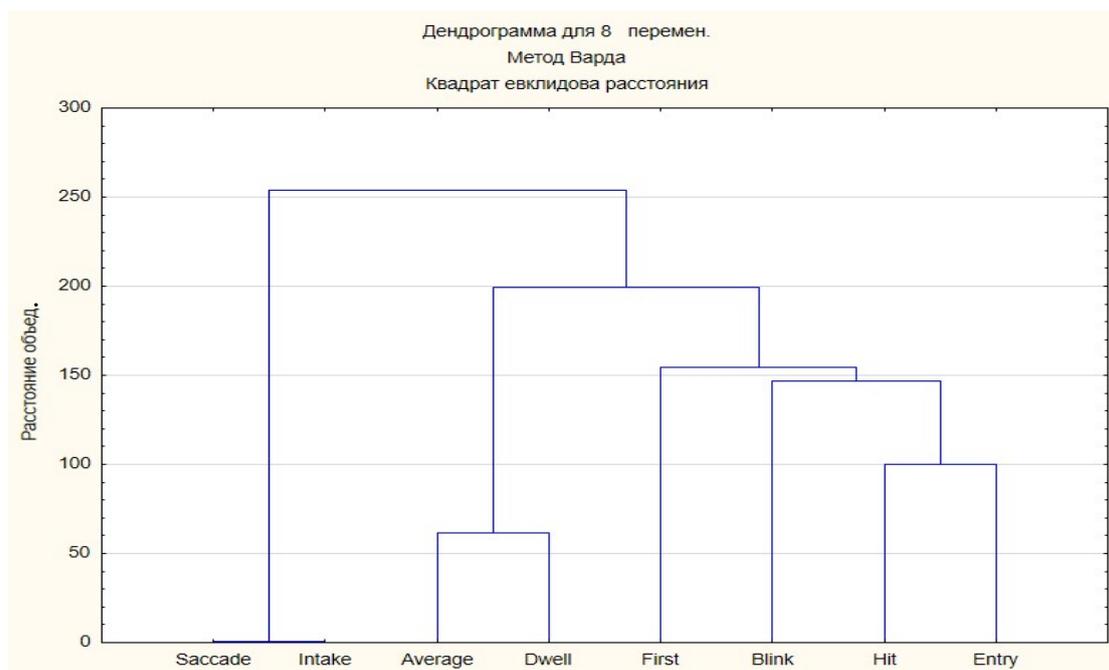


Рис. 3. Дендрограмма исходных переменных  
Fig. 3. The dendrogram of the original variables

Анализ дендрограммы показывает, что в первый класс вошли Saccade и Intake, во второй – Average fixation и Dwell time, в третий – First fixation, в четвертый – Blink и в пятый класс вошли Hit и Entry time.

Для проверки правильности разбиения исходных переменных на пять классов был использован метод *k*-средних. Полученные значения кластеризации методом *k*-средних представлены на рис. 4.

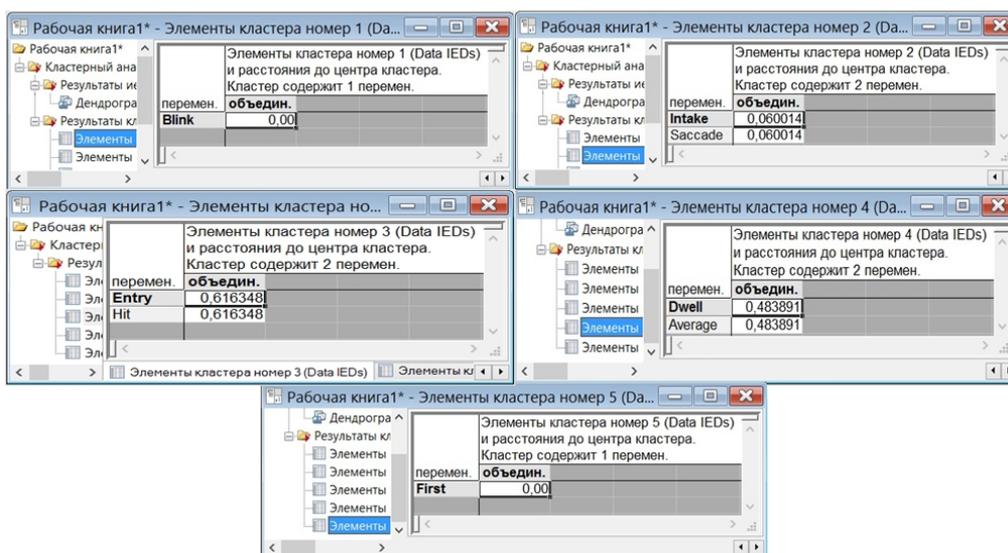


Рис. 4. Результаты классификации методом *k*-средних  
Fig. 4. The results of the classification by *k*-means method

Результаты проведенного анализа данных иерархическим методом (метод Варда) и итерационным методом (метод *k*-средних) дали одинаковый результат, что говорит о правильности проведенной классификации.

Для изучения различия между двумя и более группами объектов одновременно по нескольким переменным используется дискриминантный анализ, который является разделом многомерного статистического анализа [17]. В качестве группирующей переменной был выбран параметр Cod, который характеризует отнесение исследуемого объекта либо к первой группе (Cod – 0), либо ко второй группе (Cod – 1).

Результаты декрементного анализа приведены на рис. 5, 6, 7.

Представленная на рис. 5 матрица классификации показывает, что процент правильной классификации для первой группы составляет 88,23 %, а для второй группы – 84,37 %. При этом в первой группе ошибочно классифицируемых четыре курсанта, а во второй пять курсантов.

На рис. 6 представлен фрагмент таблицы апостериорных вероятностей. Результаты проведенного анализа позволяют сделать вывод о правильности классификации. В случае неправильной классификации результаты отмечаются (\*). Данная выборка может использоваться в качестве обучающей.

Коэффициенты дискриминантной функции для каждой группы представлены на рис. 7.

Группа	Процент правиль.	G_1:0	G_2:1
G_1:0	88,23529	30	4
G_2:1	84,37500	5	27
Всего	86,36364	35	31

Рис. 5. Матрица классификации  
Fig. 5. Classification matrix

Наблюдение	Класс.	G_1:0	G_2:1
R1	G_1:0	0,997911	0,002089
R2	G_1:0	0,949726	0,050274
*R3	G_1:0	0,378413	0,621587
R4	G_1:0	0,879147	0,120853
R5	G_1:0	0,926592	0,073408
R6	G_1:0	0,787464	0,212536
R7	G_1:0	0,972174	0,027826
R8	G_1:0	0,991109	0,008891
R9	G_1:0	0,780177	0,219823
R10	G_1:0	0,983007	0,016993
R11	G_1:0	0,866713	0,133287
*R12	G_1:0	0,236908	0,763092
R13	G_1:0	0,995968	0,004032
R14	G_1:0	0,646903	0,353097
*R15	G_1:0	0,324118	0,675882
R16	G_1:0	0,906015	0,093985

Рис. 6. Апостериорные вероятности  
Fig. 6. Posterior probability

Переменная	Функции классификации; группировка: Cod (Data IEDs)	
	G_1:0 p=,51515	G_2:1 p=,48485
Entry	0,49790	-0,52902
Dwell	-0,21225	0,22551
Average	-0,00081	0,00086
First	0,29582	-0,31431
Intake	-2,86479	3,04384
Saccade	3,97950	-4,22822
Blink	0,55816	-0,59304
Hit	-0,13891	0,14759
Конст-та	-1,14394	-1,26653

Рис. 7. Функции классификации  
Fig. 7. The classification functions

Результаты дискриминантного анализа показывают, что четыре испытуемых первой группы и пять испытуемых второй группы были ошибочно классифицированы. Несмотря на то, что данные четыре испытуемых первоначально не справились с пороговым уровнем компетенции, они могут быть в дальнейшем выделены в отдельную группу для формирования индивидуального плана подготовки, так как параметры их глазодвигательной деятельности близки к параметрам исследуемых из более подготовленной группы. Для 5 испытуемых из второй группы можно сделать вывод, что по параметрам их глазодвигательной деятельности они не относятся ко второй группе, хотя и преодолели пороговый уровень. То есть это может говорить о том, что во многом компетенция по зрительному поиску опасных предметов данных испытуемых сформировалась не в полной мере.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследована возможность применения системы регистрации движения глаз и методов многомерной статистики в процессе профессиональной подготовки операторов РТИ.

Показано, что применение методов статистического анализа позволит повысить достоверность классификации сформированности компетенций по зрительному поиску опасных предметов.

В дальнейшем в целях разработки методики подготовки операторов РТИ с применением технологии Eye Tracking необходимо увеличение выборки испытуемых для снижения погрешности измерений.

В качестве общих выводов можно отметить следующее.

1. Интеграция механизмов мониторинга психофизиологического состояния операторов в процесс тренажерной подготовки позволит формировать комплексное заключение о степени выработанности их профессиональных компетенций и готовности к реальной практической деятельности. Результаты данного мониторинга могут использоваться для совершенствования выбора стратегии подготовки оператора на основе не только показателей обучаемости, но и с использованием так называемой психофизиологической «цены» деятельности испытуемого.

2. Введение в алгоритмы адаптивной подготовки дополнительного контура обратной связи, основанного на применении систем регистрации движения глаз, позволит инструкторам отслеживать и своевременно корректировать деятельность обучаемого оператора в реальном режиме времени.

3. Применение методов кластерного и дискриминантного анализа позволит создать системы поддержки принятия решений руководителей по подбору и обучению специалистов для работы в службе авиационной безопасности.

Исследования особенностей движения глаз операторов РТИ представляют интерес не только в теоретическом плане – для понимания закономерностей зрительного поиска запрещенных предметов, но также имеют широкое практическое применение, в первую очередь для разработки систем контроля состояния операторов и оценки зрительной усталости.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Волков А.К.** Применение математического моделирования состояний компетенций операторов досмотра в процессе адаптивного управления их подготовкой на компьютерном тренажере // Научный вестник УВАУ ГА (И). 2015. № 7. С. 60–64.
2. **Юрков Н.К.** Интеллектуальные компьютерные обучающие системы: монография. Пенза: ПГУ, 2010. 304 с.
3. **Барабанщиков В.А., Жегалло А.В.** Айтрекинг. Методы регистрации движения глаз в психологических исследованиях и практике. М.: Когито-Центр, 2014. 128 с.
4. **Демидов А.А., Жегалло А.В.** Оборудование SMI для регистрации движений глаз: тест-драйв // Экспериментальная психология. 2008. Т. 1, № 1. С. 149–159.
5. **Poole A., Ball L. J.** Eye tracking in human-computer interaction and usability research: current status and future prospects // Encyclopedia of human-computer interaction. 2006. Pp. 221–219.
6. **Wood G.** Visual expertise in detecting and diagnosing skeletal fractures / K.M. Knapp, B. Rock, C. Cousens, C. Roobottom, M.R. Wilson // Skeletal Radiology. 2013. Vol. 42(2). Pp. 165–172.
7. **Cain M.S., Adamo S.H., Mitroff S.R.** A taxonomy of errors in multiple-target visual search // Visual cognition. 2013. Vol. 21(7). Pp. 899–921.
8. **Vrzakova H., Bednarik R.** Hard lessons learned: mobile eye-tracking in cockpits // Proceedings of 4-th Workshop on eye gaze in intelligent human machine interaction. 2012. Vol. 7. Pp. 130–136.
9. **Weibel N.** Let's look at the cockpit: exploring mobile eye-tracking for observational research on the flight deck / A. Fouse, C. Emmenegger, S. Kimmich, E. Hutchins // Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications. 2012. Pp. 107–114.
10. **Stefan M., Schwaninger A.** Human-machine interaction in x-ray screening // Proceedings of the Carnahan Conference on Security Technology. 2007. Vol. 41. Pp. 13–19.
11. **Menshikova G.Ya.** Testing the vestibular function development in junior figure skaters using the eye tracking technique / A.I. Kovalev, O.A. Klimova, A.M. Chernorizov, S.V. Leonov // Procedia, social and behavioral sciences. 2014. Vol. 146. Pp. 252–258.
12. **Timmis M.A., Turner K., van Paridon K.N.** Visual Search Strategies of Soccer Players Executing a Power vs. Placement Penalty Kick // PLoS ONE. 2014. Vol. 9(12). Pp. 1–16.
13. **Hancock D.J., Ste-Marie D.M.** Gaze behaviors and decision making accuracy of higher- and lower-level referees // Psychology of Sport and Exercise. 2013. Vol. 14. Pp. 66–71.
14. **Swann, Levi, Popovic, Vesna, Blackler, Alethea L., Kraal, Ben J.** Airport security screeners expertise and implications for interface design. In Design Research Society Conference, 2014. Pp. 16–19.
15. **Волков А.К.** Применение системы регистрации движения глаз для оценки окуломоторных параметров зрительного поиска опасных предметов операторами досмотра // Транспорт России: проблемы и перспективы – 2017: материалы международной научно-практической конференции, 14–15 ноября 2017 г. СПб.: ИПТ РАН, 2017. С. 359–363.

16. Капитанчук В.В., Лушина А.Д. Применение кластерного и дискриминантного анализа при организации подбора сотрудников службы авиационной безопасности // Научный вестник УИ ГА. 2016. № 8. С. 42–46.

17. Капитанчук В.В. Исследование состояния авиационной безопасности методами кластерного анализа / В.М. Ильин, С.В. Курамшин, М.Р. Махмутов // Научный вестник УИ ГА. 2017. № 9. С. 153–159.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Волков Андрей Константинович**, аспирант Ульяновского института гражданской авиации, oabuvauga@mail.ru.

**Ионов Владимир Васильевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент Ульяновского института гражданской авиации, iovlad@mail.ru.

## THE IMPROVEMENT OF PROFESSIONAL TRAINING ORGANIZATION OF THE X-RAY SCREENING SYSTEMS OPERATORS BY USING THE EYE MOVEMENTS REGISTRATION SYSTEM AND METHODS OF CLUSTER AND DISCRIMINANT ANALYSIS

**Andrei K. Volkov<sup>1</sup>, Vladimir V. Ionov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia*

### ABSTRACT

The X-ray screening systems operators' professional training is based on the CBT (computer-based training) principle, which has algorithms of adaptive training. These algorithms in existing computer simulators include feedback mechanisms on the basis of trainability exponents – such as the frequency of detecting dangerous objects, the frequency of false alarms and detection time. Further enhancement of the operators' simulator training effectiveness is associated with the integration of psychophysiological mechanisms providing monitoring of their functional state. Based on the analysis of the particularities of x-ray screening systems operators' professional training associated with the formation of competences in dangerous objects visual search, the most perspective method is the Eye tracking technology. Domestic and foreign studies of the eye movements characteristics while solving professional tasks in training process are actively developed in various areas. There are no studies of visual search peculiarities in domestic practice in contrast to exterior studies. This research is aimed at considering the usage of Eye tracking technology in the training of x-ray screening systems operators. As the result of the experimental research with the use of mobile eye-tracker Sensoric Instruments Eye Tracking Glasses 2.0 the statistical data of eye movement parameters of two groups of subjects with different levels of training have been received. The application of cluster and discriminant analyses methods allowed to identify General classes of these parameters, as well as to obtain the discriminants functions for each group under examination. The theoretical significance of the peculiarities of the operators' eye movement studies is to identify the patterns of prohibited items visual search. The practical importance of implementation of Eye tracking technology and statistical analysis methods is to increase the reliability of assessment the level of formed competence of x-ray screening systems' operators in visual search, as well as to develop the potential system of operators' state monitoring and assessing their visual fatigue.

**Key words:** x-ray screening systems' operator, visual search, the registration of eye movements, Eye tracking technology, professional training.

### REFERENCES

1. **Volkov, A.K.** (2015). *Primenenie matematicheskogo modelirovaniya sostojanij kompetencij operatorov dosmotra v processe adaptivnogo upravlenija ih podgotovkoj na komp'juternom trenazhere* [Application of screeners' expertise states mathematical modeling in adaptive management

of their computer simulator training]. *Nauchnyj vestnik UVAU GA (I)* [Scientific Bulletin of the UVAU GA (I)], no. 7, pp. 60–64. (in Russian)

2. **Jurkov, N.K.** (2010). *Intellektual'nye komp'yuternye obuchajushhie sistemy* [Intelligent computer training system]. Penza: Publ. PGU, 304 p. (in Russian)

3. **Barabanshnikov, V.A. and Zhegallo, A.V.** (2014). *Ajtreking. Metody registracii dvizhenija glaz v psihologicheskikh issledovanijah i praktike* [Methods of registration of eye movements in psychological research and practice]. Moscow: Kogito-Centr, 128 p. (in Russian)

4. **Demidov, A.A. and Zhegallo, A.V.** (2008). *Oborudovanie SMI dlja registracii dvizhenij glaz: test-drajv* [SMI machinery for the registration of eye movements: a test drive]. *Jeksperimental'naja psihologija* [Experimental Psychology], vol. 1, no. 1, pp. 149–159. (in Russian)

5. **Poole, A. and Ball, L.J.** (2006). *Eye tracking in human-computer interaction and usability research: current status and future prospects*. Encyclopedia of human-computer interaction, pp. 221–219.

6. **Wood, G., Knapp, K.M., Rock, B., Cousens, C., Roobottom, C. and Wilson, M.R.** (2013). *Visual expertise in detecting and diagnosing skeletal fractures*. *Skeletal Radiology*, vol. 2(42), pp. 165–172.

7. **Cain, M.S., Adamo, S.H. and Mitroff, S.R.** (2013). *A taxonomy of errors in multiple-target visual search*. *Visual cognition*, vol. 7(21), pp. 899–921.

8. **Vrzakova, H. and Bednarik, R.** (2012). *Hard lessons learned: mobile eye-tracking in cockpits*. Proceedings of 4-th Workshop on eye gaze in intelligent human machine interaction, vol. 7, pp. 130–136.

9. **Weibel, N., Fouse, A., Emmenegger, C., Kimmich, S. and Hutchins, E.** (2012). *Let's look at the cockpit: exploring mobile eye-tracking for observational research on the flight deck*. Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications, pp. 107–114.

10. **Stefan, M. and Schwaninger, A.** (2007). *Human-machine interaction in x-ray screening*. Proceedings of the Carnahan Conference on Security Technology, vol. 41, pp. 13–19.

11. **Menshikova, G.Ya., Kovalev, A.I., Klimova, O.A., Chernorizov, A.M. and Leonov, S.V.** (2014). *Testing the vestibular function development in junior figure skaters using the eye tracking technique*. *Procedia, social and behavioral sciences*, vol. 146, pp. 252–258.

12. **Timmis, M.A., Turner, K. and van Paridon, K.N.** (2014). *Visual Search Strategies of Soccer Players Executing a Power vs. Placement Penalty Kick*. *PLoS ONE*, vol. 12(9), pp. 1–16.

13. **Hancock, D.J. and Ste-Marie, D.M.** (2013). *Gaze behaviors and decision making accuracy of higher- and lower-level referees*. *Psychology of Sport and Exercise*, vol. 14, pp. 66–71.

14. **Swann, Levi, Popovic, Vesna, Blackler, Alethea L. and Kraal, Ben J.** (2014). *Airport security screeners expertise and implications for interface design*. In Design Research Society Conference, pp. 16–19.

15. **Volkov, A.K.** (2017). *Primenenie sistemy registracii dvizhenija glaz dlja ocenki okulomotornyh parametrov zritel'nogo poiska opasnyh predmetov operatorami dosmotra* [The application of the system of eye movements' registration to assess oculomotor parameters of visual search of dangerous items by aviation security screeners]. *Transport Rossii: problemi i perspektivy – 2017. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Transport of Russia: problems and prospects – 2017: materials of international scientific-practical conference], Saint Petersburg: Solomenko Institute of Transport Problems of the Russian Academy of Sciences (ITP RAS), pp. 359–363. (in Russian)

16. **Kapitanchuk, V.V., Lushina A.D.** (2016). *Primenenie klasterного i diskriminantного analizov pri organizacii podbora sotrudnikov sluzhby aviacionnoj bezopasnosti* [Cluster and discriminant analysis for aviation security staff recruitment]. *Nauchnyj vestnik UVAU GA (I)* [Scientific Bulletin of the UVAU GA (I)], no. 8, pp. 42–46. (in Russian)

17. **Капитанчук, V.V., П'ин V.M., Курамшин, S.V. and Махмутов, M.R.** (2017). *Issledovanie sostojanie aviacionnoj bezopasnosti metodami klasterного analiza* [Investigation of aviation security methods using of cluster analysis]. *Nauchnyj vestnik UVAU GA (I)* [Scientific Bulletin of the UVAU GA (I)], no. 9, pp. 153–159. (in Russian)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Andrei K. Volkov**, Postgraduate Student of Ulyanovsk Civil Aviation Institute, oabuvauga@mail.ru.

**Vladimir V. Ionov**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor at Ulyanovsk Civil Aviation Institute, iovlad@mail.ru.

Поступила в редакцию 05.02.2018  
Принята в печать 15.05.2018

Received 05.02.2018  
Accepted for publication 15.05.2018

УДК 621.396.98.004.1

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-37-46

## О ДВУХСОЗВЕЗДНЫХ GBAS

О.И. ЗАВАЛИШИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ООО «НППФ Спектр», г. Москва, Россия

Проблема точного навигационного обеспечения систем посадки приобретает большое значение в наше время в связи с постоянно повышающейся интенсивностью воздушного движения в основных аэропортах. В настоящее время наметилась тенденция к переходу к навигационным определениям воздушных судов по спутниковым радионавигационным системам. В настоящее время в полном объеме функционируют две глобальные навигационные спутниковые системы, составленные из навигационных космических аппаратов – российская система ГЛОНАСС и американская система GPS. При этом для обеспечения необходимой точности позиционирования и целостности данных используются дополнительные средства – дифференциальные поправки. В статье приведены доказательства повышения точности позиционирования с использованием системы GBAS. Показано, что позиционирование с использованием GBAS обеспечивает целостность данных, соответствующую категории «критических данных» по требованиям ИКАО. Приведены технические преимущества российской станции GBAS. Проведен сравнительный анализ GBAS и системы посадки ILS. В статье обоснована актуальность разработки многочастотных многосистемных наземных систем функционального дополнения. Для расчета характеристик непрерывности обслуживания системы GBAS использован метод оценки эффективности сложных технических систем. Приведены численные данные по вероятности решения навигационной задачи в дифференциальном режиме для штатного режима. Проведен расчет характеристик непрерывности обслуживания системы GBAS на основе метода оценки эффективности сложных технических систем. Обоснованы преимущества использования мобильной версии станции GBAS ЛККС-А-2000 для обеспечения для вертолетов инструментального захода на посадку на неподготовленных площадках. Приведен рисунок, демонстрирующий реализацию ошибок оценивания координат в дифференциальном режиме при решении навигационной задачи по 5 навигационным спутникам системы GPS. Приведен рисунок, демонстрирующий реализацию ошибок оценивания для той же записи при использовании всех видимых и навигационных спутников. Приведен рисунок, демонстрирующий число видимых навигационных спутников.

**Ключевые слова:** система GBAS, дифференциальные поправки, система функционального дополнения, сложная техническая система.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в полном объеме функционируют две глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), составленные из навигационных космических аппаратов (НКА) – российская система ГЛОНАСС и американская система GPS. Также после запуска четвертого навигационного спутника (НС) европейской системы Galileo в 2013 году началась тестовая фаза проекта. Китайская система COMPASS (Бэйдоу) с 27 февраля 2011 г. эксплуатируется как региональная. Основные характеристики указанных систем приведены в табл. 1.

Комбинированные многосистемные (ГЛОНАСС/GPS/Galileo) многочастотные навигационные приемники уже изготавливаются ведущими мировыми производителями: Topcon, Leica Geosystems, Javad, Trimble, NovAtel. Однако эти приемники пока не сертифицированы для применения на борту самолетов гражданской авиации.

Для обеспечения необходимой точности позиционирования и целостности данных (надежности обеспечения позиционирования) используются дополнительные средства – дифференциальные поправки.

Таблица 1  
Table 1

Основные характеристики спутниковых радионавигационных систем  
Main characteristics of satellite radio navigation systems

Система ГНСС (страна)	Система координат	Размещение НКА на орбите	Число НКА (резерв) в орбитальной группировке	Диапазоны (центральные частоты МГц)
ГЛОНАСС (РФ)	ПЗ-90.02	3 орбитальных плоскости с наклоном $64,8^\circ$	24 (3)	L1: 1602; L2: 1246; L3: 1202,025
GPS (США)	WGS 84	6 орбитальных плоскостей с наклоном $55^\circ$	24–32	L1: 1575,42; L2: 1227,60; L5: 1176,45
GALILEO (ЕС и ЕКА)	WGS 84	3 орбитальных плоскости с наклоном $56^\circ$	27 (3) (проектное)	E1: 1575,42; E5: 1176,45; E6: 1278,75
COMPASS (Бэйдоу) (Китай)	CGCS2000	5 геостационарных, 5 геосинхронных и 20 средневысотных НКА	30 (проектное)	B1: 1561,098; B2: 1191,795; B3: 1268,52

В настоящее время развиваются два подхода к обеспечению аэронавигационных средств дифференциальными поправками к сигналам GPS/ГЛОНАСС – спутниковые системы и локальные наземные станции.

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОДХОДОВ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ АЭРОНАВИГАЦИОННЫХ СРЕДСТВ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫМИ ПОПРАВКАМИ

Преимуществом спутниковых систем является отсутствие необходимости устанавливать какое-либо дополнительное оборудование в аэропорту. Дифференциальные поправки передаются геостационарными спутниками и принимаются бортовым аэронавигационным оборудованием. Сегодня действуют системы WAAS (Североамериканский регион), EGNOS (Европа) и MSAS (Япония), в процессе ввода в действие находится индийская система GAGAN.

Однако, помимо грандиозной стоимости создания этих систем (миллиарды долларов), длительного срока реализации и стоимости их сопровождения, спутниковые системы (далее – SBAS) имеют еще два ключевых недостатка:

а) SBAS покрывают ограниченные регионы, пусть даже и очень большие, как WAAS. В Южном полушарии воспользоваться ими невозможно;

б) Точность позиционирования с помощью SBAS принципиально ограничена.

Наземные станции дифференциальных поправок к сигналам GPS/ГЛОНАСС (GBAS) устанавливаются непосредственно на аэродромах или вертолетных площадках. Это относительный недостаток по сравнению с использованием SBAS, если не учитывать того, что стоимость американской спутниковой системы WAAS в два раза превосходит стоимость установки станций GBAS на всех аэродромах соответствующего региона. При этом возможности SBAS

ограничены категорией I ИКАО (и то достигнутой лишь в двух десятках аэропортов). Возможности позиционирования и точного захода на посадку с использованием GBAS уже сегодня не уступают SBAS, а по техническим характеристикам способны обеспечить посадку по категории II и даже по категории IIIc (видимость 0 x 0). Такие возможности обеспечиваются тем, что станции GBAS рассчитывают дифференциальные поправки к сигналам GPS/ГЛОНАСС непосредственно в месте посадки воздушного судна.

Позиционирование с использованием GBAS обеспечивает целостность данных  $10^{-8}$ , что соответствует категории «критических данных» по ИКАО, и благодаря этому использование GBAS делает возможным точный заход на посадку по приборам. Точность как горизонтального, так и вертикального позиционирования с использованием GBAS составляет менее 1 метра. Это делает возможным посадку по категории IIIc ИКАО. Сегодня нет аэродромов такой категории, потому что, даже осуществив посадку по категории IIIb при условиях видимости (0 м x 50 м) с использованием ILS, экипаж не сможет убрать воздушное судно с ВПП. Использование GBAS дает такую возможность.

Одна станция GBAS обслуживает все ВПП аэропорта (до 48 торцов одновременно), обеспечивает возможность инструментального захода на посадку по криволинейной траектории (которых может быть несколько) и не требует дополнительного пространства для размещения оборудования и строительных работ.

Станция GBAS может быть реализована в мобильной версии, развертываемой в течение 15 минут в любом месте, что делает ее применение особенно интересным для реализации инструментального захода вертолетов на необорудованные площадки.

На сегодняшний день существуют три производителя станций GBAS.

Корпорация Honeywell установила две станции в США – в аэропорту Мемфиса (инициатором была компания FedEx, для которой это аэропорт базирования) и в аэропорту Newark Liberty, где на одной из ВПП невозможно установить ILS из-за наличия по курсу посадки огромного моста, нарушающего работу радиотехнических систем ILS. Третья станция планируется к установке в аэропорту Ченнай (Индия).

Шесть станций GBAS, разработанных компанией Park Air Systems (филиал Northrop Grumman, купленный затем корпорацией Indra), установлены в северных аэропортах Норвегии, в которых по условиям рельефа невозможно установить ILS (в фиордах) и где требуется обеспечить инструментальный заход на посадку по погодным условиям.

Российская компания НППФ «Спектр» разработала, произвела и установила более 50 станций GBAS ЛККС-А-2000 в аэропортах России. Посадка с использованием GBAS уже возможна в аэропорту города Тюмени (Рощино), и в настоящее время Госкорпорация по организации воздушного движения РФ осуществляет проверку (облет) установленных станций для выдачи официального разрешения на их использование для инструментального захода на посадку.

Техническим преимуществом российской станции GBAS ЛККС-А-2000 является возможность использования для позиционирования двух спутниковых группировок – GPS и ГЛОНАСС. При этом могут быть использованы сигналы только GPS, или только ГЛОНАСС, или обеих систем одновременно, что повышает техническую надежность приема сигналов за счет двойного комплекта спутников и снижает возможные политические риски, связанные с использованием спутниковой навигационной системы, контролируемой Министерством обороны США.

В настоящее время инструментальный заход на посадку по категории II и III ИКАО разрешен только с использованием системы ILS. Однако документы, разрешающие и определяющие процедуру и параметры инструментального захода по GLS (т. е. с использованием GBAS), уже находятся в ИКАО в стадии завершения. Заход по GLS по категории I уже разрешен в настоящее время.

GBAS имеет значительные преимущества перед ILS [5].

1. GBAS обеспечивает более точное позиционирование, чем SBAS (до сантиметров).

2. GBAS значительно дешевле, чем ILS, не требует строительных работ и дополнительной территории, может быть установлен в аэропорту за один день.
3. GBAS обеспечивает возможность криволинейных заходов, что важно в случае сложного рельефа и/или жилой или иной застройки вблизи аэродрома.
5. Одна станция GBAS обслуживает все торцы всех ВПП аэропорта, и даже соседних аэропортов, в радиусе 50 км (до 48 торцов одновременно).
6. GBAS позволяет осуществлять посадку и руление в аэропорту в условиях даже полного отсутствия видимости.
7. Станция GBAS может быть развернута и приступить к работе в любом месте в течение нескольких часов, мобильная версия – в течение 15 минут.
8. Станция GBAS может быть свернута и законсервирована еще быстрее, чем установлена. Это важно при использовании в регионах, где имеют место неблагоприятные погодные условия (ураганы и т. п.).
9. GBAS дешевле в эксплуатации, чем ILS, поскольку не требует частых дорогостоящих проверок (облетов).

Использование мобильной версии станции GBAS ЛККС-А-2000 дает возможность обеспечить для вертолетов инструментальный заход на посадку на неподготовленных площадках. Единственным условием является ранее сделанный (в подходящих условиях) визуальный заход с записью трека, который затем будет использоваться как схема захода по GLS. Эта схема может быть заложена в базу данных бортового навигационного комплекса перед вылетом или передаваться ему с земли станцией GBAS во время захода.

### **МНОГОЧАСТОТНЫЕ НАЗЕМНЫЕ СИСТЕМЫ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ДОПОЛНЕНИЯ (GBAS)**

В настоящее время на территории РФ функционируют около 120 ЛККС, разработанных ООО «НППФ «Спектр», которые соответствуют требованиям SARPs<sup>1</sup> к наземным системам функционального дополнения GBAS. Эти станции обеспечивают высокоточную навигацию ВС в кодовом дифференциальном режиме (ДР) и заход на посадку по категории CAT I (GAST C) с использованием гражданских сигналов диапазона L1 ГНСС ГЛОНАСС и GPS.

Однако обеспечение захода на посадку и посадки по категориям CAT II, CAT III (GAST D)<sup>2</sup> с использованием гражданских сигналов только диапазона L1 приводит к необходимости использования в составе ЛККС выносных контрольных приемников, предназначенных для обеспечения контроля пространственного градиента ионосферных аномалий, требуемого для выполнения заданных характеристик целостности. Это конструктивное решение является дорогостоящим и существенно затрудняет развертывание ЛККС уровня GAST D. Упростить решение указанной проблемы можно на основе сравнения двухчастотных оценок ионосферных запаздываний опорными приемниками (ОП) ЛККС и приемниками ВС с использованием гражданских сигналов диапазонов L1, L2 (L3, L5).

С другой стороны, использование сигналов систем Galileo и COMPASS наряду с уже используемыми сигналами ГНСС ГЛОНАСС и GPS позволит существенно улучшить показатели готовности и непрерывности обслуживания систем GBAS в районах аэродромов, в которых часть небосклона затеняется близко расположенными горными массивами.

Указанные причины определяют актуальность разработки многочастотных многосистемных (ГЛОНАСС/GPS/Galileo) наземных систем функционального дополнения MF/МС CAT

<sup>1</sup> Федеральные авиационные правила «Организация воздушного движения в Российской Федерации»: утв. приказом Министерства транспорта РФ от 25 ноября 2011 года № 293.

<sup>2</sup> Федеральные авиационные правила «Порядок осуществления радиосвязи в воздушном пространстве Российской Федерации»: утв. приказом Министерства транспорта РФ от 26 сентября 2012 г. № 362.

II/III GBAS (Multi-frequency/multi-constellation category II/III GBAS). Создание таких систем позволит [6, 7]:

– коренным образом решить проблему обеспечения целостности GBAS при наличии ионосферных аномалий (ионосферных штормов) за счет передачи потребителям двухчастотных оценок ионосферных запаздываний ОП ЛККС;

– повысить качество решения навигационной задачи в ДР за счет использования сглаживания измеренных псевдодалностей с учетом приращений линейной комбинации полных фаз, свободной от влияния ионосферы;

– обеспечить высокие показатели непрерывности обслуживания GBAS в районах аэродромов, в которых часть небосклона затеняется близко расположенными горными массивами, за счет увеличения числа одновременно наблюдаемых НС при использовании всех доступных ГНСС.

Согласно SARPs<sup>3</sup> риск потери непрерывности обслуживания системы GBAS определяется как вероятность выхода ошибки оценивания координат за предельно допустимые значения за период проведения операции при условии, что к началу операции ошибки оценивания координат были в допуске.

Для расчета характеристик непрерывности обслуживания системы GBAS воспользуемся методом оценки эффективности сложных технических систем (СТС)<sup>4</sup>. В качестве общего показателя эффективности СТС обычно принимают вероятность выполнения системой данной задачи. Систему любого класса можно характеризовать некоторым конечным множеством несовместных состояний  $\{H_i\}, i = \overline{1, M}$ , где  $M$  – общее число этих состояний. Каждое из состояний СТС  $H_i$  в момент времени  $t$  характеризуется безусловной вероятностью этого состояния  $P_i(t)$ , и ему можно поставить в соответствие значение некоторой функции  $\omega_i(t)$ , определяющей качество решения СТС рассматриваемой задачи. Функция  $\omega_i(t)$  носит название условного показателя эффективности, поскольку она соответствует определенному состоянию СТС  $H_i$ .

В качестве показателя эффективности СТС принимается математическое ожидание функции  $\omega_i(t)$ <sup>5</sup>, которое равно [1]

$$\omega(t) = \mathbf{P}^T(t) \boldsymbol{\omega}_y(t) = \sum_{i=1}^M P_i(t) \omega_i(t), \quad (1)$$

где  $\omega(t)$  – показатель эффективности СТС (вероятность выполнения системой рассматриваемой задачи);  $\mathbf{P}(t) = [P_i(t)]$ ,  $\boldsymbol{\omega}_y(t) = [\omega_i(t)]$  – векторы-столбцы безусловных вероятностей СТС и соответствующих им условных показателей эффективности.

В качестве условного показателя эффективности системы GBAS при решении навигационной задачи в ДР целесообразно использовать вероятность того, что в рассматриваемый (расчетный) момент времени ВС находится в области безопасности, в которой ошибки определения координат не превышают предельно допустимых значений. Условный показатель эффективности в этом случае может быть представлен в виде условной вероятности [2]

<sup>3</sup> Федеральные авиационные правила «Организация воздушного движения в Российской Федерации»: утв. приказом Министерства транспорта РФ от 25 ноября 2011 года № 293.

<sup>4</sup> Федеральные авиационные правила «Радиотехническое обеспечение полетов воздушных судов и авиационная электросвязь»: утв. приказом Министерства транспорта РФ от 20 октября 2014 г. № 297.

<sup>5</sup> Там же.

$$\omega_i(t) = \int_{-h_B}^{h_B} \int_{-h_L}^{h_L} \int_{-h_H}^{h_H} p(t, \varepsilon_B, \varepsilon_L, \varepsilon_H | H_i) d\varepsilon_B d\varepsilon_L d\varepsilon_H, \quad (2)$$

где  $h_B, h_L, h_H$  – предельно допустимые ошибки определения координат.

При выполнении операций захода на посадку и посадки с применением GBAS условные показатели эффективности (2) зависят от числа навигационных спутников (НС), используемых для решения навигационной задачи (НЗ). В свою очередь это число НС определяется как свойствами системы (систем) ГНСС, так и результатами работы алгоритмов контроля целостности (КЦ) ЛККС.

В штатном режиме число наблюдаемых НС системы GPS в основном находится в пределах от 6 до 14. Наиболее вероятны значения 7–11. Реже 6, 12, 13, 14. Практически не наблюдается пять и менее НС, а также более 14. Аналогично для системы ГЛОНАСС в основном наблюдается от 6 до 11 НС. Для двух систем GPS и ГЛОНАСС, как правило, одновременно наблюдается более 14 НС, наиболее вероятно наблюдение 17–20 НС [8].

Для оценки СКО ошибок решения НЗ в ДР в зависимости от числа наблюдаемых НС использовались их экспериментальные реализации длительностью 100000 полусекундных эпох. В качестве примера на рис. 1 приведены реализации ошибок оценивания координат в ДР при решении НЗ по 5 НС системы GPS, полученные для одной и той же записи сырых данных при искусственном ограничении числа НС. Реализации ошибок оценивания для той же записи при использовании всех видимых и не забракованных алгоритмами КЦ НС показаны на рис. 2. Общее число этих НС, использованных для решения НЗ с учетом 11 забраковок всеми алгоритмами КЦ, показано на рис. 3.

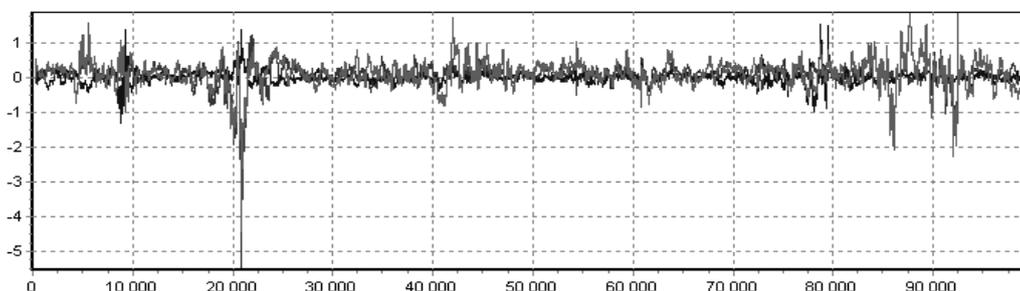


Рис. 1. Реализации ошибок оценивания координат в дифференциальном режиме при решении навигационной задачи по 5 навигационным спутникам системы GPS

Fig. 1. Implementation of errors in the estimation of coordinates in the differential mode when solving the navigation problem for 5 navigation satellites of the GPS system

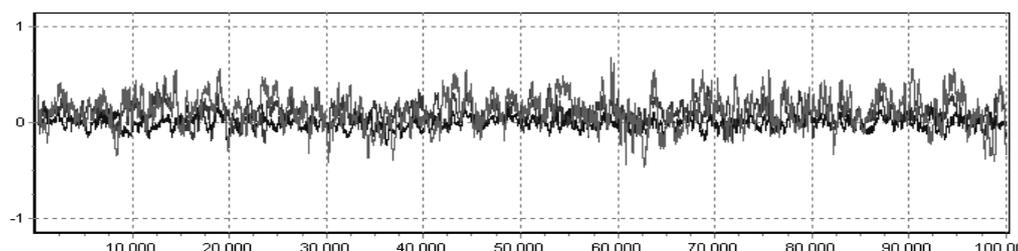


Рис. 2. Реализации ошибок оценивания для той же записи при использовании всех видимых и навигационных спутников

Fig. 2. Implementing estimation errors for the same record when using all visible navigation satellites

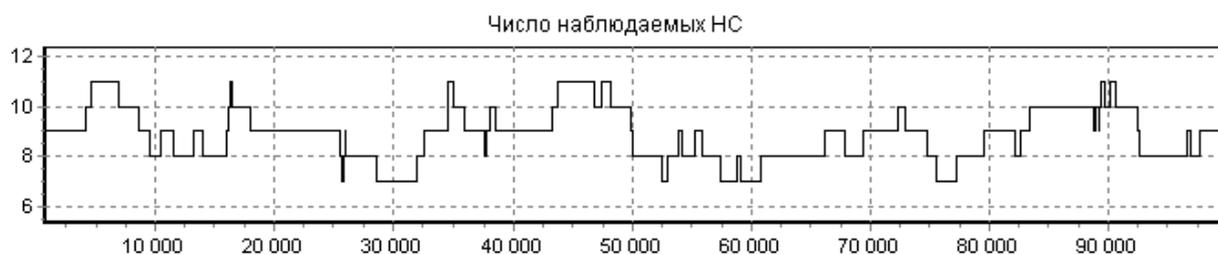


Рис. 3. Число видимых навигационных спутников  
Fig. 3. Number of visible navigation satellites

Для расчета безусловных вероятностей состояний СТС возможные переходы из состояния в состояние обычно описываются цепью Маркова<sup>6</sup>. Однако применительно к задаче оценки непрерывности обслуживания GBAS такой подход наталкивается на трудности, связанные с определением элементов соответствующей матрицы вероятностей перехода [9]. Поэтому далее используется подход, основанный на экспериментальной оценке эмпирических вероятностей состояний, т. е. вероятностей использования для решения НЗ 4, 5, 6, 7, 8 и более НС с учетом забравок алгоритмами КЦ.

Для оценки этих вероятностей использовались реализации числа НС, применяемых для решения НЗ по системам GPS + ГЛОНАСС, GPS и ГЛОНАСС в течение месяца работы ЛККС с учетом забравок алгоритмами КЦ. За каждые сутки по этим реализациям определялись вероятности использования для решения НЗ заданного числа НС путем подсчета соответствующего числа эпох.

При установке ЛККС в некоторых аэропортах (например, в Адлере) может наблюдаться меньшее число НС из-за затенения части небесной сферы местными предметами (горами). При расчете характеристик непрерывности обслуживания GBAS этот факт можно учесть за счет увеличения вероятности наблюдения меньшего числа НС и соответствующего уменьшения вероятности наблюдения большего числа НС.

Для стационарного режима, когда безусловная вероятность состояния  $H_i$  не зависит от времени, т. е.  $P_i(t_{k+1}) = P_i(t_k) = P_i$ , эффективность (1) определяется соотношением [3]

$$\omega = \sum_{i=1}^M P_i \omega_i. \quad (3)$$

Таким образом, согласно (3) вероятности решения НЗ в ДР в штатном режиме (в скобках указаны значения при ограниченном созвездии) равны [4]:

– для системы GPS

$$\text{САТ II } 1 - 10^{-11} (1 - 1,64 \cdot 10^{-7});$$

$$\text{САТ III } 1 - 1,041 \cdot 10^{-7} (1 - 1,81 \cdot 10^{-6});$$

– для системы ГЛОНАСС

$$\text{САТ II } 1 - 2 \cdot 10^{-11} (1 - 1,645 \cdot 10^{-7});$$

$$\text{САТ III } 1 - 2,082 \cdot 10^{-6} (1 - 6,7 \cdot 10^{-6});$$

– при совместном использовании GPS и ГЛОНАСС

$$\text{САТ II } 1,0 (1 - 5 \cdot 10^{-12});$$

$$\text{САТ III } 1 - 10^{-9} (1 - 5,301 \cdot 10^{-8}).$$

<sup>6</sup> Федеральные авиационные правила «Радиотехническое обеспечение полетов воздушных судов и авиационная электросвязь»: утв. приказом Министерства транспорта РФ от 20 октября 2014 г. № 297.

Требуемые характеристики непрерывности обслуживания составляют:

$$\text{CAT II } 1 - 4 \cdot 10^{-6} / 15 = 1 - 2,6 \cdot 10^{-7};$$

$$\text{CAT III } 1 - 2 \cdot 10^{-6} / 30 = 1 - 6 \cdot 10^{-8}.$$

Отсюда, в частности, следует, что при ограниченном созвездии использование только одной системы иногда не позволяет удовлетворить требования SARPs к непрерывности обслуживания. В то же время, совместное использование двух систем удовлетворяет требованиям для всех категорий захода на посадку и посадки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Создание многочастотных многосистемных (ГЛОНАСС/GPS/Galileo) наземных систем функционального дополнения MF/MC CAT II/III GBAS (Multi-frequency/multi-constellation category II/III GBAS) позволит коренным образом решить проблему обеспечения целостности GBAS при наличии ионосферных аномалий (ионосферных штормов) за счет передачи потребителям двухчастотных оценок ионосферных запаздываний ОП ЛККС.

2. Многочастотные системы позволят повысить качество решения навигационной задачи в ДР за счет использования сглаживания измеренных псевдодальностей с учетом приращений линейной комбинации полных фаз, свободной от влияния ионосферы.

3. Использование сигналов систем Galileo и COMPASS наряду с уже используемыми сигналами ГНСС ГЛОНАСС и GPS позволит существенно улучшить показатели готовности и непрерывности обслуживания систем GBAS в районах аэродромов, в которых часть небосклона затеняется близко расположенными горными массивами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Затучный Д.А.** Повышение точности оценки достоверности информации, передаваемой при автоматическом зависимом наблюдении на основе анализа качества дополнительных данных // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2016. № 1. С. 225–226.
2. **Затучный Д.А.** Влияние погрешностей при измерении псевдодальностей на навигационные определения воздушных судов при помощи СРНС // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 210(12). С. 127–128.
3. **Завалишин О.И.** Улучшение точности навигации и посадки с использованием GBAS II/III категории // Информатизация и связь. 2017. № 2. С. 18–21.
4. **Завалишин О.И.** Оценка работоспособности наземной станции GBAS // Информатизация и связь. 2017. № 2. С. 22–26.
5. **Затучный Д.А.** Сравнение линий передачи данных VDL-2 и 1090 ES // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 209. С. 88–91.
6. **Затучный Д.А.** Выбор линии передачи данных для реализации режима автоматического зависимого наблюдения // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 186. С. 149–151.
7. **Нечаев Е.Е., Лазарев А.И.** Диспетчерское обслуживание воздушного движения на дистанционно управляемом аэродроме // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 214(4). С. 131–136.
8. **Дивак Н.И., Нечаев Е.Е.** Анализ структуры воздушного пространства МВЗ // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 221(11). С. 13–17.
9. **Нечаев Е.Е., Лазарев А.И.** Спутниковая радиосвязь в дистанционной системе управления воздушным движением // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 209. С. 25–29.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Завалишин Олег Иванович**, генеральный директор ООО «НППФ «Спектр»,  
avia@nppf-spectr.ru.

## ABOUT TWO-STAR GBAS

Oleg I. Zavalishin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LLC NPPF Spectrum, Moscow, Russia

### ABSTRACT

The problem of accurate navigation support for landing systems is of great importance in our time in connection with the constantly increasing intensity of air traffic in major airports. At present, there is a trend towards a transition to navigational identification of aircraft by satellite radio navigation systems. Currently, two global navigation satellite systems, composed of navigational spacecraft – the Russian GLONASS system and the USA GPS system – operate in full. Moreover, to provide the necessary accuracy of positioning and data integrity the additional means are used – differential corrections. The article gives evidence of increasing the accuracy of positioning using the GBAS system. It is shown that the positioning with using GBAS ensures data integrity, corresponding to the category of «critical data» in accordance with ICAO requirements. The technical advantages of the Russian GBAS station are given. A comparative analysis of GBAS and the ILS landing system has been carried out. The article proves the urgency of the functional augmentation development of multi-frequency multi-system terrestrial systems. To calculate the characteristics of the maintenance continuity of the GBAS system, the complex technical systems effectiveness method of evaluation was used. Numerical data are presented on the probability of solving the navigation problem in the differential mode for the nominal mode. The calculation of the maintenance continuity characteristics of the GBAS system based on the complex technical systems effectiveness method of evaluation was carried out. The advantages of using the mobile version of the GBAS LKKS-A-2000 station are substantiated to provide the helicopters with an instrument approach for landing on unprepared sites. The figure shows the implementation of coordinates estimation errors in the differential mode in solving the navigation problem using 5 navigation satellites of the GPS system. The figure shows the implementation of estimation errors for the same record in using all visible and navigational satellites. The figure shows the number of visible navigation satellites.

**Key words:** GBAS system, differential corrections, a system of functional augmentation, a complex technical system.

### REFERENCES

1. **Zatuchny, D.A.** (2016). *Povyshenie tochnosti ocenki dostovernosti informacii, peredaemoj pri avtomaticheskom zavisimom nablyudenii na osnove analiza kachestva dopolnitel'nyh dannyh* [Increase of accuracy of an estimation of reliability of the information transferred at automatic dependent supervision on the basis of the analysis of quality of the additional data]. Proceedings of the International Symposium "Reliability and Quality", no. 1, pp. 225–226. (in Russian)
2. **Zatuchny, D.A.** (2014). *Vliyanie pogreshnostej pri izmerenii psevdodal'nostej na navigacionnye opredeleniya vozdushnyh sudov pri pomoshchi SRNS* [The effect of errors in the measurement of pseudoranges on navigational definitions of aircraft using SRNS]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 12(210), pp. 127–128. (in Russian)
3. **Zavalishin, O.I.** (2017). *Uluchshenie tochnosti navigacii i posadki s ispol'zovaniem GBAS II/III kategorii* [Improving the accuracy of navigation and landing using the GBAS II / III category]. Journal of Informatization and Communication, no. 2, pp. 18–21. (in Russian)
4. **Zavalishin, O.I.** (2017). *Ocenka rabotosposobnosti nazemnoj stancii GBAS* [Evaluation of the operation of the GBAS ground station]. Journal of Informatization and Communication, no. 2, pp. 22–26. (in Russian)
5. **Zatuchny, D.A.** (2014). *Sravnenie linij peredachi dannyh VDL-2 i 1090 ES* [Comparison of data transmission lines VDL-2 and 1090 ES]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 209, pp. 88–91. (in Russian)
6. **Zatuchny, D.A.** (2012). *Vybor linii peredachi dannyh dlya realizacii rezhima avtomaticheskogo zavisimogo nablyudeniya* [The choice of the data transmission line for implementing the automatic dependent surveillance mode]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 186, pp. 149–151. (in Russian)

7. **Nechaev, E.E. and Lazarev, A.I.** (2015). *Dispetcherskoe obsluzhivanie vozdušnogo dvizheniya na distancionno upravlyaemom aehrodrome* [Air traffic control at a remotely operated aerodrome]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 4(214), pp. 131–136. (in Russian)

8. **Divak, N.I. and Nechaev, E.E.** (2015). *Analiz struktury vozdušnogo prostranstva MVZ* [Analysis of the airspace structure of the cost center]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 11(221), pp. 13–17. (in Russian)

9. **Nechaev, E.E. and Lazarev, A.I.** (2014). *Sputnikovaya radiosvyaz' v distancionnoj sisteme upravleniya vozdušnym dvizheniem* [Satellite radio communication in the remote air traffic control system]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 209, pp. 25–29. (in Russian)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Oleg I. Zavalishin**, General Director of LLC NPPF Spectrum, [avia@nppf-spectr.ru](mailto:avia@nppf-spectr.ru).

Поступила в редакцию 11.09.2017  
Принята в печать 15.05.2018

Received 11.09.2017  
Accepted for publication 15.05.2018

УДК 621.396.96

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-47-55

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТИ БЕЗОШИБОЧНОЙ РАБОТЫ ДИСПЕТЧЕРА

В.Е. БОРИСОВ<sup>1</sup>, В.В. БОРСОВА<sup>2</sup>, С.М. СТЕПАНОВ<sup>1</sup>, А.И. СТЕПНОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский институт гражданской авиации

имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, г. Ульяновск, Россия

<sup>2</sup>Авиакомпания «Россия», г. Москва, Россия

Человеческая ошибка считается причиной или одним из основных факторов большинства аварий. Ошибки не являются неким типом отклонений в поведении, они – естественный продукт всех усилий человека. Ошибки должны быть приняты как нормальный компонент любой системы, в которой взаимодействуют техника и человек. В авиации десятилетиями с 1960-х годов доля человеческого фактора (ЧФ) от общего числа причин авиационных происшествий оценивается постоянным ростом от 40–50 до 80–90 %. Эта цифра относится в основном к сертифицированному летному персоналу коммерческой авиации. С учетом полетов авиации общего назначения (АОН), техобслуживания, управления воздушным движением, инфраструктуры транспортного комплекса общая доля ЧФ оказывается более 90 %. По содержанию предмет ЧФ направлен на исследование человека в различных условиях и отношениях естественной среды обитания и техногенной деятельности. Концепция ЧФ направлена на поиски причин неудовлетворяющей деятельности и понимается как область выработки методов оптимизации безопасности деятельности. В понимании ошибочности человеческой деятельности лежит история чувств и представлений об ответственности и свободе воли. Ошибочные действия человека являются следствием множества одновременных и асинхронных процессов комплекса всех субъектов воздушного транспорта и социальной среды. Исследование природы ошибочных действий приводит к выводам о глубинном происхождении в структурах психики человека намерений, суждений и волеизъявления. Оценка последствий происходит на фоне изменяющейся среды и сознания индивида. Результаты чаще воспринимаются как не соответствующие первоначальным намерениям. Особую актуальность человеческий фактор приобретает при внедрении навигации, основанной на характеристиках (PBN). Выполнение международных стандартов по человеческому фактору ставит перед авиакомпаниями и службами УВД серьезные проблемы.

**Ключевые слова:** человеческий фактор, процесс забывания.

### ВВЕДЕНИЕ

Влияние человеческого фактора на уровень аварий и катастроф является доминирующим во всех видах человеческой деятельности. Доля человеческого фактора в авиации оценена ИКАО и составляет от 60 до 80 %, в среднем 70 % за все время ее существования [1]. Если рассмотреть процентное соотношение факторов, влияющих на безопасность полетов для диспетчеров, осуществляющих непосредственное управление воздушным движением, то оно будет иметь вид:

- человеческий фактор (ошибки диспетчерского персонала) – 70 %;
- отказ оборудования воздушного судна – 15 %;
- отказ наземного оборудования – 10 %;
- метеословия – 5 %.

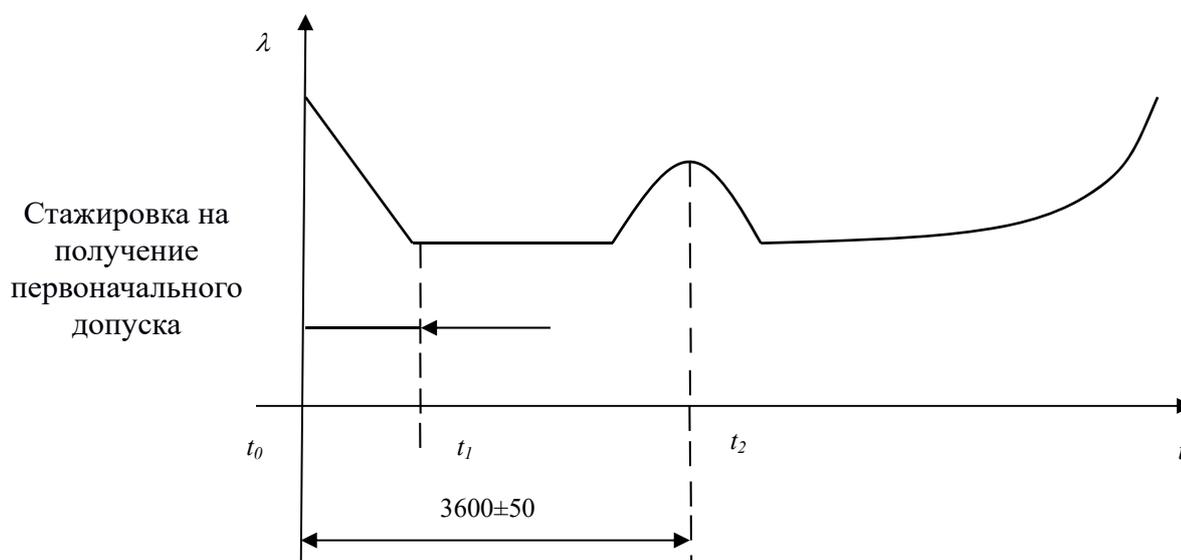
Анализ причин и расчет закономерностей рабочего процесса диспетчера может способствовать снижению количества ошибок, что непосредственным образом скажется на безопасности воздушного движения.

На основании свойства стабильности относительных частот можно с высокой степенью достоверности считать, что это отношение перенесется на интенсивность потоков возникновения инцидентов (И), серьезных инцидентов (СИ), аварий (А) и катастроф (К) [2, 3]. Таким образом, можно записать следующие соотношения:

$$\lambda_{\text{чфи}} = 0,7 \lambda_u; \lambda_{\text{чфси}} = 0,7 \lambda_{\text{си}}; \lambda_{\text{чфа}} = 0,7 \lambda_a; \lambda_{\text{чфк}} = 0,7 \lambda_k, \quad (1)$$

где  $\lambda_u$  – интенсивность потоков возникновения инцидентов;  
 $\lambda_{\text{си}}$  – интенсивность потоков возникновения серьезных инцидентов;  
 $\lambda_a$  – интенсивность потоков возникновения аварий;  
 $\lambda_k$  – интенсивность потоков возникновения катастроф;  
 $\lambda_{\text{чф}}$  – интенсивность потока ошибок, обусловленных человеческим фактором.

Индивидуальная величина интенсивности ошибок диспетчеров в течение их производственной деятельности подвержена изменениям. Эта величина зависит от стажа работы, возраста, физического состояния, роста профессиональных навыков. График зависимости безошибочной работы диспетчера от стажа приведен на рис. 1 [2].



**Рис. 1.** Зависимость безошибочной работы диспетчера от стажа:  $\lambda$  – интенсивность ошибок;  
 $t$  – время работы;  $t_0$  – начало стажировки;  $t_1$  – окончание стажировки;  
 $t_2$  – время появления самоуверенности

**Fig. 1.** The dependence of controller's error-free job during work:  $\lambda$  – intensity of errors;  $t$  – time of work;  
 $t_0$  – start of training;  $t_1$  – end of training;  $t_2$  – appearance of self-confidence

У диспетчеров, отработавших 3600 часов, наблюдается снижение вероятности определения нештатных ситуаций. Данный вывод был сделан методом экспертной оценки работы диспетчеров на предприятии гражданской авиации.

По данным УВАУ ГА (И), при общем налете 280 часов на диспетчерском тренажере курсантами совершено 200 ошибок, из них четыре привели к срабатыванию сигнализации конфликтной ситуации. Отсюда можно определить интенсивность ошибок на этапе стажировки:

$$\lambda = \frac{196}{280} = 0,7 \text{ час}^{-1}, \quad \lambda = \frac{4}{280} = 0,01428 = 0,1 \cdot 10^{-2} \text{ час}^{-1}. \quad (2)$$

Профессиональный аспект играет важную роль в авиационной аварийности гражданской авиации [4]. Он включает ошибки, являющиеся следствием таких факторов, как:

- принятие неправильного решения, неадекватно возникшей ситуации;
- ошибочные действия при реализации решения.

Профессиональные ошибки могут быть следствием недоученности, т. е. неумения выполнить те или иные элементы, что, в свою очередь, обусловлено следующим: или диспетчера недостаточно учили, или он недостаточно усвоил предмет обучения [4].

Пусть показатель качества обучения  $W$  имеет количественное выражение и определяется многими факторами обучения, т. е. является функцией нескольких переменных. Эти факторы могут варьироваться или быть постоянными. Тогда можно записать

$$W = W(x_1, \dots, x_n, x_{n+1}, \dots, x_m), \quad (3)$$

где  $x$  – факторы обучения;

$i = 1, n$  – номера варьируемых факторов;

$i = n + 1, m$  – номера неварьируемых или постоянных факторов.

В настоящее время существуют аналитические зависимости показателя качества обучения от факторов обучения. В предположении о линейной зависимости показателя качества  $W$  от факторов обучения, в соответствии с теорией чувствительности можно описать неизвестную зависимость рядом Тейлора при определении значений частных производных в точке, которая характеризует процесс обучения.

Ряд факторов может иметь свою градацию, так, например: состав ППС, фонд зарплаты ППС по должностям (ассистент, ст. преподаватель, доцент и т. д.). В этом случае  $i$ -фактор имеет указатель группы градации  $j$ , т. е.  $x_{ij}$ ,  $m$  – число градаций.

Разложение в ряд Тейлора выполняется в точке, которая характеризует процесс обучения в настоящее время и обозначаемое:

$$W_0 = W(x_{10}, \dots, x_{n0}, x_{n+1,0}, \dots, x_{m0}).$$

Тогда в общем виде можно представить разложение в следующем образом:

$$W = W_0 + \sum_{i=1}^n \left( \frac{dW}{dx_i} \right)_0 \Delta x_i, \quad \text{если } W - W_0 = \Delta W, \quad \text{то} \quad (4)$$

$$\Delta W = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left( \frac{dW}{dx_{ij}} \right)_0 \Delta x_{ij}.$$

Разложение выполнено в предположении о линейной зависимости показателя качества от факторов обучения. Ясно, что чем выше показатель качества обучения  $W$  или приращение показателя качества  $\Delta W$ , тем лучше.

Однако все факторы обучения имеют экономическую оценку и, следовательно, имеют ограничения, например: фонд зарплаты, число часов на дисциплину, количество курсантов на одного преподавателя, количество книг на одного курсанта и т. д.

Тогда в общем случае можно записать систему ограничений:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 \\ \sum_{j=1} \Delta x_{1j} \leq c_1; \\ m_i \\ \sum_{j=1} \Delta x_{ij} \leq c_i; \\ m_n \\ \sum_{j=1} \Delta x_{nj} \leq c_n. \end{array} \right. \quad (5)$$

Формулы (4) и (5) совместно образуют новую задачу, которая решена в теории линейного программирования (величина  $\Delta W$  является целевой функцией).

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left( \frac{dW}{dx_{ij}} \right)_0 \Delta x_{ij} \rightarrow \max \\ \sum_{j=1}^{m_i} \Delta x_{ij} \leq c_i (i = 1, n) \end{cases}$$

В случае применения дискретной формы представления факторов обучения, можно расширить задачу, понимая величину  $\Delta x_i$  как дискретную переменную, принимающую два значения: 0 и 1.

При описании реального учебного процесса, как в учебных заведениях, так и во время стажировки на рабочем месте диспетчера, надо определить величину частной производной по экспериментальным данным, которые возможно собрать в учебных заведениях и на предприятиях гражданской авиации.

$$\left( \frac{dW}{dx_{ij}} \right)_0 = \frac{\Delta W}{\Delta x_{ij}} = \frac{W - W_0}{x_{ij} - x_{ij0}}, \text{ при прочих равных условиях.}$$

Эргономический аспект включает в себя ошибки, вызванные следующими факторами [2]:

- модельными особенностями автоматизированного рабочего места диспетчера;
- неполным соответствием расположения кнопок управления и частоты их использования при большой интенсивности полетов;
- неблагоприятной организацией связи со смежными пунктами и службами.

Психологический аспект включает ошибки, обусловленные следующими психологическими особенностями личности:

- сниженной способностью к прогнозированию развития ситуации;
- недостаточно объективной самооценкой, приводящей к принятию решений, реализация которых объективно не под силу данному члену экипажа (пилоту);
- недостаточно профессиональной (технологической) дисциплинированностью;
- склонностью к принятию необоснованных решений (авантюристичность, неоправданная «лихость» и т. п.);
- пониженной стрессоустойчивостью;
- неполной психологической совместимостью между диспетчерами смены.

Внешняя среда включает в себя неблагоприятные условия выполнения полета, такие как:

- плохая погода на базовом аэродроме;
- грозовая деятельность в пространстве.

Кроме того, в этот аспект включены факторы, связанные взаимодействием во время работы:

- ошибки пилота;
- конфликты со специалистами других служб.

К социальному аспекту относятся факторы авиационных происшествий, связанные с условиями работы диспетчеров.

Наиболее значимыми из этих факторов являются ошибки, небрежность и невнимательность диспетчеров.

Изменения интенсивности ошибок диспетчера происходит в следующих случаях:

- повышение квалификации (периодический процесс);
- переобучение на сектор;

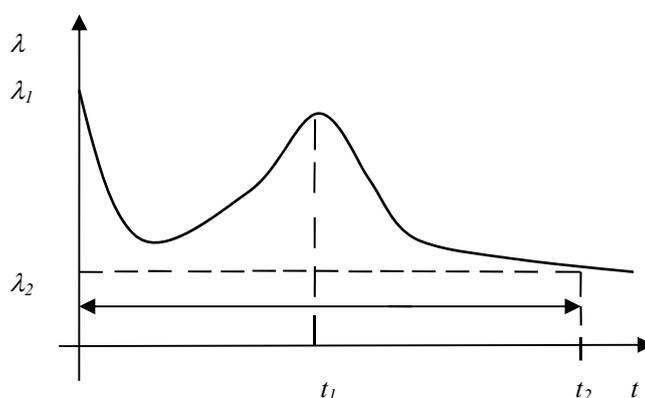
- изменение ответственности (перевод на должность старшего или руководителя полетов);
- изменение режима работы.

Это средние цифры за весь период подготовки специалистов [4, 5]. Если рассмотреть процесс переучивания на смежный сектор, то зависимость будет иметь вид рис. 2.

Индивидуальный поток ошибок диспетчера является нестационарным потоком, т. е. является нестационарным пуассоновским потоком [2].

В целом по одному авиапредприятию общий поток ошибок всех диспетчеров не будет зависеть от времени, т. е. он будет стационарным.

Ошибки диспетчеров в пределах одного авиапредприятия являются суммой индивидуальных потоков. В этом случае потоки разнесены по времени за счет прихода молодых специалистов и ухода диспетчеров на пенсию, времени выполнения работы в усложненных условиях и т. д.



**Рис. 2.** Зависимость интенсивности ошибок на конец переучивания:

$\lambda_1$  – начальная интенсивность ошибок;  $\lambda_2$  – интенсивность ошибок на конец переучивания;  
 $t_0$  – начало переучивания;  $t_1$  – появление самоуверенности;  $t_2$  – окончание переучивания

**Fig. 2.** The dependence of errors intensity at the end of retraining:

$\lambda_1$  – initial intensity of errors;  $\lambda_2$  – intensity of errors at the end of retraining;  $t_0$  – start of retraining;  
 $t_1$  – appearance of self-confidence;  $t_2$  – end of retraining

Таким образом, происходит усреднение интенсивности ошибок. Суммарный поток будет простейшим, т.е. интенсивность ошибок этого потока будет постоянной  $\lambda_{\Sigma} = \text{const}$  и безошибочная работа может быть определена по формуле

$$P(t) = \exp(-\lambda_{\Sigma}t), \quad (6)$$

где  $P(t)$  – безошибочная работа диспетчера;

$\lambda_{\Sigma}$  – интенсивность ошибок суммарного потока.

Средний индивидуальный поток рассчитывается по формуле

$$\Lambda = \frac{\lambda_{\Sigma}}{N}, \quad (7)$$

где  $\Lambda$  – средний индивидуальный поток;

$\lambda_{\Sigma}$  – интенсивность ошибок суммарного потока;

$N$  – общее количество диспетчеров.

Общий поток  $\lambda_{\Sigma}$  может характеризовать качество организации работы на данном конкретном авиапредприятии.

Влияние факторов на интенсивность ошибок может быть учтено через коэффициенты нагрузки, принятые в теории надежности<sup>1,2</sup>. Они определяются по формуле

$$K_{H_i} = \frac{\Phi_{max}}{\Phi_{ном}}, K_{H_i} > 0, \quad (8)$$

где  $\Phi_{ном}$  – номинальное значение фактора;  
 $\Phi_{max}$  – наибольшее значение негативного фактора;  
 $K_{H_i}$  – коэффициент нагрузки.

Эти коэффициенты могут быть больше и меньше единицы и входят в формулу вероятности безошибочной работы мультипликативно:

$$P = \exp(-\lambda_{\Sigma} t \prod_{i=1}^n K_{H_i}). \quad (9)$$

Подход, основанный на экспоненциальной зависимости вероятностей ошибок оператора от процессов обучения и забывания, базирующийся на открытии в психофизиологии Германа Эббингауза в 1895 г., был рассмотрен в работе [6].

Процесс забывания может быть описан линейным дифференциальным уравнением (рис. 3)

$$\tau_3 \frac{du}{dt} + ku = 0, \quad (10)$$

$$u(0) = u_0 k, \quad (11)$$

где  $\tau_3$  – постоянная времени забывания;  
 $k$  – коэффициент передачи;  
 $u$  – текущая успеваемость;  
 $u_0$  – степень обучающего воздействия (входное воздействие).

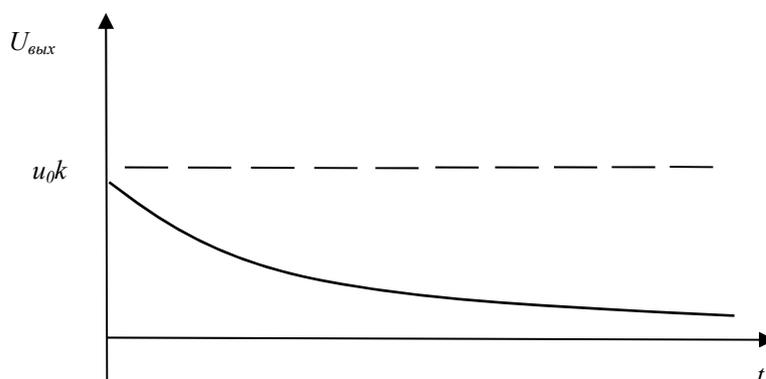


Рис. 3. Процесс забывания:  $u_0 k$  – сохранившийся в памяти материал;  $t$  – время обучения  
 Fig. 3. The process of forgetting:  $u_0 k$  – material preserved in the memory;  $t$  – training time

<sup>1</sup> Воздушный кодекс Российской Федерации. М.: Воздушный транспорт, 1997.

<sup>2</sup> Руководство по профессиональной подготовке персонала обслуживания воздушного движения гражданской авиации. Утверждено Распоряжением ФСБТ РФ от 01.02.2000 г.

$$u(t) = C_1 e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (12)$$

$$C_1 = u_0 k \text{ или } u(t) = u_0 k (1 - e^{-\frac{t}{\tau_3}}). \quad (13)$$

Процесс забывания – неизбежный процесс, который непрерывно происходит с обученным лицом<sup>3</sup> [7]. Ясно, что  $\tau_3 > \tau_0$ , т. е. это условие возможности обучения.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс забывания у диспетчера происходит периодически, после определенного промежутка времени, как после получения первоначального допуска, так и после получения последующих допусков и переучивания. Чем больше проходит времени с момента окончания стажировки, тем меньше становится показатель  $u_0 k$ , а следовательно, для уменьшения вероятности забывания, необходимо проводить систематическое повторение материала.

На предприятиях для этих целей проходят техучебы периодичностью раз в месяц, а также курсы повышения квалификации. Для проверки практических навыков проводятся занятия на диспетчерском тренажере [8]. Однако такая подготовка проходит при получении допусков и подготовке к осенне-зимнему и весенне-летнему периоду.

Необходимо довести тренажерную подготовку до системного характера, что возможно только при свободном проведении занятий на тренажере в любое время, удобное для диспетчера, осуществляющего непосредственно УВД. Процесс забывания индивидуален для каждого человека в отдельности и зависит от дополнительных факторов, таких как количество допусков, период прохождения курсов повышения квалификации, однако расчет и построение кривых забывания, позволяют перейти к сравнению по вероятности ошибки педагогического и базового вариантов. В результате можно получить приращение вероятности безошибочного выполнения своих функций персоналом.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Плотников Н.И.** Ресурсы пилота. Надежность: монография. Новосибирск: ЗАО ИПЦ «АвиаМенеджер», 2013. 264 с.
2. **Лебедев А.М.** Метод расчета ожидаемого предотвращенного ущерба от авиационных происшествий: монография. Ульяновск: УВАУ ГА, 2007. 155 с.
3. **Степанов С.М., Степнова А.И.** Человеческий фактор при автоматизации процесса управления воздушным движением // Научный вестник УВАУ ГА (И). 2015. № 7. С. 77–80.
4. **Овчаров В.Е.** «Человеческий фактор» в авиационных происшествиях: метод. материалы / Межгосударственный авиационный комитет. М.: Энергия, 2005. 13 с.
5. **Вентцель Е.С.** Теория вероятностей. М.: Наука, 1964. 576 с.
6. **Авиационная психология и человеческий фактор: учеб.-метод. пособие / сост. Д.А. Евстигнеев.** Ульяновск: УВАУ ГА, 2005. 103 с.
7. **Зубков Б.В., Рыбалкин В.В.** Человеческий фактор и безопасность полетов. М.: МГТУ ГА, 1994. 68 с.
8. **Подготовка авиационного персонала в области человеческого фактора: учеб.-метод. пособие / сост. Д.А. Евстигнеев.** Ульяновск: УВАУ ГА, 2009. С. 4–5.

<sup>3</sup> Руководство по профессиональной подготовке персонала обслуживания воздушного движения гражданской авиации. Утверждено Распоряжением ФСБТ РФ от 01.02.2000 г.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Борисов Владимир Евгеньевич**, заведующий кафедрой управления воздушным движением и навигации Ульяновского института гражданской авиации им. Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, ve\_borisov@mail.ru.

**Борсоева Вера Владимировна**, старший специалист авиакомпании «Россия», borsoeva\_vera@mail.ru.

**Степанов Сергей Михайлович**, кандидат технических наук, доцент кафедры АТ Ульяновского института гражданской авиации им. Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, uvauga-kvs@yandex.ru.

**Степнова Анастасия Ивановна**, аспирант кафедры АТ Ульяновского института гражданской авиации им. Главного маршала авиации Б.П. Бугаева, nast9679@yandex.ru.

## THE PROBABILITY DETERMINATION OF ERROR-FREE AIR TRAFFIC CONTROLLER OPERATION

Vladimir E. Borisov<sup>1</sup>, Vera V. Borsoeva<sup>2</sup>, Sergei M. Stepanov<sup>1</sup>, Anastasiia I. Stepnova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia

<sup>2</sup>Rossia Airlines, Moscow, Russia

### ABSTRACT

Human error is considered to be a cause or one of the main factors in most accidents. Errors are not a certain type of deviation in behaviour; they are a natural product of all human efforts. Errors must be accepted as a normal component of any system, in which humans and technology interact. In aviation for decades since 1960-ies the share of the human factor (HF) from the total number of aviation accident reasons is estimated by the constant growth from 40–50 to 80–90% [1]. This figure refers generally to the certified flight personnel of commercial aviation. Taking into account flights of General aviation (GA), maintenance, air traffic control, transport infrastructure, the overall share of the HF is over 90%. The subject content of HF focuses on the study of man in various conditions and relations to natural habitat and anthropogenic activities. The HF concept is aimed at finding the reasons for unsatisfactory activity and is understood as a field of methods development to optimize safety. In the understanding of human activities inaccuracy is the history of feelings and ideas about responsibility and free will. Erroneous human actions are the result of many simultaneous and asynchronous processes of air transport subjects and the social environment. The study of the nature of erroneous actions leads to conclusions about the deep origin in the human mentality structures of intentions, opinions and expression of the will. Consequence evaluation takes place during changing environment and individual consciousness. The results are often perceived as not corresponding to the original intentions. The human factor acquires special relevance at introduction of the navigation based on characteristics (PBN). Airline companies and services of Air Traffic Control (ATC) face serious problems while implementing the international standards on human factor.

**Key words:** human factor, forgetting process.

### REFERENCES

1. Plotnikov, N.I. (2013). *Resursi pilota. Nadezhnost* [Resources pilot. Reliability]: monograph. Novosibirsk: CAO IPC “Aviatio Management”, 264 p. (in Russian)
2. Lebedev, A.M. (2007). *Metod rascheta ozidaemogo predotvrachennogo ucherba ot aviacionnih proichestviy* [The method of calculating the expected avoided damage from the accident]: monography. Ulyanovsk: Ulyanovsk Higher Civil Aviation School, 155 p. (in Russian)
3. Stepanov, S.M. and Stepnova, A.I. (2015). *Chelovecheskiy faktor pri avtomatizacii processa upravleniya vozducsnim dvisheniem* [The human factor in the automation of air traffic control]. Scientific Bulletin UVAU GA, no. 7, pp. 77–80. (in Russian)

4. **Ovcharov, V.E.** (2005). *“Chelovecheskiy factor” v aviacionnih proishestviyah* [The human factor in aircraft accidents]: teaching material. The interstate aviation Committee. Moscow: Energy, 13 p. (in Russian)
5. **Vencel, E.S.** (1964). *Teoria veroiatnostey* [Theory of probability]. Moscow: Science, 576 p. (in Russian)
6. **Evstegneev, D.A.** (2005). *Aviacionnaya psihologia I chelovecheskiy factor* [Aviation psychology and human factors]: textbook. Ulyanovsk: UVAU GA, 103 p. (in Russian)
7. **Zubkov, B.V. and Ribalkin, V.V.** (1994). *Chelovecheskiy factor I bezopasnost poletov* [Human factor and flight safety]. Moscow: MGTU GA, 68 p. (in Russian)
8. **Evstegneev, D.A.** (2009). *Podgotovka aviacionnogo personala v oblate chelovecheskogo faktora* [The aviation personnel training in human factor: methodical Instructions on studying of discipline]. Ulyanovsk: UVAU GA (I), pp. 4–5. (in Russian)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Vladimir E. Borisov**, Head of the Air Traffic Control and Navigation Chair, Ulyanovsk Civil Aviation Institute, [ve\\_borisov@mail.ru](mailto:ve_borisov@mail.ru).

**Vera V. Borsoeva**, Senior Specialist of Rossiia Airlines, [borsoeva\\_vera@mail.ru](mailto:borsoeva_vera@mail.ru).

**Sergei M. Stepanov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Aviation Technique Chair, Ulyanovsk Civil Aviation Institute, [uvauga-kvs@yandex.ru](mailto:uvauga-kvs@yandex.ru).

**Anastasiia I. Stepnova**, Postgraduate of the Aviation Technique Chair, Ulyanovsk Civil Aviation Institute, [nast9679@yandex.ru](mailto:nast9679@yandex.ru).

Поступила в редакцию 08.09.2017  
Принята в печать 15.05.2018

Received 08.09.2017  
Accepted for publication 15.05.2018

УДК 658.71.08, 519.87

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-56-66

## ОЦЕНКА ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПОДГОТОВЛЕННОСТИ ОПЕРАТОРОВ ДОСМОТРОВОЙ ТЕХНИКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ А. БИРНБАУМА

Б.В. ЗУБКОВ<sup>1</sup>, Ал.К. ВОЛКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет гражданской авиации, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева,  
г. Ульяновск, Россия

В статье обосновывается необходимость совершенствования оценки профессиональной подготовленности операторов досмотровой техники. Широкое распространение при подготовке и оценке качества ее результатов операторов получили автоматизированные обучающие системы. Основным преимуществом применения подобных систем являются возможности приспособления к индивидуальным потребностям оператора путем изменения уровня сложности учебного материала. Эффективность применения данных систем подтверждается на основании зарубежных исследований. Для оценки результатов деятельности операторов также применяется технология проецирования опасных предметов. Анализ существующих подходов к оценке эффективности деятельности операторов показал, что они не в полной мере учитывают влияние факторов сложности рентгеновских изображений, на результаты контроля деятельности операторов. Представлены результаты апробации двухпараметрической модели А. Бирнбаума, которая служит для оценки профессиональной подготовленности операторов досмотровой техники посредством тестового контроля. В соответствии с рекомендациями Международной организации гражданской авиации был сформирован банк тестовых рентгеновских изображений, включающий в качестве четыре блока опасных предметов. Согласно модели вероятность обнаружения запрещенных предметов операторами рассматривается как функция от таких параметров, как разности уровня подготовки и уровня сложности изображений, а также меры структурированности знаний. Представлено решение задачи поиска значений параметров модели А. Бирнбаума методом наибольшего правдоподобия. В рамках модели были построены и исследованы характеристические функции уровня подготовленности испытуемых, описывающих их способности по интерпретации рентгеновских изображений различной трудности. Предложен и апробирован критерий оценки уровня подготовленности операторов. Критерий позволяет учитывать не только средний уровень подготовленности оператора, но и возможную его дисперсию. Предложенный критерий может применяться при отборе и сертификации операторов в случае установления к ним требования почти безусловного решения задачи поиска запрещенных предметов.

**Ключевые слова:** авиационная безопасность, оператор досмотровой техники, оценка профессиональной подготовленности, характеристическая функция, критерий подготовленности, адаптивный подход.

### ВВЕДЕНИЕ

Важным компонентом, влияющим на качество обеспечения авиационной безопасности, является уровень профессиональной подготовки операторов досмотровой техники. В настоящее время широкое распространение при подготовке операторов получили автоматизированные обучающие системы. Преимуществами применения подобных систем являются возможность регулирования темпов обучения и приспособление к индивидуальным потребностям оператора путем изменения уровня сложности учебного материала<sup>1</sup>. По результатам зарубежных исследований [1–3] применение подобных систем позволяет значительно повысить качество обучения операторов. Так, например, в результате обучения с применением автоматизированной обучающей системы в течение 6 месяцев эффективность обнаружения взрывных устройств повысилась на 71 % [4].

Одно из серьезных технологических достижений последнего времени – разработка и внедрение технологии проецирования изображений опасных предметов (далее – ПИОП), кото-

<sup>1</sup> Человеческий фактор в системе мер безопасности гражданской авиации. Дос 9808. Изд. 1. Монреаль: ИКАО, 2002. 120 с.

рая является альтернативой скрытого тестирования. Технология ПИОП позволяет накладывать виртуальное изображение опасных предметов на реальное изображение отсканированного багажа или в некоторых случаях полностью воспроизводить изображение виртуального багажа [5]. Целями ПИОП являются: организация непрерывного процесса повышения квалификации персонала; оценка результатов работы операторов; поддержание бдительности операторов. В целях объективной оценки эффективности деятельности операторов важной задачей при разработке данных систем является необходимость автоматического определения уровня сложности рентгеновского изображения, а также уровня подготовленности оператора. При этом сложность рентгеновских изображений характеризуется влиянием факторов сложности, под которыми понимаются специфические свойства рентгеновского изображения, которые влияют на способность к обнаружению запрещенных предметов операторами досмотровой техники [6]. Основными факторами сложности являются: «геометрические характеристики запрещенного предмета», «изменение ориентации запрещенного предмета», «наложение запрещенного предмета другими объектами изображения», «сложность содержимого багажа или ручной клади», «схожесть цветовой гаммы запрещенных и обычных предметов в багаже или ручной клади».

Фактор «геометрия запрещенного предмета» обуславливает то, что при интерпретации теневого рентгеновского изображения багажа или ручной клади оператор досмотровой техники по внешнему виду (геометрии) может принять опасный предмет или его части за обычный предмет багажа. Например, электрошокер в рентгеновском изображении можно принять за электробритву, а складной нож за обыкновенную ручку.

Повышение сложности интерпретации опасного предмета за счет изменения его точки обзора внутри багажа относительно нормальной точки обзора характеризуется тем, что предмет может показаться незнакомым при изменении его ориентации или он может напоминать обычный предмет багажа.

Фактор «наложение запрещенного предмета другими объектами изображения» характеризует степень, в которой запрещенный предмет закрыт другими объектами, то есть опасный предмет или его части закрываются или сливаются с другими объектами в багаже или ручной клади.

Под фактором «сложность багажа или ручной клади» следует понимать количество и тип предметов, находящихся в багаже или ручной клади. Сложность обнаружения опасного предмета по данному фактору обуславливается тем, что общее количество предметов, а также беспорядок их расположения по всему объему багажа или ручной клади создает дополнительный «шум» в процессе интерпретации рентгеновского изображения.

Фактор «схожесть цветовой гаммы запрещенных и обычных предметов» характеризует тот факт, что в результате рентгеновского сканирования опасный предмет и обычный предмет багажа, имея одинаковую плотность вещества, будут иметь схожий цвет на рентгеновском изображении.

Согласно требованиям Международной организации гражданской авиации (далее – ИКАО), одной из основных целей профессиональной подготовки операторов является способность надежно обнаруживать запрещенные предметы на рентгеновских изображениях при влиянии факторов сложности. При этом необходимо отметить ряд недостатков в применяемых в настоящее время моделях оценки подготовленности операторов по результатам либо тестового контроля, либо при использовании технологии ПИОП:

– для оценки способности интерпретации рентгеновских изображений применяется так называемый «индекс чувствительности» [7], который представляет собой разницу между количеством верных обнаружений запрещенных предметов и количеством ложных тревог. Однако данный подход, во-первых, не в полной мере учитывает влияние факторов сложности; во-вторых, рассматривает только факт обнаружения запрещенных предметов операторами без какой-либо вероятностной оценки, что не соответствует требованиям ИКАО;

– в качестве критерия компетентности операторов используется относительное количество обнаруженных предметов (выраженное в процентах), которое затем сравнивается с минимальным проходным уровнем компетентности. При этом необходимо учитывать, что нормативных требований, касающихся значения минимального проходного уровня компетентности на сегодняшний день не установлено. Каждое государство или авиапредприятие самостоятельно устанавливает минимальный уровень компетентности оператора, например 75 %.

Проведенный краткий анализ показал, что актуальной задачей является совершенствование моделей оценки уровня профессиональной подготовленности операторов досмотровой техники в целях реализации требований ИКАО.

### АПРОБАЦИЯ ОДНОМЕРНОЙ ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ А. БИРНБАУМА И КРИТЕРИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПОДГОТОВЛЕННОСТИ

В целях совершенствования оценки уровня профессиональной подготовленности операторов досмотровой техники в работе [8] было предложено использовать вероятностную модель, разработанную в рамках теории моделирования и параметризации тестов (Item Response Theory – IRT). Данная модель является «симметричным» вариантом двухпараметрической модели А. Бирнбаума [9]. Согласно основным положениям IRT, уровень подготовленности испытуемых и трудность заданий теста считаются некоторыми латентными параметрами, оценки которых предстоит получить в процессе шкалирования результатов выполнения теста [9]. Измерение латентных параметров подготовленности операторов и трудности тестовых заданий осуществляется на единой интервальной шкале логитов. Логит уровня подготовленности оператора находится по формуле

$$l_{\theta_i} = \ln \frac{p_i}{q_i},$$

где  $p_i$  и  $q_i$  – доли правильных и неправильных соответственно ответов  $i$ -го оператора на тестовые задания.

Логит уровня трудности  $j$ -го тестового рентгеновского изображения рассчитывается аналогичным образом.

В целях апробации предложенной модели на базе Ульяновского института гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева было проведено экспериментальное исследование, в котором приняло участие 70 курсантов 3 и 4-го курса очной формы обучения направления подготовки 25.03.03 Аэронавигация, профиля подготовки 9. Обеспечение авиационной безопасности, прошедших необходимый теоретический и практический курс по дисциплине «Организация проведения досмотра».

В соответствии с рекомендациями ИКАО был сформирован банк тестовых рентгеновских изображений, включающий в качестве опасных предметов следующие четыре блока:

- самодельные взрывные устройства (имитация);
- огнестрельное оружие;
- холодное оружие;
- другие опасные предметы, включающие в себя гранаты, мины, патроны, газовые баллончики, электрошокеры.

Также среди тестовых изображений присутствовали снимки «чистого» багажа, включающего в себя предметы, приводящие к появлению ложных тревог.

Методика проведения исследования состояла в следующем: испытуемым поочередно предоставлялось 153 снимка теневого рентгеновского изображения багажа и ручной клади. Снимки предъявлялись на экране по одному с экспозицией, сопоставимой с реальными услови-

ями досмотра багажа и ручной клади. Задача курсантов состояла в интерпретации данных изображений с указанием наличия или отсутствия в них запрещенных предметов. Эксперт регистрировал время и точность выполнения задания. Полученные данные эксперимента заносились в учетную ведомость. Условия испытаний были стандартизированы и сопоставимы для всех испытуемых.

Задача определения параметров модели А. Бирнбаума решалась методом наибольшего правдоподобия Фишера. Результаты тестирования испытуемых курсантов были представлены дихотомической матрицей ответов:

$$X = (x_{i,j} | x_{i,j} \in \{0,1\}, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m),$$

где  $n$  – количество тестируемых курсантов;  $m$  – количество тестовых рентгеновских изображений.

Соответственно, если испытуемый верно выполнил тестовое задание, то в ячейку матрицы ответов заносится 1, в противном случае 0.

Метод Фишера заключается в построении функции правдоподобия  $L(x_{i,j}; \theta_i, \beta_j)$  дискретной случайной величины  $x_{i,j}$  [10]:

$$L(x_{i,j}; \theta_i, \beta_j) = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m P_j \{x_{i,j} | \theta_i, \beta_j\} = \frac{\exp[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m x_{i,j}(\theta_i - \beta_j)]}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m 1 + \exp(\theta_i - \beta_j)},$$

где  $\theta_i$  – уровень подготовленности курсанта,  $i = 1, \dots, n$ ;  $\beta_j$  – уровень трудности рентгеновского изображения, характеризующийся влиянием определенного фактора сложности;  $j = 1, \dots, m$ ;

$$P_j \{x_{i,j}; \theta_i, \beta_j\} = \frac{\exp\{x_{i,j}(\theta_i - \beta_j)\}}{1 + \exp(\theta_i - \beta_j)}.$$

В качестве точечных оценок латентных параметров принимаются значения  $\theta_i^*$  и  $\beta_j^*$ , при которых  $L(x_{i,j}; \theta_i, \beta_j) = \max L(x_{i,j}; \theta_i, \beta_j)$ . При этом учитывают, что  $L(x_{i,j}; \theta_i, \beta_j)$  и  $\ln L(x_{i,j}; \theta_i, \beta_j)$  достигают максимума при одних и тех же значениях  $\theta_i^*$  и  $\beta_j^*$ .

Логарифмическая функция правдоподобия в данном случае имеет вид

$$\ln L(x_{i,j}; \theta_i, \beta_j) = \sum_{i=1}^n a_i \theta_i - \sum_{j=1}^m b_j \beta_j - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \ln[1 + \exp(\theta_i - \beta_j)],$$

где  $a_i = \sum_{j=1}^m x_{i,j}$  – первичные баллы  $i$ -го испытуемого курсанта;  $b_j = \sum_{i=1}^n x_{i,j}$  – первичные баллы  $j$ -го тестового рентгеновского изображения.

Для нахождения максимума функции правдоподобия необходимо решить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial L(\theta_i, \beta_j)}{\partial \theta_i} = a_i - \sum_{j=1}^m \frac{\exp(\theta_i - \beta_j)}{1 + \exp(\theta_i - \beta_j)} = 0, i = 1, \dots, n; \\ \frac{\partial L(\theta_i, \beta_j)}{\partial \beta_j} = -b_j + \sum_{i=1}^n \frac{\exp(\theta_i - \beta_j)}{1 + \exp(\theta_i - \beta_j)} = 0, j = 1, \dots, m. \end{cases} \quad (2)$$

Представленная система уравнений называется системой правдоподобия и содержит  $(n + m)$  уравнений с  $(n + m)$  неизвестными латентными параметрами:  $\theta_i : i = 1, \dots, n$  и  $\beta_j : j = 1, \dots, k$ . Система правдоподобия имеет единственное решение, соответствующее максимуму логарифмической функции правдоподобия.

Решение системы правдоподобия (2) для дихотомической матрицы ответов курсантов было выполнено в среде MathCAD. В табл. 1 приведены полученные в результате решения системы значения параметров модели для двух испытуемых курсантов. Критерий профессиональной компетентности рассчитывался с доверительной вероятностью 95 % [8].

**Таблица 1**  
**Table 1**

Значения латентных переменных испытуемых  
The values of trainees' latent variables

Испытуемый \ Параметр	Уровень подготовленности, $\theta_i$	Мера структурированности знаний, $d_i$	Стандартное отклонение, $\sigma_i$	Критерий компетентности, $\theta_i - 1,65\sigma_i$
Курсант 1	1,333	11,205	0,152	1,082
Курсант 2	1,382	4,011	0,424	0,682

Анализ табл. 1 показал следующее:

– второй курсант имеет более высокий уровень подготовленности, так как справился с большим количеством тестовых заданий;

– при этом первый курсант имеет лучшую структурированность знаний, что характеризуется более низким значением стандартного отклонения  $\sigma_1$ ;

– так как в качестве порогового значения критерия компетентности установлено значение в 1,02 логит, с доверительной вероятностью 95 % можно утверждать, что подготовленность первого курсанта соответствует требованиям. При этом для второго курсанта можно прогнозировать достижение уровня подготовленности лишь в 0,682 логита, что соответственно ниже установленного критерия.

На рис. 1 представлены монотонно убывающие характеристические кривые уровня подготовленности двух курсантов, построенные на основе модели (1) и данных табл. 1.

На представленных характеристических кривых тестовых заданий имеется одна единственная точка, в которой  $\theta_i = \beta_j$  – это точка перегиба, соответствующая  $P_{ij} = 0,5$  (рис. 1).

В связи с этим наиболее точно значения  $\theta_i$  и  $\beta_j$  можно измерить в точке перегиба кривых, когда уровень подготовленности оператора равен трудности тестового задания, а вероятность верной интерпретации рентгеновского изображения наиболее сильно зависит от латентной переменной и позволяет дифференцировать знания операторов.

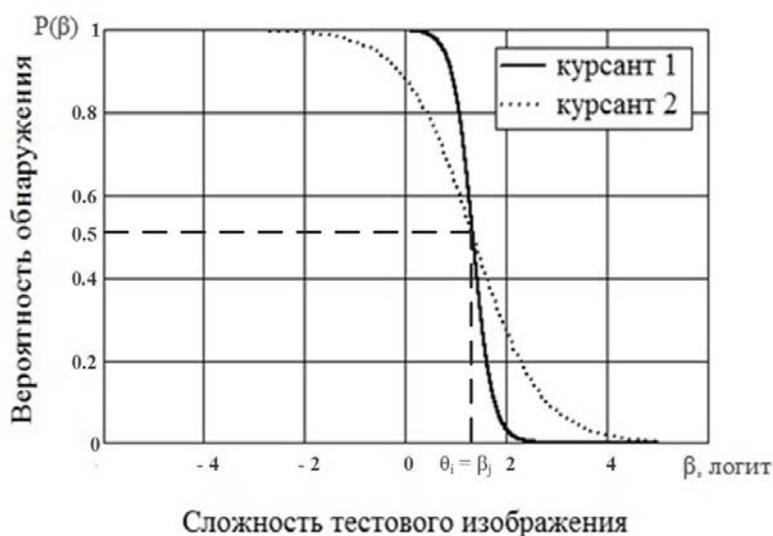


Рис. 1. Характеристические функции уровня подготовленности  
Fig. 1. Characteristic function of qualification level

На основании рекомендаций ИКАО применение специальных тренажеров обучения должно обеспечивать адаптацию подготовки к индивидуальным особенностям операторов по интерпретации изображений. В связи с этим компьютерные тренажеры (SIMFOX, Operator Training System) имеют специальный статистический модуль, который фиксирует показатели деятельности испытуемого. На основании данных статистических показателей инструктор формирует индивидуальный план адаптивного тестирования конкретного оператора. С этой же целью сетевая технология ПИОП имеет возможность объединения с автоматизированной обучающей системой. Типичная конфигурация сетевой системы ПИОП представляет собой досмотровое оборудование, коммутатор, центральный сервер и автоматизированное рабочее место, на котором установлено специальное программное обеспечение [4]. Объединение досмотрового оборудования посредством единой сети позволяет организовать централизованный контроль качества деятельности операторов досмотра и реализовать механизмы своевременного реагирования на новые угрозы авиационной безопасности.

Модель А. Бирнбаума также может найти применение при адаптивном тестировании для решения задачи оптимизации выбора тестовых рентгеновских изображений, которые в наибольшей степени соответствуют текущему уровню подготовленности оператора и способствуют дальнейшему развитию его качеств, а также в наибольшей степени способствуют дифференциации умений операторов по интерпретации рентгеновских изображений. Достоинством подхода, основанного на данной модели, является то, что для шкалирования тестовых изображений применяются два параметра: параметр уровня трудности рентгеновского изображения  $\beta$ , а также параметр дифференцирующей (избирательной) способности  $j$ -го задания  $\alpha_j$ . Данный параметр определяется следующим образом [9]:

$$\alpha_j = \frac{r_{bis_j}}{\sqrt{1 - (r_{bis_j})^2}},$$

где  $r_{bis_j}$  – бисериальный коэффициент корреляции  $j$ -го задания.

В качестве примера решения задачи оптимизации выбора тестовых рентгеновских изображений в табл. 2 приведены значения параметров некоторых тестовых заданий из предъявленных 153 изображений.

Таблица 2  
Table 2

Значения параметров тестовых заданий  
The parameter values of test tasks

Задание № \ Параметр	1	2	3	4	5	6
Уровень трудности, $\beta_i$	-0,971	0,07	0,343	0,701	0,702	0,702
Дифференцирующая способность, $\alpha_j$	2,716	1,872	4,495	5,205	1,537	0,731

На рис. 2 представлены профили характеристических функций трех тестовых заданий (№ 4, 5, 6), оценивающих способность по обнаружению самодельных взрывных устройств при влиянии фактора «изменение ориентации запрещенного предмета». Данные задания имеют одинаковый уровень сложности, но различаются дифференцирующей способностью (крутизной).

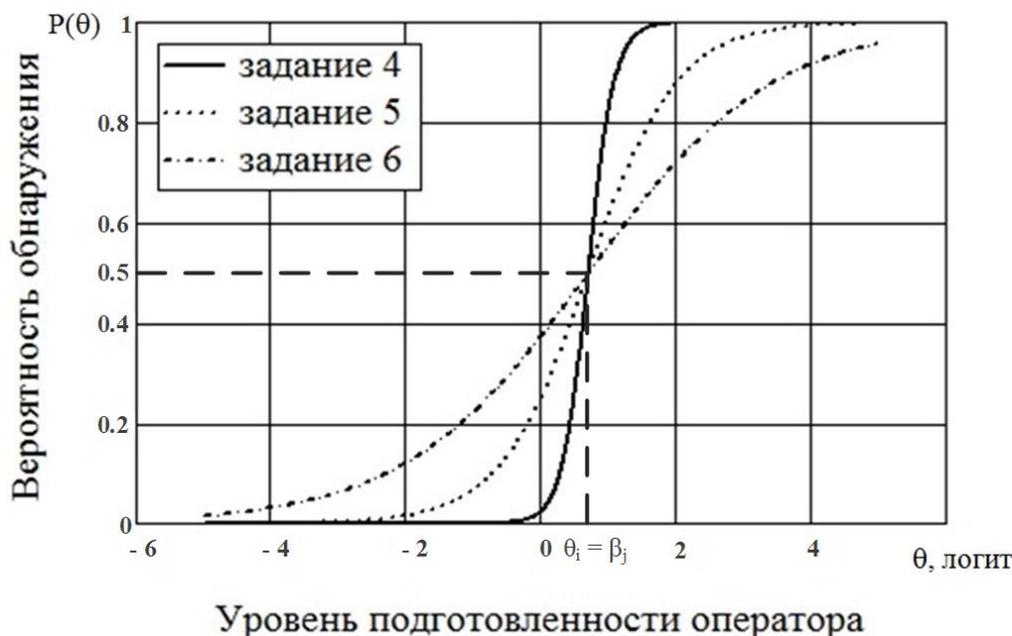


Рис. 2. Характеристические функции трех заданий  
Fig. 2. The characteristic functions of the three tasks

Согласно рис. 2, характеристическая функция задания 4 очень крутая, что соответствует большому значению параметра  $\alpha_j$ . Характеристическая функция задания 6, напротив, очень пологая, так как  $\alpha_6 \rightarrow 0$ . Вероятность обнаружения опасного предмета при интерпретации четвертого тестового изображения для курсанта с уровнями подготовленности, расположенными

на оси  $\theta$  по разные стороны от точки перегиба кривых, будут существенно различаться. При этом для шестого задания эти вероятности будут примерно одинаковы. В связи с этим применение задания 4 позволит лучше дифференцировать операторов по способности обнаруживать самодельные взрывные устройства при влиянии фактора «изменение ориентации запрещенного предмета». Аналогичным образом можно проводить анализ тестовых изображений для других опасных предметов при влиянии различных факторов сложности.

На основании вышеизложенного можно охарактеризовать роль параметра  $\alpha_j$  при дифференциации операторов досмотровой техники в результате тестового контроля. Значения параметра  $\alpha_j$  близкие к нулю характеризуют случай, когда операторы с разными уровнями подготовки обнаруживают опасный предмет при интерпретации  $j$ -го рентгеновского изображения с приблизительно равной вероятностью, что, очевидно, противоречит цели тестирования. Данные задания не пригодны для дифференциации знаний операторов, так как они не несут информации об их индивидуальных различиях. Также ненужными оказываются тестовые изображения с отрицательными значениями  $\alpha_j$ , так как их верно интерпретируют операторы с низким уровнем подготовки, а вероятность обнаружения для операторов с высоким уровнем подготовленности  $\theta_j$  стремится к нулю.

Методика выбора рентгеновских изображений в системах тестового контроля операторов заключается в следующем. После достижения необходимого уровня достоверности параметров тестовых изображений выполняется оптимизация теста, то есть изъятие малоинформативных заданий с близкими характеристическими кривыми. При формировании теста необходимо включать в него задания с различными значениями  $\alpha_j$  и  $\beta_j$ . Если испытуемая группа однородна по уровню знаний, то тест необходимо формировать из заданий с большой крутизной характеристической кривой. Если группа неоднородна, то тест формируется из заданий с малой крутизной, но при этом необходимо контролировать равномерное заполнение шкалы логитов и непересекаемость кривых заданий. Также учитывается, что тестовые изображения, имеющие крутые характеристические кривые, позволяют лучше дифференцировать тех операторов, уровни знаний которых лежат по разные стороны перегиба. Если точки лежат по одну сторону от перегиба, то задания плохо дифференцируются.

Реализация адаптивного тестирования операторов представляется следующим образом. Рассчитав уровни трудности всех заданий теста и расположив их в порядке возрастания на шкале логитов, на очередном этапе обучения оператору предлагаются те тестовые рентгеновские изображения, уровень трудности которых соответствует его зоне ближайшего развития. В [11] рассматривается следующий механизм выбора зоны ближайшего развития: после оценки уровня подготовки обучаемого, уровень трудности очередного задания определяется выражением  $\theta_i + 0,5$ . В случае отсутствия предварительной информации об уровне подготовки испытуемого можно использовать алгоритм, предложенный в работе [12]. В начале тестирования всем испытуемым предлагаются задания средней сложности, а затем сложность заданий увеличивается или уменьшается в зависимости от правильных ответов на предыдущие задания до тех пор, пока не будет достигнут момент стабилизации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье проанализированы основные факторы сложности рентгеновского изображения. Представлены результаты апробации двухпараметрической модели А. Бирнбаума. Предложенная модель отличается от существующих моделей тем, что учитывает параметр, характеризующий меру структурированности знаний операторов, и позволяет проводить вероятностную оценку уровня подготовленности операторов досмотра. На основе предложенной модели были

построены и исследованы характеристические функции уровня подготовленности двух курсантов, описывающие их способности по интерпретации рентгеновских изображений различной трудности. Практическая значимость предложенной модели заключается в следующем:

- совершенствовании методов оценки подготовленности операторов с учетом требований ИКАО;
- возможности проведения оценки эффективности систем досмотра с учетом влияния человеческого фактора.

Апробирован критерий оценки уровня подготовленности операторов. Достоинством критерия является возможность учитывать не только средний уровень подготовленности оператора, но и возможную его дисперсию. Практическая значимость критерия заключается в возможности использования его в процедурах сертификации операторов досмотровой техники при предъявлении к ним требования почти безусловного решения задачи поиска запрещенных предметов, что позволит повысить надежность функционирования систем досмотра авиапредприятий.

В статье предложена методика выбора рентгеновских изображений в системах тестового контроля операторов досмотровой техники, основанная на применении одномерной двухпараметрической модели А. Бирнбаума. Достоинством подхода, основанного на данной модели, является то, что для шкалирования тестовых изображений применяются два параметра: параметр уровня трудности рентгеновского изображения, а также параметр дифференцирующей (избирательной) способности тестового задания. Параметр дифференцирующей способности тестового задания является индикатором условия, определяющим корректировку тестового задания или его исключение из теста. Использование единой шкалы логитов позволит реализовать адаптивное тестирование операторов досмотровой техники. Суть подхода заключается в том, что на очередном этапе тестирования оператору предлагаются те рентгеновские изображения, уровень трудности которых соответствует его зоне ближайшего развития. Практическая значимость предложенной методики заключается в уменьшении количества тестовых рентгеновских изображений, предъявляемых операторам.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Schwaninger A., Hardmeier D., Hofer F.** Measuring visual abilities and visual knowledge of aviation security screeners // IEEE International Carnahan Conference on Security Technology Proceedings. 2004. Pp. 258–264.
2. **Schwaninger A., Bolting A., Michel S.** A statistical approach for image difficulty estimation in x-ray screening using image measurements // IEEE International Carnahan Conference on Security Technology Proceedings. 2009. Vol. 43. Pp. 303–308.
3. **Zhang N., Zhu J.** A study of x-ray machine image local semantic features extraction model based on bag-of-words for airport security // International journal on smart sensing and intelligent systems. 2015. Vol. 38(1). Pp. 45–64.
4. **Schwaninger A.** Increasing efficiency in airport security screening // Safety and Security Engineering. 2005. Vol. 82. Pp. 405–416.
5. **Hofer F., Schwaninger A.** Using threat image projection data for assessing individual screener performance // Safety and Security Engineering. 2005. Vol. 82. Pp. 417–426.
6. **Michel S.** Increasing x-ray image interpretation competency of cargo security screeners / M. Mendes, J.C. de Ruitter, C.M. GerKoomen, A. Schwaninger // International journal of industrial ergonomics. 2014. Vol. 44. Pp. 551–560.
7. **Hofer F., Schwaninger A.** Reliable and valid measures of threat detection performance in X-ray screening // IEEE International Carnahan Conference on Security Technology Proceedings. 2004. Vol. 38. Pp. 303–308.

8. Волков Ал.К., Айдаркин Д.В., Волков Ан.К. Применение двухпараметрической модели IRT для оценки вероятностных характеристик обнаружения запрещенных предметов операторами досмотровой техники // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20(3). С. 100–109.

9. Baker F.V. The Basic of Item Response Theory. ERIC, 2001. 172 p.

10. Нейман Ю.М., Хлебников В.А. Введение в теорию моделирования и параметризации педагогических тестов. М.: Прометей, 2000. 168 с.

11. Челышкова М.Б. Теория и практика конструирования педагогических тестов: учебное пособие. М.: Логос, 2002. 432 с.

12. Айдаркин Д.В., Косачевский С.Г. Разработка алгоритма адаптивного тестирования для автоматических обучающих систем профессиональной подготовки летного состава // Научный Вестник МГТУ ГА. 2008. № 125. С. 167–172.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Зубков Борис Васильевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры безопасности полетов и жизнедеятельности МГТУ ГА, bprgd@mail.ru.

**Волков Александр Константинович**, аспирант Ульяновского института гражданской авиации, oabuvauga@mail.ru.

## ASSESSMENT OF AVIATION SECURITY SCREENERS PROFICIENCY BY MEANS OF APPLYING THE A. BIRNBAUM TWO-PARAMETER MODEL

**Boris V. Zubkov<sup>1</sup>, Alexander K. Volkov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia*

### ABSTRACT

The necessity to improve assessment of aviation security screeners' competence has been analyzed. Computer based training systems have been widely used in the process of screeners' training and evaluating the results of training. The main advantage of similar systems application is the possibility of adaptation to the individual screeners' requirements by changing the level of training task complexity. The efficiency of applying these systems is proved by foreign researches. To assess the results of screeners' activity the dangerous image projection data is also used. The analysis of modern approaches to assess the screeners' activity efficiency showed that they do not completely take into account x-ray image complexity factors affecting the results of screeners' activity monitoring. There have been presented and tested A. Birnbaum two-parameter model, which is used to assess the screeners' proficiency competence by means of testing. According to International Civil Aviation Organization recommendations the x-ray image data base has been formed; it includes four blocks of prohibited items. Within the suggested model the probability of detecting prohibited items by aviation security screeners is considered as functions of such parameters as the difference between level of qualification and level of x-ray images complexity, and also between the aviation security screeners' structure of their professional knowledge. The solution of the task to search A. Birnbaum model parameters values by using maximum likelihood method have been offered. Within the model the qualification level characteristic functions, which describe multi-complexity level of x-ray image interpretation competency of the aviation security screener, were generated and explored. Complex criterion to assess the level of the aviation security screener qualification is offered and tested. The suggested criterion allows to evaluate aviation security screeners' competency taking into account not only the average level of qualification, but its possible variance. The suggested criterion may be used while selecting and certificating the screeners when the requirement to detect at least 95% prohibited items is applied.

**Key words:** aviation security, aviation security screener, assessment of proficiency, characteristic function, criterion of competence, adaptive approach.

## REFERENCES

1. **Schwaninger, A., Hardmeier, D. and Hofer, F.** (2004). *Measuring visual abilities and visual knowledge of aviation security screeners*. IEEE International Carnahan Conference on Security Technology Proceedings, pp. 258–264.
2. **Schwaninger, A., Bolfing, A. and Michel, S.** (2009). *A statistical approach for image difficulty estimation in x-ray screening using image measurements*. IEEE International Carnahan Conference on Security Technology Proceedings, vol. 43, pp. 303–308.
3. **Zhang, N. and Zhu, J.** (2015). *A study of x-ray machine image local semantic features extraction model based on bag-of-words for airport security*. International journal on smart sensing and intelligent systems, vol. 1(38), pp. 45–4.
4. **Schwaninger, A.** (2005). *Increasing efficiency in airport security screening*. Safety and Security Engineering, vol. 82, pp. 405–416.
5. **Hofer, F. and Schwaninger, A.** (2005). *Using threat image projection data for assessing individual screener performance*. Safety and Security Engineering, vol. 82, pp. 417–426.
6. **Michel, S., Mendes, M., de Ruiter, J.C., GerKoomen, C.M. and Schwaninger, A.** (2014). *Increasing x-ray image interpretation competency of cargo security screeners*. International journal of industrial ergonomics, vol. 44, pp. 551–560.
7. **Hofer, F. and Schwaninger, A.** (2004). *Reliable and valid measures of threat detection performance in X-ray screening*. IEEE International Carnahan Conference on Security Technology Proceedings, vol. 38, pp. 303–308.
8. **Volkov, A.I.K., Aidarkin, D.V. and Volkov, A.N.K.** (2017). *Primenenie dvukhparametricheskoi modeli IRT dlya otsenki veroyatnostnykh kharakteristik obnaruzheniya zapreshchennykh predmetov operatorami dosmotrovoi tekhniki* [The two-parameter IRT model application to assess probabilistic characteristics of detecting prohibited items by aviation security screeners]. Civil Aviation High Technologies, vol. 3(20), pp. 100–109. (in Russian)
9. **Baker, F.B.** (2001). *The Basic of Item Response Theory*. ERIC, 172 p.
10. **Neiman, Yu.M. and Khlebnikov, V.A.** (2000). *Vvedenie v teoriyu modelirovaniya i parametrizatsii pedagogicheskikh testov* [Introduction to the theory of modeling and parameterization of pedagogical tests]. Moscow: Prometheus, 168 p. (in Russian)
11. **Chelyshkova, M.B.** (2002). *Teoriya i praktika konstruirovaniya pedagogicheskikh testov: Uchebnoe posobie* [Theory and practice of pedagogical tests designing: Manual]. Moscow: Logos, 432 p. (in Russian)
12. **Aidarkin, D.V. and Kosachevskii, S.G.** (2008). *Razrabotka algoritma adaptivnogo testirovaniya dlya avtomaticheskikh obuchayushchikh sistem professional'noi podgotovki letnogo sostava* [Adaptive test algorithm design for flight personnel computer based training application]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 125, pp. 167–172. (in Russian)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Boris V. Zubkov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Full Professor of Flight and Life Safety Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, [bpigd@mail.ru](mailto:bpigd@mail.ru).

**Alexander K. Volkov**, Postgraduate Student of Ulyanovsk Civil Aviation Institute, [oabuvauga@mail.ru](mailto:oabuvauga@mail.ru).

Поступила в редакцию  
Принята в печать

13.09.2017  
15.05.2018

Received  
Accepted for publication

13.09.2017  
15.05.2018

УДК 656.08:519.87

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-67-77

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ К ОЦЕНКЕ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ТРАНСПОРТНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ

А.В. ДОРМИДОНТОВ<sup>1</sup>, Л.В. МИРОНОВА<sup>1</sup>, В.С. МИРОНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева,  
г. Ульяновск, Россия

Обеспечение безопасности объектов транспортной инфраструктуры на воздушном транспорте является задачей государственного уровня, как часть обеспечения национальной и общественной безопасности страны. Одним из направлений в данной области является процедура оценки уязвимости объектов транспортной инфраструктуры и на ее основе разработка рекомендаций по обеспечению их безопасности. Важной составной частью отмеченной задачи является математическое обоснование рекомендаций и их возможная реализация. В статье рассматривается вопрос о возможности применения математической модели противодействия, позволяющей оценивать потенциал нарушителя и потенциал системы безопасности на основе оценочных параметров нарушителя и системы безопасности. За основу математической модели описания характера взаимодействия между составляющими системы «защитник – нарушитель» взята модель, известная как модель конкуренции «хищник – жертва», за параметры модели – количественные показатели качественных характеристик двух систем. Модель представляет собой модифицированную классическую модель конкуренции Лотки – Вольтерры, которая позволяет оценивать изменение уровня формирующейся опасности в отношении ОТИ и уровня защищенности объекта. Проведен анализ возможных состояний данной модели. Описаны управляющие параметры модели. Приведен пример математического аппарата, способного оценивать уровень опасности и уровень защищенности ОТИ, выявлять параметры, при которых уменьшается потенциал системы безопасности, и осуществлять управление данными параметрами. Представленный математический аппарат способен выявить параметры, от которых уменьшается потенциал системы безопасности, и осуществлять управление указанными параметрами. Управление может осуществляться с целью перевода системы из одного устойчивого состояния в другое, сохранения ее работоспособности, увеличения ее жизненного цикла и соответствия современным требованиям к обеспечению безопасности. Корректное использование системы дифференциальных уравнений «защитник – нарушитель» позволяет обосновать конфигурируемую систему безопасности объектов транспортной инфраструктуры на основе заданного уровня безопасности.

**Ключевые слова:** модель «хищник – жертва», модель противодействия, объект транспортной безопасности, уровень опасности, уровень защищенности, управляющие параметры.

### ВВЕДЕНИЕ

В транспортной системе России воздушный транспорт является одним из наиболее привлекательных для реализации социальных угроз (террористических актов) из-за наличия специфических особенностей функционирования авиапредприятий. Террористический акт – это всегда вызов обществу, государству в лице его служб обеспечения безопасности, который требует предупреждающих равносильных защитных мер, поэтому вопросы повышения уровня безопасности воздушного транспорта всегда остаются актуальными.

Одно из главных требований, предъявляемых к системе безопасности объектов транспортной инфраструктуры (далее – ОТИ) воздушного транспорта, – это ее возможность противостоять существующему уровню угрозы, направленной в адрес защищаемого объекта.

На сегодняшний день на ОТИ воздушного транспорта проводится оценка уязвимости. В процессе оценки уязвимости осуществляется разработка рекомендаций по совершенствованию существующей на объекте системы обеспечения безопасности. Такие рекомендации актуальны лишь на момент проведения процедуры и не позволяют определить сроки эффективной работы системы. Разработка рекомендаций без определенной периодичности является не перспективной, а ретроспективной мерой обеспечения безопасности. Таким образом, нельзя быть уверенным, что

система обеспечения авиационной (транспортной) безопасности с неопределенным временным диапазоном эффективной работы по истечении времени сможет характеризоваться как качественная и готовая отразить все угрозы в адрес защищаемого объекта. Исходя из изложенного, существует проблема, которая заключается в отсутствии на ОТИ системы своевременной корректировки оценки уровня авиационной (транспортной) безопасности. Кроме того, отсутствует конкретный математический аппарат методики оценки уровня безопасности и, как следствие, необходимого на ОТИ элемента системы управления авиационной (транспортной) безопасностью, работа которого направлена на качественный своевременный анализ как собственной системы обеспечения безопасности, так и всех возможных угроз, направленных на конкретный объект.

В связи с поставленной проблемой цель настоящего исследования – применить математический аппарат «хищник – жертва» в качестве основы для дальнейшей разработки математической модели противодействия нарушителя и службы безопасности на ОТИ воздушного транспорта.

Исходя из поставленной цели, решаются следующие задачи:

- 1) на основе качественного исследования дифференциальных уравнений описать модель антагонистического противодействия нарушителя и системы безопасности (далее – модель «защитник – нарушитель»);
- 2) определить, при каких управляющих параметрах модель принимает устойчивое состояние;
- 3) определить, от каких параметров зависит данное состояние, с целью дальнейшего управления системой;
- 4) определить расположение системы относительно ближайшей точки стационара модели, при котором система безопасности будет готова перейти на качественно новый уровень;
- 5) определить потенциальные возможности данной модели применительно к системе обеспечения авиационной (транспортной) безопасности.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ «ЗАЩИТНИК – НАРУШИТЕЛЬ» И ЕЕ АНАЛИЗ

Рассматривая взаимоотношения системы безопасности ОТИ и нарушителя, можно предположить, что они подобны взаимоотношениям хищника с жертвой, между которыми всегда ведется антагонистическое противостояние. Обратим внимание на характер эволюции хищников и жертв. Уровень эволюционного развития жертвы соответствует уровню развития хищника, так как отставание в развитии может привести к вымиранию численности вида. Подобно отношениям «хищник – жертва», эволюция нарушителя (разработка новых методов, средств, способов совершения акта незаконного вмешательства) неизбежно влечет эволюцию системы безопасности ОТИ (разработка новых приемов, способов, методов противостояния нарушителю). Исходя из вышеизложенного, в настоящем исследовании за основу математической модели описания характера взаимодействия между составляющими системы «защитник – нарушитель» взята модель, известная как модель конкуренции «хищник – жертва», за параметры модели – количественные показатели качественных характеристик двух систем.

Описанием характера взаимодействия двух конкурирующих видов занимались такие ученые, как Мальтус, Форрестер, Ферхюльст, Пирл и другие. Классической моделью конкуренции является модель, предложенная Альфредом Джеймсом Лоткой и Вито Вольтеррой в 1925 и 1926 годах соответственно [1, 2]. На сегодняшний день модель имеет множество модификаций, достаточно широкую область применения и используется для описания многих конкурирующих процессов, в том числе процесса борьбы с преступностью.

Классическая модель конкуренции Лотки – Вольтерры в логарифмическом виде описывается следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = aN_1 - bN_1N_2; \\ \frac{dN_2}{dt} = -cN_2 + dN_2N_1, \end{cases} \quad (1)$$

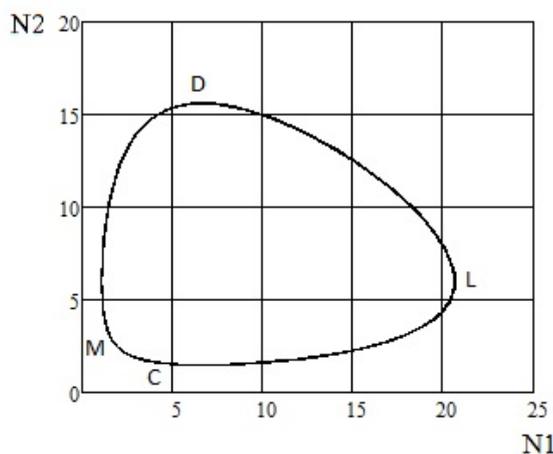
где  $N_1$  – численность жертв,  $N_2$  – численность хищников,  $a$  – коэффициент рождаемости жертвы,  $b$  – коэффициент влияния хищника на жертву (коэффициент хищничества),  $c$  – коэффициент смертности хищника,  $d$  – коэффициент влияния жертвы на хищника.

Система уравнений основана на следующих идеализированных допущениях:

- при отсутствии хищников жертвы экспоненциально размножаются;
- при отсутствии жертв хищники экспоненциально вымирают;
- слагаемые, пропорциональные произведению  $N_1N_2$  рассматриваются как результат

встречи хищника с жертвой и состоят в уменьшении скорости прироста численности жертвы на величину, пропорциональную численности хищников [3].

Процесс, описываемый классической моделью Лотки – Вольтерры, носит циклический характер. Графически его можно описать как точку с координатами  $(N_1, N_2)$ , движущуюся вдоль некоторой замкнутой фазовой траектории вокруг точки равновесия, положение которой зависит от параметров модели (рис. 1). На данном фазовом портрете видно, что при заданном начальном соотношении числа жертв к хищникам 20:8 популяция жертв начинает убывать ( $N_1$ ), а популяция хищников возрастать ( $N_2$ ). В момент времени, при котором соотношение  $N_1 : N_2$  равно 6:16, популяция жертв находится в таком положении, при котором рост численности хищников невозможен. Следовательно, число хищников начинает уменьшаться вместе с сокращением числа жертв.



**Рис. 1.** Фазовый портрет системы Лотки – Вольтерры  
**Fig. 1.** Phase space plot the Lotka-Volterra equations

Сокращение популяций жертв происходит до тех пор, пока соотношение  $N_1 : N_2$  не достигнет точки М (2;4). С этого момента начинает расти популяция жертв, через некоторое время количества жертв становится достаточно, чтобы обеспечить прирост хищников, обе популяции растут. Увеличение численности и жертв, и хищников происходит до тех пор, пока жертвы не начнут убывать в результате их истребления хищниками. На фазовой кривой в точке М число жертв достигает наименьшего значения, в точке L – пика своей численности. То же самое происходит и с численностью хищников в точках С и D соответственно. Таким образом, процесс повторяется вновь (рис. 2).

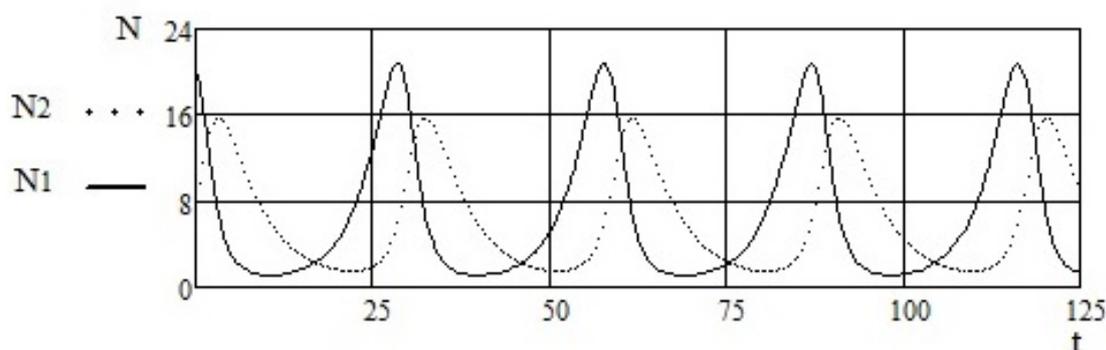


Рис. 2. График динамики численности популяций в системе Лотки – Вольтерры  
Fig. 2. Frequency plot the Lotka-Volterra equations

В модели Лотки – Вольтерры имеется состояние системы, называемое стационарным, при котором соотношения коэффициентов (управляющих параметров) равны:  $N_1 = \frac{c}{d}$ ;  $N_2 = \frac{a}{b}$ . Стационарным называется состояние, при котором численности популяций не изменяются во времени [4].

Стоит отметить, что модель идеализирована и составляет основу для исследования динамики численности хищников и жертв, а также отображает характер их взаимодействия. Анализируя графическое решение системы двух взаимосвязанных дифференциальных уравнений, можно сделать вывод о состоянии системы в рассматриваемый момент времени.

Заметим, что присутствует запаздывающий характер реакции хищников на изменение численности популяции жертв. Данный характер имеет место в процессе обеспечения безопасности ОТИ, если в качестве хищника рассматривать систему безопасности, а в качестве жертвы – нарушителя. В качестве примера такого процесса можно рассмотреть ответные меры обеспечения безопасности по объявлению уровня безопасности на защищаемом ОТИ, который устанавливается на основании изменения степени угрозы совершения акта незаконного вмешательства в деятельность транспортного комплекса<sup>1</sup>. Данный пример дает основание предположить о возможности применения модели Лотки – Вольтерры в системе обеспечения безопасности объектов транспортной инфраструктуры.

Применение модели «хищник – жертва» и ее модификаций в системах обеспечения информационной безопасности проводили такие современные исследователи, как В.А. Минаев, М.П. Сычев, Е.В. Вайц, Ю.В. Грачева, А.О. Мишури и другие; в системах обеспечения безопасности на магистральных трубопроводах – А.А. Пятков, Б.Н. Елифанцев.

Авторами предлагается использовать данную модель противодействия в качестве основы при разработке математической модели «защитник – нарушитель».

Для того чтобы применить предложенный математический аппарат, необходимо использовать методики количественного описания качества процессов в обеспечении безопасности, разработка которых в настоящее время имеет особый практический интерес. Данная проблема углубленно рассматривается Ю.Б. Михайловым, который в своем научном издании «Научно-методические основы обеспечения безопасности защищаемых объектов» приводит основные количественные показатели системы обеспечения безопасности. Методики расчета описанных Ю.Б. Михайловым количественных показателей целесообразно использовать в настоящем исследовании характера взаимодействия между защитником и нарушителем [5, 6].

<sup>1</sup> Постановление Правительства РФ от 10.12.2008 № 940 «Об уровнях безопасности объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств и о порядке их объявления (установления)».

Согласно совместному Приказу Минтранса РФ, ФСБ РФ и МВД РФ<sup>2</sup> существует девять потенциальных угроз совершения акта незаконного вмешательства на воздушном транспорте. Уточним, что моделирование необходимо проводить по каждому виду угрозы в отдельности. Перечень угроз, используемый в настоящем исследовании, проанализирован авторами в ранее опубликованной статье [7].

Модель «защитник – нарушитель» представляет собой систему дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \frac{dN_1}{dt} = aN_1 - bN_1N_2; \\ \frac{dN_2}{dt} = -cN_2 + dN_2N_1 - jN_2^2. \end{cases} \quad (2)$$

В своей работе В.И. Арнольд определяет «жесткие» и «мягкие» модели, а также тот факт, что для безошибочного использования «жесткой» модели Лотки – Вольтерры (1) необходима дополнительная информация в виде малых поправок в правых частях уравнений, учитывающих внутривидовую конкуренцию [8]. Математическая модель «защитник – нарушитель» должна отличаться от «идеализированной, жесткой» модели введением во второе уравнение поправочного коэффициента  $j$ , учитывающего «внутривидовую конкуренцию».

Определим физический смысл составляющих модели «защитник – нарушитель».

Как было отмечено ранее, если в качестве хищника рассматривать систему безопасности, а в качестве жертвы – нарушителя, то следует вывод, что первое выражение системы (2) характеризует потенциал нарушителя, а второе – потенциал системы безопасности. Такой потенциал в количественном эквиваленте может выражаться как уровень формирующейся опасности в отношении ОТИ воздушного транспорта и уровень защищенности системы обеспечения безопасности соответственно.

В свете таких рассуждений параметр  $\frac{dN_1}{dt}$  характеризует скорость изменения уровня формирующейся опасности для ОТИ воздушного транспорта (потенциала нарушителя, его активность), а выражение  $\frac{dN_2}{dt}$  – скорость изменения уровня защищенности ОТИ воздушного транспорта от угрозы нарушителя (потенциал системы безопасности) за конкретный промежуток времени. Зависимости  $N_1(t)$  и  $N_2(t)$  отображаются на графике. Отметим, что интерес представляет не численное значение скоростей, а точки перегиба, в которых имеют место качественные изменения системы «защитник – нарушитель».

Определение параметров в системе «защитник – нарушитель», представляющее самостоятельную научную задачу, осуществляется методом экспертных оценок, что является перспективной для дальнейших исследований. Частота определения коэффициентов модели соизмерима с периодом на графике и для конкретного ОТИ индивидуальна (в зависимости от категории ОТИ).

Решением данной системы является график, показывающий изменение уровня опасности и уровня защищенности ОТИ за выбранный промежуток времени. Однако в результате ввода в систему поправочного коэффициента  $j$  получаем модель с логистической поправкой, которая используется для описания характера взаимодействия двух видов с учетом существования

<sup>2</sup> Приказ Минтранса РФ, ФСБ РФ и МВД РФ от 05.03.2010 № 52/112/134 «Об утверждении перечня потенциальных угроз совершения актов незаконного вмешательства в деятельность объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств».

определенных ограничений. Данный параметр должен учитывать ограниченность средств, выделяемых на обеспечение безопасности. График представляет собой затухающие колебания (график идеализированной модели – гармонические колебания), результатом которых является стационарное состояние и отсутствие изменения параметров (рис. 3).

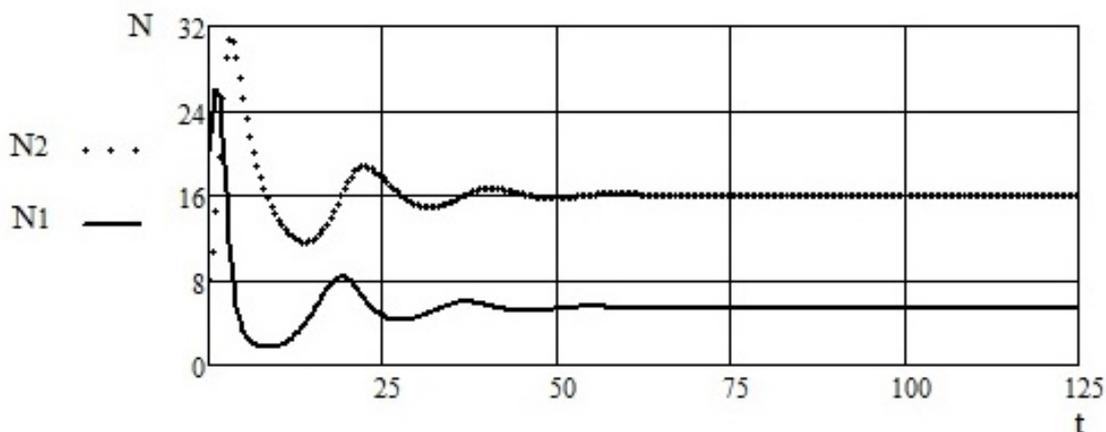


Рис. 3. График модели «защитник – нарушитель» с логистической поправкой  
Fig. 3. Frequency plot the Defender-offender equations with a logistic modification

Стационарное состояние авторы выделяют как состояние, при котором отсутствует изменение уровня опасности и уровня защищенности объекта безопасности. Это означает, что система безопасности справляется с возложенными на нее задачами и блокирует возможные сценарии незаконного вмешательства. Однако любое изменение управляющих параметров системы – коэффициентов – отразится на графике, который покажет, что система вышла из стационарного состояния. Колебания на вновь сформированном графике покажут, что необходимо изменять параметры, приводить систему в новое стационарное состояние, при котором возникающая угроза блокируется своевременным решением повышения уровня защищенности. Следует отметить, что реальные модели могут лишь максимально приблизиться к стационарному состоянию, но никогда не достигнут его.

Рассмотрим пример работы модели «защитник – нарушитель». Возьмем условный объект транспортной инфраструктуры. Предположим, что система «защитник – нарушитель» находится в стационарном состоянии, результатом которого является отсутствие изменения уровня защищенности (рис. 4).

Значения коэффициентов модели, рассчитанные экспертным методом, приведены в табл. 1.

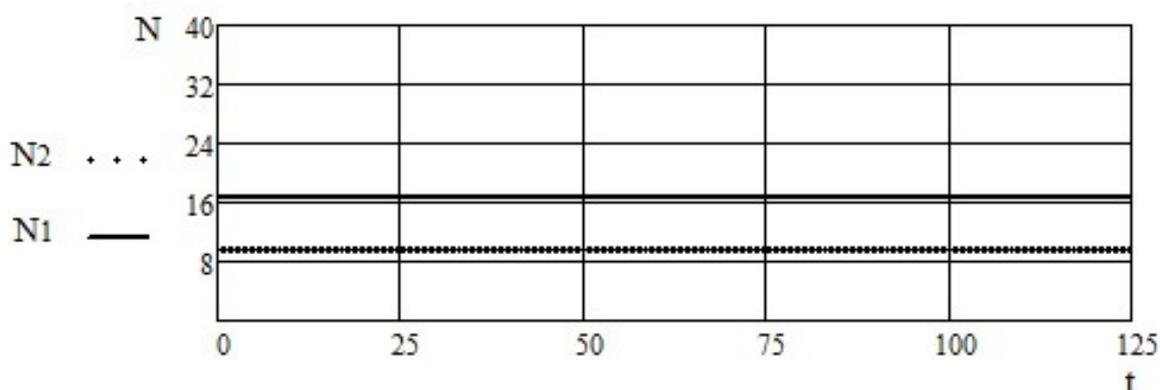


Рис. 4. График модели «защитник – нарушитель», показывающий стационарное состояние  
Fig. 4. Frequency plot of stability condition the Defender-offender equations

Таблица 1  
Table 1

Экспертные значения параметров модели «защитник – нарушитель»  
The expert model parameters the Defender-offender

Параметр модели	Значение
$A$	0,60
$B$	0,0625
$C$	0,40
$D$	0,030
$J$	0,010
$N_1$	16,53
$N_2$	9,60

Проверка (перерасчет) параметров модели осуществляется с периодичностью, соизмеримой с периодом на графике индивидуально для конкретного ОТИ при приближении системы к прогнозируемой точке перегиба. Таким образом, в результате действия дестабилизирующего фактора система выходит из стационарного состояния, и изменяется соответствующий коэффициент, который, как отмечено, определяется экспертным путем, а также изменяется график взаимодействия – происходят соответствующие колебания, показывающие, что система вышла из стационарного состояния и необходимо принятие мер со стороны службы безопасности для скорейшего возврата системы в стационарное состояние, прежде чем реализуется негативное воздействие (рис. 5).

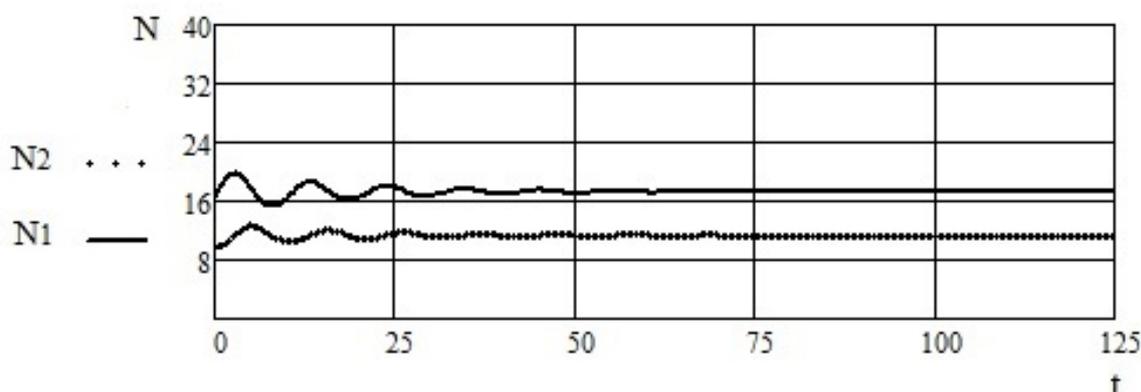


Рис. 5. График модели «защитник – нарушитель», показывающий повышение уровня угрозы  
Fig. 5. Frequency plot of the increase threat level the Defender-offender equations

Таким образом, для возвращения системы в стационарное состояние, но уже с измененной системой безопасности в ответ на изменившуюся угрозу, необходимо увеличить потенциал системы, изменить количество и качество мер защиты системы безопасности, которые определяются по результатам анализа коэффициентов системы дифференциальных уравнений (рис. 6, табл. 2).

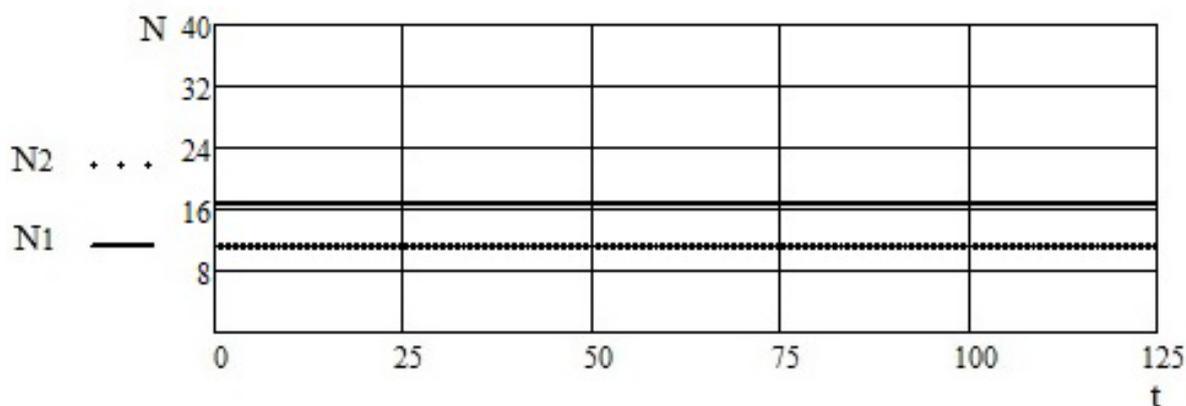


Рис. 6. График модели «защитник – нарушитель», показывающий стационарное состояние на новом качественном уровне  
Fig. 6. Frequency plot of stability condition the Defender-offender equations at a new qualitative level

Таблица 2  
Table 2

Экспертные значения параметров модели «защитник – нарушитель»  
The expert model parameters the Defender-offender

Параметр модели	Значение
<i>A</i>	0,70
<i>B</i>	0,0625
<i>C</i>	0,40
<i>D</i>	0,031
<i>J</i>	0,010
<i>N<sub>1</sub></i>	16,53
<i>N<sub>2</sub></i>	11,20

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе описана гипотетическая модель антагонистического противостояния системы «защитник – нарушитель» на примере модели «хищник – жертва». Определено, при каких параметрах система принимает стационарное состояние. Представлен пример перехода системы взаимодействия из одного стационарного состояния в другое.

Предполагается, что модель «защитник – нарушитель» позволит оценивать уровень формирующейся опасности для ОТИ воздушного транспорта (потенциал нарушителя) и уровень защищенности ОТИ воздушного транспорта от угроз нарушителя (потенциал системы безопасности) на основе оценочных параметров взаимодействия нарушителя и системы безопасности.

Представленный математический аппарат способен выявить параметры, от которых уменьшается потенциал системы безопасности, и осуществлять управление указанными параметрами. Управление может осуществляться с целью перевода системы из одного устойчивого состояния в другое, сохранения ее работоспособности, увеличения ее жизненного цикла и соответствия современным требованиям к обеспечению безопасности. Кроме этого, представлен

ный математический аппарат может служить основанием для разработки конфигурируемых систем безопасности на основе заданного уровня безопасности. Вопрос конфигурирования системы безопасности представлен к исследованию в зависимости от возможностей системы, в том числе синергетической составляющей, как результат комплексного взаимодействия организационной, материально-технической и людской составляющих.

Не стоит отрицать, что представленная модель требует доказательства гипотезы об аналогии исследуемых процессов с эволюционными процессами, описываемыми моделью «хищник – жертва», в чем и заключаются дальнейшие исследования авторов наряду с конкретным определением управляющих параметров модели «защитник – нарушитель». Кроме того, обязательно подтверждение валидности применения предлагаемой математической модели путем проведения эксперимента. В то же время без выдвижения гипотезы о возможности применения рассматриваемой модели решение отмеченных задач представляется неактуальным.

Можно сделать вывод о том, что представленный подход к оценке уровня безопасности системы противодействия нарушителю может быть применен к системе обеспечения безопасности ОТИ воздушного транспорта. Результатом применения математической модели «защитник – нарушитель» является возможность постоянного анализа состояния системы безопасности, а также своевременное реагирование на возникающие угрозы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lotka A.** Elements of Physical Biology. Baltimore, 1925: reprinted by Dover in 1956 as Elements of Mathematical Biology.
2. **Вольтерра В.** Математическая теория борьбы за существование: пер. с франц. М.: Наука: Глав. ред. физико-математической лит-ры, 1976. 288 с.
3. **Трубецков Д.И.** Феномен математической модели Лотки – Вольтерры и сходных с ней // Изв. вузов «ПНД». 2011. Т. 19, № 2. С. 69–88.
4. **Пляцук Л.Д., Черныш Е.Ю.** Синергетика: нелинейные процессы в экологии: монография. Сумы: СумГУ, 2016. 229 с.
5. **Михайлов Ю.Б.** Научно-методические основы обеспечения безопасности защищаемых объектов. М.: Горячая линия – Телеком, 2016. 322 с.
6. **Волынский-Басманов Ю.М., Михайлов Ю.Б.** Некоторые замечания и предложения к Методическим рекомендациям по проведению оценки уязвимости объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств воздушного транспорта // Транспортная безопасность и технологии. 2012. № 1(28). С. 102–107.
7. **Dormidontov A.V., Kuzovatkina L.V.** Systematic approach to the process of threats implementation on transportation facilities // Modern Science: scientific publications journal. 2017. № 02. Pp. 32–38.
8. **Арнольд В.И.** «Жесткие» и «мягкие» модели. М.: МЦНМО, 2004. 32 с.
9. **Lanchester F.** Aircraft in warfare: The down of the fourth arm. London, Constable, 1916.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Дормидонтов Александр Викторович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры обеспечения авиационной безопасности Ульяновского института гражданской авиации, d1959av@mail.ru.

**Миронова Лидия Владимировна**, аспирант Ульяновского института гражданской авиации, oabuvauga@mail.ru.

**Миронов Василий Сергеевич**, аспирант Ульяновского института гражданской авиации, oabuvauga@mail.ru.

## POSSIBILITY OF THE MATHEMATICAL MODEL OF COUNTERACTION APPLICATION TO THE ASSESSMENT OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE SECURITY LEVEL

Alexander V. Dormidontov<sup>1</sup>, Lidiya V. Mironova<sup>1</sup>, Vasiliy S. Mironov<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>*Ulyanovsk Civil Aviation Institute, Ulyanovsk, Russia*

### ABSTRACT

The air transport infrastructure objects security is the state level problem as the part of national and public security of the country. One of the directions in this field is the vulnerability assessment procedure for transport infrastructure objects and on the basis of this procedure the elaboration of ensuring their safety recommendations takes place. The mathematical substantiation of recommendations and their possible implementation is an important part of the marked problem. The possibility of mathematical model of counteraction application, which assesses the offender's potential and the security's potential based on evaluative dimensions of the offender and the security system, is under consideration. Assume as a basis the mathematical description model of interaction nature between defender-offender system components, the model known as the competition predator-prey model with quantitative qualitative characteristic parameters of the two systems is taken. The model is modified classical model of Lotka-Volterra competition, which allows us to estimate changes in the danger level formation with reference to the transport infrastructure object and the object security level. The analysis of possible model states is made. The control parameters of the model are described. The mathematical apparatus, which is able to evaluate the danger level, the level of transport infrastructure objects protection, to reveal parameters reducing security system potential and to perform the control parameters data is given. The presented mathematical model identifies the parameters which reduce the security system potential and controls these parameters. The management can be carried out for the purpose of system transfer from one steady state to another, preservation of its operability, increase of its operation cycle and compliance to modern safety requirements. The system of Defender-offender equations correct usage allows us to justify the configurable security system of transport infrastructure objects on the basis of the specified security level.

**Key words:** the competition predator-prey model, counteraction model, transport infrastructure object, danger level, security level, the control parameters.

### REFERENCES

1. **Lotka, A.** (1925). *Elements of Physical Biology*. Baltimore. Reprinted by Dover in 1956 as *Elements of Mathematical Biology*.
2. **Volterra, V.** (1976). *The Mathematical theory of the struggle for existence*. Moscow: Nauka, Home edition physical and mathematical literature, 288 p.
3. **Trubeckov, D.I.** (2011). *Fenomen matematicheskoy modeli Lotki – Vol'terry i skhodnyh s nej* [Phenomenon of Lotka-Volterra mathematical model and similar models]. Proceedings of the universities "PND", no 2, pp. 69–88. (in Russian)
4. **Plyacuk, L.D. and Chernysh, Ye.Yu.** (2016). *Sinergetika: nelinejnye processy v ehkologii: monografiya* [Synergetics: nonlinear processes in ecology: monograph]. Sumy: Sumy State University, 229 p. (in Russian)
5. **Mihajlov, Yu.B.** (2016). *Nauchno-metodicheskie osnovy obespecheniya bezopasnosti zashchishchaemyh ob"ektov* [Scientific-methodical bases of protected objects safety]. Moscow Hotline – Telecom, 322 p. (in Russian)
6. **Volynskij-Basmanov, Yu.M. and Mihajlov, Yu.B.** (2012). *Nekotorye zamechaniya i predlozheniya k Metodicheskim rekomendaciyam po provedeniyu ocenki uyazvimosti ob"ektov transportnoj infrastruktury i transportnyh sredstv vozdushnogo transporta* [Some remarks and proposals to the Methodic recommendations on conducting vulnerability assessments of transport infrastructure and vehicles of air transport]. Transport safety and technology, no. 28(1), pp. 102–107. (in Russian)

7. **Dormidontov, A.V. and Kuzovatkina, L.V.** (2017). *Systematic approach to the process of threats implementation on transportation facilities*. Modern Science: scientific publications journal, no. 02, pp. 32–38. (in Russian)
8. **Arnol'd, V.I.** (2004). «*Zhestkie*» i «*myagkie*» modeli ["Hard" and "soft" model]. Moscow: MCNMO, 32 p. (in Russian)
9. **Lanchester, F.** (1916). *Aircraft in warfare: The down of the fourth arm*. London, Constable.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Alexander V. Dormidontov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Aviation Security Chair, Ulyanovsk Civil Aviation Institute, d1959av@mail.ru.

**Lidiya V. Mironova**, Postgraduate Student of Ulyanovsk Civil Aviation Institute, oabuvauga@mail.ru.

**Vasiliy S. Mironov**, Postgraduate Student of Ulyanovsk Civil Aviation Institute, oabuvauga@mail.ru.

Поступила в редакцию 21.12.2017  
Принята в печать 15.05.2018

Received 21.12.2017  
Accepted for publication 15.05.2018

УДК 656.7

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-78-90

## АВИАТРАНСПОРТНАЯ ДОСТУПНОСТЬ И ТРАНСПОРТНАЯ ДИСКРИМИНАЦИЯ НАСЕЛЕНИЯ В СУБЪЕКТАХ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

С.Ф. ЕГОШИН<sup>1</sup>, А.В. СМИРНОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Центральный аэрогидродинамический институт им. Проф. Н.Е. Жуковского,  
г. Жуковский, Россия

В статье рассматриваются вопросы введения численных показателей для понятий «авиатранспортная доступность» и «транспортная дискриминация населения» применительно к местному (пригородному) сообщению. Значительные финансовые затраты при осуществлении авиационного сообщения приводят к необходимости организации местных воздушных линий только в тех субъектах РФ, где организация недорогого наземного сообщения невозможна. В силу этого, авиатранспортная доступность может рассматриваться как парная доступность «районный центр – столица субъекта РФ». Это обстоятельство накладывает ограничения на те показатели, которые могут применяться для соответствующих численных оценок. Разработана методика численной оценки транспортной доступности и транспортной дискриминации населения с помощью понятий «уровни транспортной доступности» и «минимальный социальный транспортный стандарт». Приводятся результаты расчетов с применением программного комплекса, созданного на основе геоинформационной системы. Показано, что при использовании только наземного транспорта уровень транспортной доступности столицы субъекта РФ превышает 4 часа для населения, проживающего на территории более 450 муниципальных районов и городских округов в 50 субъектах РФ. Большинство таких территориальных единиц относятся к труднодоступным территориям Северо-Западного, Уральского, Сибирского и Дальневосточного Федеральных округов России. Общая численность населения этих территориальных единиц составляет около 15 миллионов человек, что составляет более 10% от общей численности населения России. Существующие местные воздушные линии позволяют решить транспортные проблемы в местном сообществе для примерно 5 миллионов человек. Чтобы обеспечить 4-часовой уровень транспортной доступности для оставшейся части населения, необходимо организовать в субъектах РФ еще не менее 300 местных воздушных линий.

**Ключевые слова:** транспортная доступность, пригородное сообщение, минимальный социальный транспортный стандарт, транспортная дискриминация населения, местные воздушные линии.

### ВВЕДЕНИЕ

В «Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 года»<sup>1</sup> в качестве одной из задач государства указано обеспечение доступности и качества услуг транспорта для населения, предприятий экономики и государственных служб применительно ко всем типам транспортных перевозок.

В большинстве европейских регионов и ряде экономически развитых регионов Урала, Сибири, Дальнего Востока перевозки пассажиров в пригородном сообществе реализуются благодаря развитой автомобильной и железнодорожной сети. При этом высокий уровень транспортной доступности обеспечивается как низкой стоимостью проезда, так и достаточно высокой регулярностью и интенсивностью движения транспортных средств.

Иная картина наблюдается в отдаленных или труднодоступных районах Севера, Сибири и Дальнего Востока, где большие расстояния и малая плотность населения делают экономически нецелесообразной организацию наземного сообщения. В таких регионах самолет местных воздушных линий (МВЛ) как аналог пригородного сообщения часто является единственным транспортным средством для обеспечения приемлемого уровня транспортной доступности

<sup>1</sup> Транспортная стратегия Российской Федерации на период до 2030 года (утверждена распоряжением Правительства РФ от 22 ноября 2008 года № 1734-р) [Электронный ресурс]. URL: [http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?element\\_id=19188](http://www.mintrans.ru/documents/detail.php?element_id=19188) (дата обращения: 15.12.2016).

населения субъекта РФ [1] (по этой причине в дальнейшем термины «пригородное сообщение» и «местное сообщение» будут употребляться синонимически).

Однако общегосударственные проблемы в 1990-х и начале 2000-х годов вызвали кризис в гражданской авиации России, в частности упразднение большого количества МВЛ. Постоянный дефицит финансирования авиатранспортной отрасли привел к критическому износу инфраструктуры и неудовлетворительному состоянию основных фондов аэропортов и аэродромов [2]. Большинство взлетно-посадочных полос с искусственным покрытием было построено более 30 лет назад, что обуславливает высокий уровень их физического и морального износа. Как результат, закрытые аэродромы перестали использоваться даже в качестве запасных.

Значимость задачи восстановления авиатранспортного сообщения на местном уровне отражена, например, в тех концепциях летательных аппаратов (ЛА), которые разрабатываются в России в настоящее время [3, 4]. Но также для принятия решения об организации МВЛ необходимо иметь представление об уровне транспортной доступности столицы субъекта РФ для населения, проживающего на его территории. Поскольку именно в столице субъекта РФ населению могут быть оказаны услуги высокотехнологичной медицинской помощи, высшего образования, ряд административных услуг, а также обеспечен доступ к магистральной (авиационной или железнодорожной) транспортной сети.

Конституцией Российской Федерации гарантированы равные возможности граждан на всей ее территории, в том числе права населения в области здравоохранения, образования и других государственных услуг. В силу неравномерного развития инфраструктуры наземного транспорта субъектов РФ, неоднородного распределения населения по их территории невозможно (или очень дорого) обеспечить одинаковое время поездки для всех граждан России.

Одним из путей обеспечения транспортной доступности столицы субъекта РФ (и в конечном счете доступности услуг высокотехнологичной медицинской помощи, высшего образования, ряда административных и доступа к магистральной транспортной сети) является разработка стандарта на транспортные услуги, т. н. минимального социального транспортного стандарта (МСТС). Использование МСТС при организации местных авиаперевозок – достаточно давно распространенная практика в зарубежных странах [5]. Разработка МСТС в части транспортных перевозок пассажиров в пределах субъекта РФ позволит определить гарантируемый государством (и возможный с точки зрения финансовых затрат) минимальный уровень доступности и качества этого вида транспортных услуг на всей территории Российской Федерации.

Важным параметром минимального социального транспортного стандарта является «максимальное время оказания транспортной услуги». Необходимость организации сети МВЛ в субъекте РФ, ее масштаб зависят от значения этого параметра. Даже при ограничении максимальных затрат времени на поездку в 3–4 часа в ряде регионов РФ будут существовать территории, на которых проживает значительная часть населения, подверженная транспортной дискриминации.

## ТРАНСПОРТНАЯ ДОСТУПНОСТЬ И ТРАНСПОРТНАЯ ДИСКРИМИНАЦИЯ

Транспортная доступность в пригородном сообщении может быть определена как частный случай обобщенной классификации транспортной доступности [6] – это парная точечная доступность, реализуемая с помощью пригородного транспорта и измеряемая в единицах времени (например, в часах).

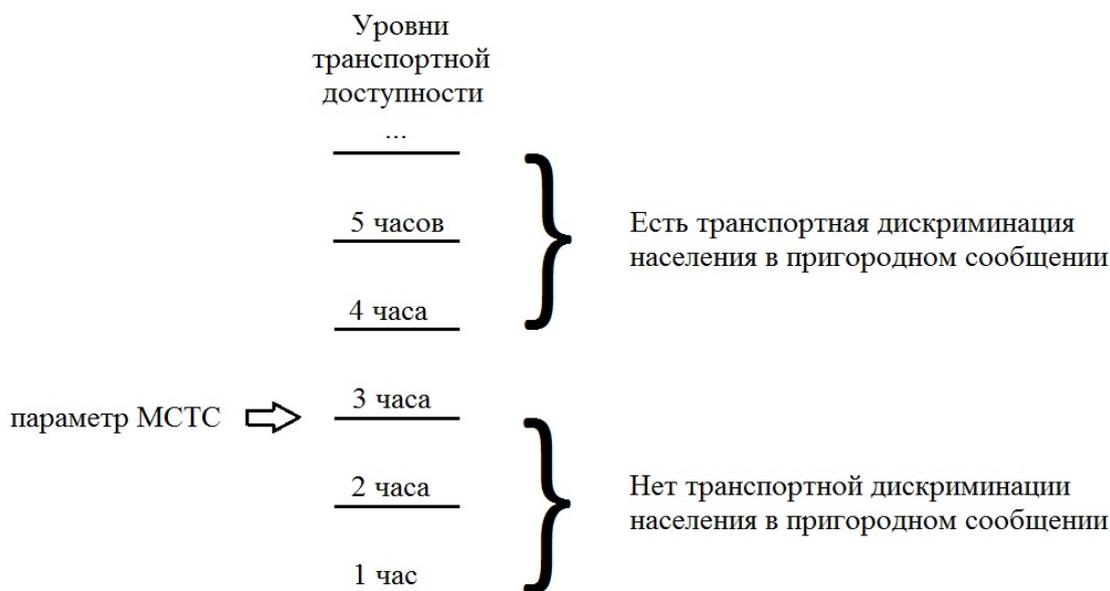
Корректность использования такой трактовки транспортной доступности обусловлена следующими обстоятельствами:

– парность (а не интегральность) транспортной доступности в пригородном сообщении следует из того, что целью организации пригородного сообщения является обеспечение сообщения между столицей субъекта РФ и районными центрами этого субъекта;

– корректность использования точечной доступности обусловлена тем, что и пункты отправления, и пункты назначения можно рассматривать как точки: расстояние между пунктами назначения много больше их собственных размеров, а конечной целью поездки является достижение строго определенных центров.

Как следует из введенного определения, парность транспортной доступности в пригородном сообщении позволяет оценивать только связность административного центра субъекта РФ с населенными пунктами подчиненных районов. В силу разной удаленности мест проживания граждан от столицы, различные территории субъекта РФ будут отличаться по уровню транспортной доступности (времени  $T$ , затраченному на поездку).

Граждане субъекта РФ должны иметь возможность добраться до его центра за время, превышающее заданного в МСТС максимального времени оказания транспортной услуги  $T_c$  (в дальнейшем  $T_c$  будем называть «параметр МСТС»). Если время, заданное в МСТС, превышено на какой-то территории субъекта РФ, то можно говорить о том, что население, проживающее на этой территории, будет подвержено транспортной дискриминации в пригородном сообщении. Время  $T_c$  можно назвать пороговым уровнем транспортной доступности, а его превышение указывает на транспортную дискриминацию и не соответствует МСТС (рис. 1).



**Рис. 1.** Взаимосвязь понятий «уровень транспортной доступности», «транспортная дискриминация населения» и параметра МСТС  
**Fig. 1.** Interrelation of the notions of "level of transport accessibility", "transport discrimination of the population" and the parameter of minimum social transport standard (MSTS)

С учетом введенного определения транспортной доступности можно выработать следующие ее численные показатели.

В общем случае территория субъекта РФ может быть разбита на элементы, в каждом из которых может проживать некоторое количество человек  $W_j$  (далее эти элементы территории условно называются «точками»). Для любой «точки» территории может быть рассчитано время поездки от этой точки до другой точки, как в случае пригородного сообщения – до административного центра. Данное время, с учетом округления в большую сторону, будет соответствовать некоторому уровню транспортной доступности  $k$ . После перебора всех точек субъекта РФ может быть вычислена доля населения  $Z_k$ , соответствующая этому уровню  $k$  и выражаемая в процентах от общей численности населения субъекта РФ:

$$Z_k = \frac{\sum_{j=1}^m W_j}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad 100 \%, \quad (1)$$

где  $W_i, W_j$  – количество населения, проживающего в точках  $i$  или  $j$ ;  
 $m$  – количество точек, соответствующих уровню транспортной доступности  $k$ ;  
 $n$  – общее количество точек субъекта РФ.

Транспортная дискриминация населения субъекта РФ  $D$  может быть вычислена следующим образом:

$$D = \sum_{k=T_c+1}^{T_{max}} Z_k \quad 100 \%, \quad (2)$$

где  $T_{max}$  – принятое максимальное значение в шкале уровней транспортной доступности.

Поскольку МВЛ существуют как способ перевозок, дополнительный к наземным видам транспорта в удаленных или труднодоступных районах, то при оценке транспортной дискриминации населения субъекта РФ рассчитывается два варианта  $D$ :  $D_H$  и  $D_A$  – в отсутствие и при наличии МВЛ соответственно. Кроме того, в качестве показателя авиатранспортной доступности может быть введен показатель, характеризующий текущий охват населения субъекта РФ местными авиационными перевозками  $A$ :

$$A = \frac{D_H - D_A}{D_H}. \quad (3)$$

Аналогичным образом может быть рассчитан показатель, характеризующий охват площади субъекта РФ местными авиационными перевозками  $A_S$ . Для этого при вычислении  $A_S$  в формулах (1)–(3) вместо населения  $W$ , проживающего в «точках» территории субъекта РФ, необходимо подставлять площадь  $S$ , соответствующую этим «точкам» (для этих расчетов при дальнейшем упоминании используется индекс  $S$ ).

### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ВРЕМЕНИ ПОЕЗДКИ

Для исследования транспортной доступности в пригородном сообщении используется следующая методика расчета времени поездки от «точки» (элемента территории) субъекта РФ до его столицы. На рис. 2 приведена схема поездки с использованием только наземного транспорта.

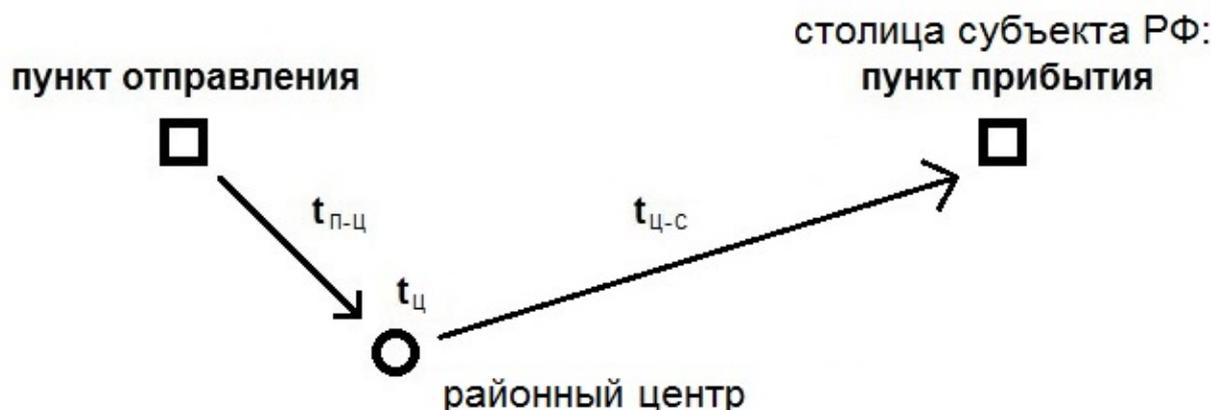


Рис. 2. Схема пригородной поездки с использованием только наземного транспорта  
 Fig. 2. Diagram of a commuter trip using only the ground transport

Время такой поездки  $t_H$  рассчитывается по формуле

$$t_H = t_{П-Ц} + t_{Ц} + t_{Ц-С} = \frac{L_{П-Ц}}{V_{П-Ц}} + t_{Ц} + \frac{L_{Ц-С}}{V_{Ц-С}}, \quad (4)$$

где  $t_{П-Ц}$  – время поездки от пункта отправления до районного центра с помощью муниципального общественного транспорта;

$t_{Ц}$  – время пересадки из муниципального транспорта в пригородный (время высадки из общественного транспорта и перемещения на автовокзал, время покупки билета, посадки и ожидания отправления);

$t_{Ц-С}$  – время пригородной поездки, с момента начала движения в пункте отправления до остановки в конечном пункте – столице субъекта РФ;

$L_{П-Ц}$  – расстояние от пункта отправления до районного центра;

$V_{П-Ц}$  – скорость движения муниципального транспорта;

$L_{Ц-С}$  – расстояние по земле (по автомобильной или железной дороге) от районного центра до столицы субъекта РФ;

$V_{Ц-С}$  – скорость движения пригородного наземного транспорта.

Схема поездки в центр субъекта РФ с привлечением авиационного транспорта приведена на рис. 3.

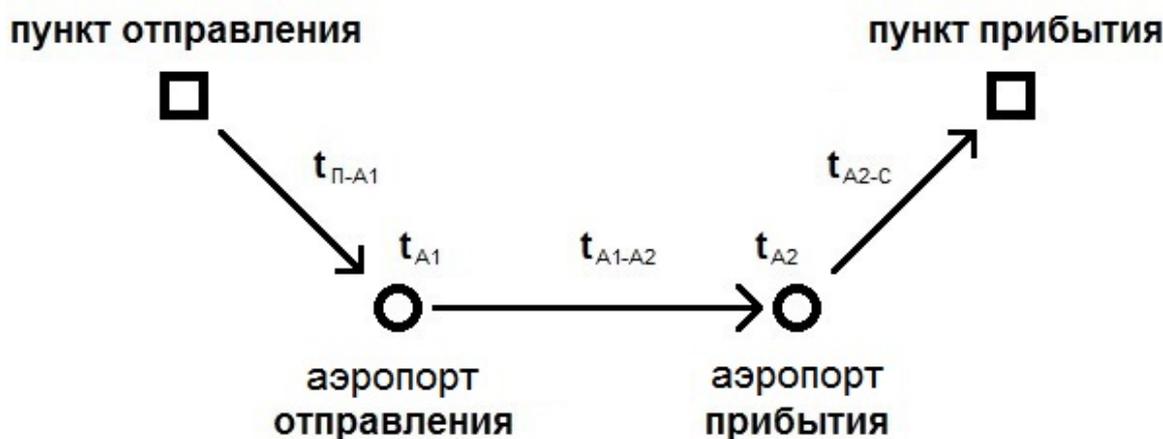


Рис. 3. Схема пригородной поездки с привлечением авиационного транспорта  
Fig. 3. Diagram of a commuter trip involving air transport

Расчет времени поездки в центр субъекта РФ с привлечением авиационного транспорта отличается от поездок с использованием только наземного транспорта. Перемещение пассажиров происходит через аэропорты как дополнительные промежуточные пункты, расположение которых, как правило, не совпадает с районными центрами или столицами субъектов РФ. Время поездки с привлечением авиационного транспорта  $t_A$  определяется как

$$t_A = t_{П-А1} + t_{А1} + t_{А1-А2} + t_{А2} + t_{А2-С} = \frac{L_{П-А1}}{V_{П-А1}} + t_{А1} + t_{А1-А2} + t_{А2} + \frac{L_{А2-С}}{V_{А2-С}}, \quad (5)$$

где  $t_{П-А1}$  – длительность поездки наземным транспортом от пункта отправления до аэродрома отправления;

$t_{А1}$  – время пересадки в аэропорту отправления (время высадки из общественного транспорта, время перемещения в здание аэропорта, время ожидания и предполетных процедур);

$t_{A1-A2}$  – время перелета от аэропорта отправления до аэропорта прибытия;  
 $t_{A2}$  – время пересадки в аэропорту прибытия (аналогично  $t_{A1}$ );  
 $t_{A2-C}$  – время наземной поездки от аэропорта прибытия до столицы субъекта РФ;  
 $L_{П-A1}$  – расстояние от пункта отправления до аэродрома отправления;  
 $V_{П-A1}$  – скорость движения автомобильного транспорта от пункта отправления до аэродрома отправления;  
 $L_{A2-C}$  – расстояние от аэропорта прибытия до столицы субъекта РФ;  
 $V_{A2-C}$  – скорость движения автомобильного транспорта от аэродрома прибытия до столицы субъекта РФ.

### ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ АВИАТРАНСПОРТНОЙ ДОСТУПНОСТИ

Наиболее удобной программной реализацией для отображения результатов расчета показателей транспортной доступности является геоинформационная система (ГИС). Блок-схема программного комплекса, созданного авторами самостоятельно, приведена на рис. 4.

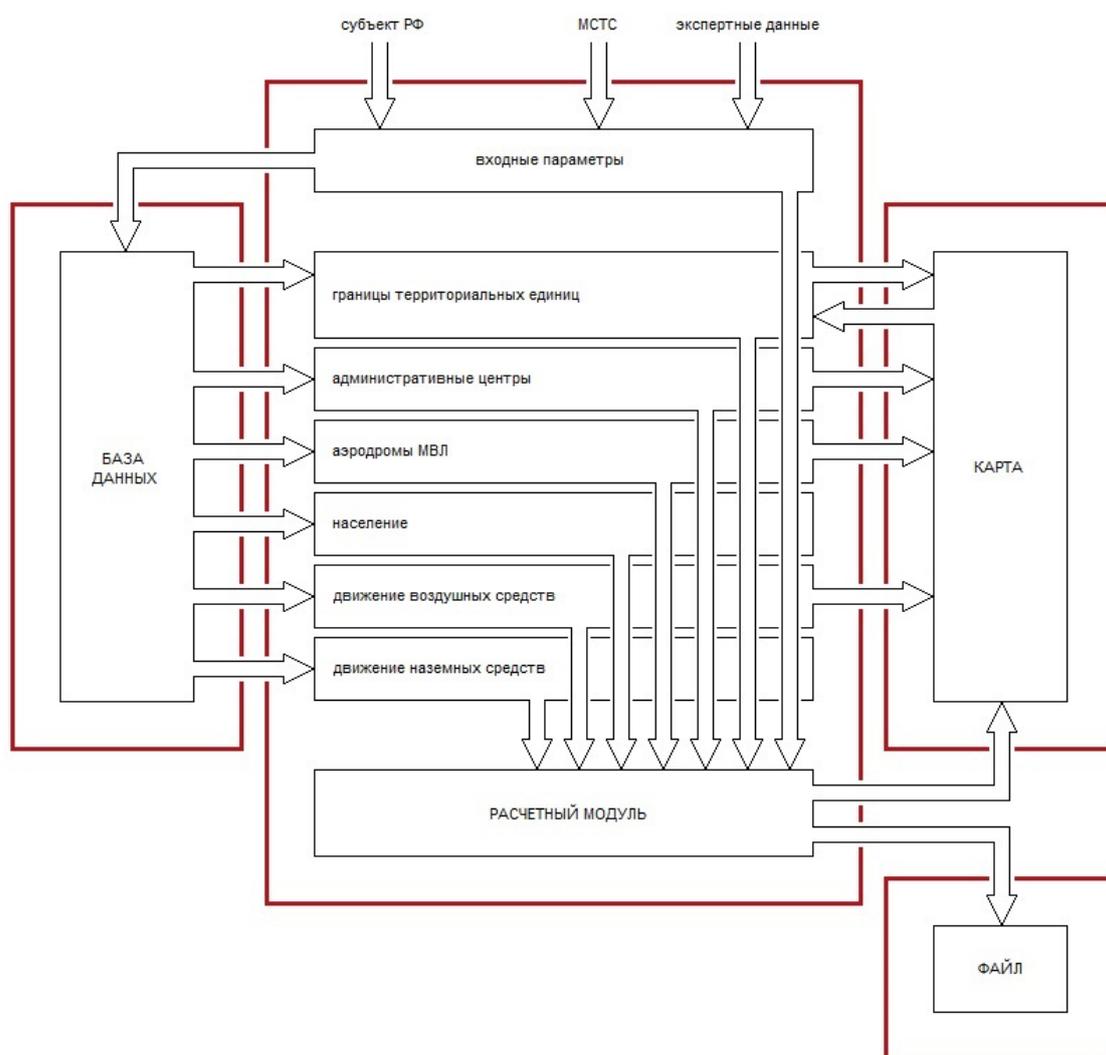


Рис. 4. Блок-схема программного комплекса для исследования транспортной доступности в субъектах РФ  
Fig. 4. Block diagram of a software package to study transport accessibility in subjects of the Russian Federation

Программный комплекс включает три основных модуля:

- модуль подготовки данных для расчета;
- расчетный модуль;
- модуль отображения результатов расчета на географической карте.

Как следует из (1)–(5) для расчета показателей транспортной доступности необходимо собрать большое количество информации о движении транспортных средств, развитии инфраструктуры различных видов транспорта, распределении численности населения, административно-территориальном делении субъектов Российской Федерации, а также информации о площади и границах административных единиц субъекта РФ.

Для пригородного наземного транспорта в расчетах использовалась не нормативная техническая скорость движения автотранспорта, как это принято в большинстве исследований [7], а фактическая. Это позволило учесть многие особенности автотранспортного движения, включая возможные задержки в промежуточных населенных пунктах из-за пробок и остановок. Данные о фактической скорости движения автомобильного транспорта в субъектах РФ были получены на официальном сайте ПАО «Транспортная клиринговая компания»<sup>2</sup>.

Для подавляющего количества субъектов РФ автомобильный транспорт является наиболее быстрым и наиболее распространенным (особенно в районах Севера, Сибири и Дальнего Востока) наземным способом передвижения. Кроме того, важным требованием к организации пассажирских перевозок водным транспортом являются географические и климатические особенности регионов. Именно поэтому его широкое использование невозможно во многих регионах. В силу этих причин железнодорожный и водный транспорт были исключены из рассмотрения.

Информация о времени полетов ВС МВЛ содержится в расписании движения ВС. Расписание движения ВС за 2010–2015 гг. предоставлено Центром расписания и тарифов ПАО «Транспортная Клиринговая Палата» («ТКП»)³. Все сведения об аэродромах базирования ВС МВЛ взяты на официальном сайте Межрегиональной общественной организации пилотов и граждан – владельцев воздушных судов⁴.

Параметры  $t_{Ц}$ ,  $t_{A1}$ ,  $t_{A2}$  в (4)–(5) принимались равными нулю. Это упрощающее предположение несколько сужает достоверность полученных значений критериев транспортной доступности. Суть расчета транспортной доступности сводится к доступности «технической», то есть обусловленной только техническими характеристиками транспортных средств, без учета организационных мероприятий на местах.

С другой стороны, параметры  $t_{Ц}$ ,  $t_{A1}$  и  $t_{A2}$  входят в формулы как линейные слагаемые, поэтому могут быть опущены при одновременном уменьшении  $T_c$ . Другими словами, в первом приближении задание времени всех пересадок «1 час» и МСТС «5 часов» равносильно заданию нулевого времени пересадок и МСТС «4 часа», в чем и заключается преимущество использования МСТС при расчете транспортной доступности.

Без учета этого упрощения, для расчета времени пригородной поездки потребовалось бы собрать огромное количество дополнительных данных, не имеющих прямого отношения к авиатранспортному сообщению (координаты и устройство всех объектов транспортной инфраструктуры и зданий, расписание движения общественного транспорта во всех регионах и т. п.). Точность расчетов при этом, безусловно, повысилась бы, но общие выводы остались прежними, поскольку такие понятия, как «транспортная доступность» и «транспортная дискриминация

<sup>2</sup> Интернет-портал Яндекс, сервисы «Яндекс-Карты» и «Яндекс-Пробки» [Электронный ресурс]. URL: <https://yandex.ru> (дата обращения: 01.09.2017–15.09.2017).

<sup>3</sup> ПАО «Транспортная клиринговая палата» [Электронный ресурс]: офиц. сайт. URL: <https://www.tch.ru/ru-ru/Standard-statistics/Schedule-and-tariffs/Pages/Flight-Timetable.aspx> (дата обращения: 23.05.2016).

<sup>4</sup> Межрегиональная общественная организация пилотов и граждан – владельцев воздушных судов [Электронный ресурс]: офиц. сайт. URL: <http://maps.aopa.ru/> (дата обращения: 18.09.2017–28.09.2017).

населения», сами по себе являются качественными оценками, не требующими вычислений высокой точности.

Данные о населении субъектов РФ с отдельным учетом городского и сельского населения сформированы по результатам переписи населения на 01.01.2014<sup>5</sup>. В 2010 году в России насчитывалось более 150000 сельских поселений<sup>6</sup>. Географические данные о населенных пунктах собраны на сервисах интернет-портала Яндекс<sup>7</sup>. Площади и границы административных единиц субъектов РФ получены из [8] в формате shape-файлов разработки компании ESRI<sup>8</sup>.

В качестве примера работы созданного программного комплекса ГИС на рис. 5 показаны результаты расчета уровней транспортной доступности для населения Республики Бурятия. Цветом выделены территории Бурятии с разным уровнем транспортной доступности столицы республики г. Улан-Удэ. Рядом с картой отображается шкала уровней транспортной доступности столицы республики, а также распределение численности населения республики, для которой характерны эти уровни транспортной доступности. На карте отображены административные центры территориальных единиц республики, аэродромы и существующие в настоящее время линии МВЛ. Кроме того, штриховкой показаны те территории, населению которых предпочтительнее (с точки зрения затрат времени) использовать авиационный транспорт для поездок в столицу республики. Как можно видеть на этом примере, в зоне 4-часовой поездки до г. Улан-Удэ проживает 76,8 % населения республики Бурятия.

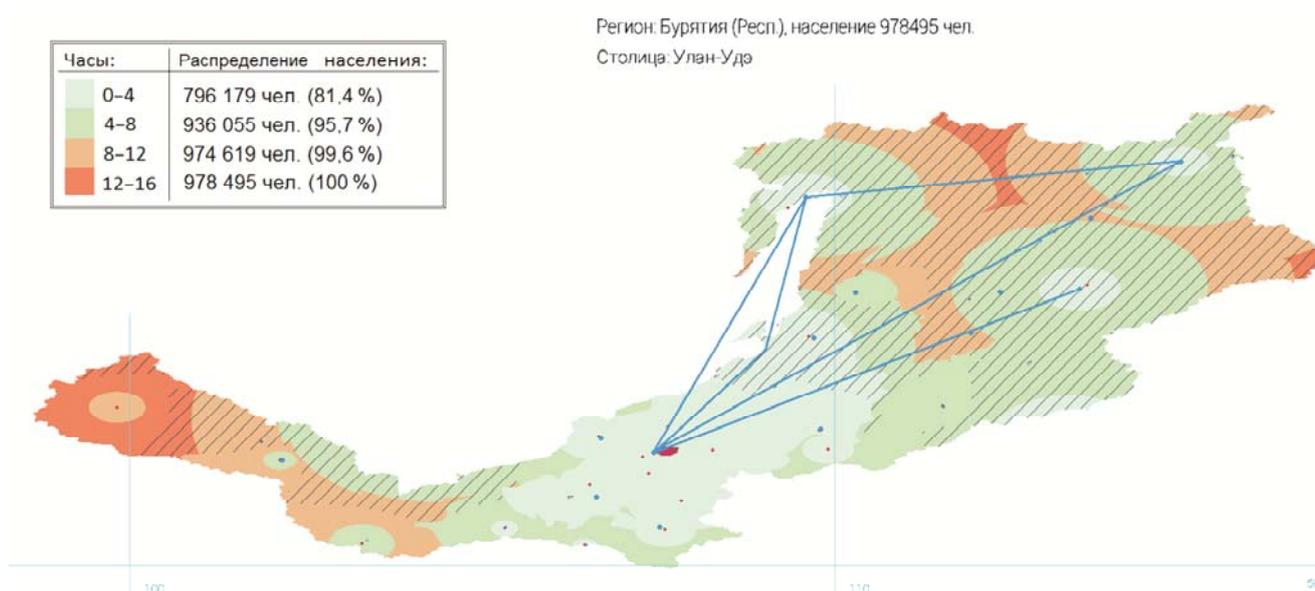


Рис. 5. Пример отображения с помощью ГИС уровней транспортной доступности для населения республики Бурятия

Fig. 5. An example of using GIS to represent the air transport accessibility levels for the population of the Republic of Buryatia

<sup>5</sup> Результаты всероссийской переписи населения 2014 года (открытые данные) [Электронный ресурс] // Федеральная служба государственной статистики: офиц. сайт. URL: <http://gks.ru/opendata/dataset/7708234640-ca-08-001> (дата обращения: 12.04.2017).

<sup>6</sup> Российский статистический ежегодник 2015: статистический сборник. М.: Росстат, 2015. 728 с.

<sup>7</sup> Интернет-портал Яндекс, сервисы «Яндекс-Карты» и «Яндекс-Пробки» [Электронный ресурс]. URL: <https://yandex.ru> (дата обращения: 01.09.2017–15.09.2017).

<sup>8</sup> ESRI [Электронный ресурс]: офиц. сайт. URL: <https://www.esri.com/arcgis/about-arcgis/> (дата обращения: 24.11.2016).

## АНАЛИЗ ТРАНСПОРТНОЙ ДОСТУПНОСТИ И ТРАНСПОРТНОЙ ДИСКРИМИНАЦИИ В СУБЪЕКТАХ РФ

С помощью созданного программного комплекса были выполнены расчеты транспортной доступности для всех субъектов РФ. Результаты проведенных расчетов приведены в табл. 1.

**Таблица 1**  
**Table 1**

Результаты расчета авиатранспортной доступности и транспортной дискриминации населения в субъектах РФ

The results of the calculation of air transport accessibility and transport discrimination of the population in subjects of the Russian Federation

Показатели транспортной доступности и транспортной дискриминации	Пороговый уровень транспортной доступности, $T_c$				
	3 часа	4 часа	5 часов	6 часов	7 часов
<b>Транспортная ситуация в отсутствие МВЛ</b>					
Количество субъектов РФ, где фиксируется транспортная дискриминация населения	63	50	39	31	25
Количество территориальных единиц* субъектов РФ, в которых транспортная дискриминация населения фиксируется на всей территории	741	462	319	236	173
Численность населения, проживающего на территориях, где фиксируется транспортная дискриминация, млн чел.	25,8	15,0	9,6	7,0	5,3
Транспортная дискриминация населения России $D_H$	17,6 %	10,3 %	6,6 %	4,8 %	3,6 %
Транспортная дискриминация территории России $D_{HS}$	82,8 %	77,2 %	72,5 %	68,5 %	65,0 %
<b>Транспортная ситуация с учетом МВЛ</b>					
Количество субъектов РФ, где фиксируется транспортная дискриминация населения	63	47	34	27	18
Количество территориальных единиц* субъектов РФ, в которых транспортная дискриминация населения фиксируется на всей территории	605	316	177	102	58
Численность населения, проживающего на территориях, где фиксируется транспортная дискриминация, млн чел.	19,6	9,8	5,4	3,0	1,9
Транспортная дискриминация населения России $D_A$	13,4 %	6,7 %	3,7 %	2,1 %	1,3 %
Численность населения, проживающего на территориях, где благодаря организации сети МВЛ удалось устранить транспортную дискриминацию, млн чел.	6,2	5,2	4,2	4,0	3,4
Транспортная дискриминация территорий России $D_{AS}$	80,0 %	71,2 %	63,2 %	56,3 %	50,6 %

\* Здесь и далее в таблице территориальной единицей называется муниципальный район, городской округ или закрытое территориальное образование.

В табл. 1 формулировка «в которых транспортная дискриминация населения фиксируется на всей территории» означает, что существуют территориальные единицы, в которых городское население административного центра не подвержено транспортной дискриминации, в то время как для некоторой части сельской территории района или округа она наблюдается. Количество таких территориальных единиц отдельно не подсчитывалось, хотя проживающее в них население корректно учтено в соответствии с методикой.

Наиболее целесообразным значением параметра МСТС является  $T_c = 4$  ч. При таком  $T_c$  существенно уменьшается количество административных центров, требующих создания МВЛ, и из рассмотрения исключается большинство европейских регионов РФ, в которых благодаря развитой инфраструктуре наземного транспорта проблемы транспортной доступности в местном сообщении в значительной степени решены. Также при таком  $T_c$  для целого ряда субъектов РФ в настоящее время транспортная дискриминация населения устранена благодаря организации сети местных воздушных линий (табл. 1).

При  $T_c = 3$  ч транспортная дискриминация фиксируется даже в столичном регионе. Безусловно, можно считать приемлемым и значение параметра МСТС  $T_c = 5$  ч. Однако целью введения транспортного стандарта является постепенное повышение мобильности населения в России. С этой точки зрения, чем меньше время поездки, тем выше качество предоставляемых транспортных услуг.

На рис. 6 показано, какое влияние организация местных авиаперевозок оказывает на улучшение транспортной доступности в субъектах РФ. На настоящий момент авиация МВЛ обеспечивает выполнение МСТС только для одной трети населения, подверженного транспортной дискриминации при  $T_c = 4$  ч (рис. 6).

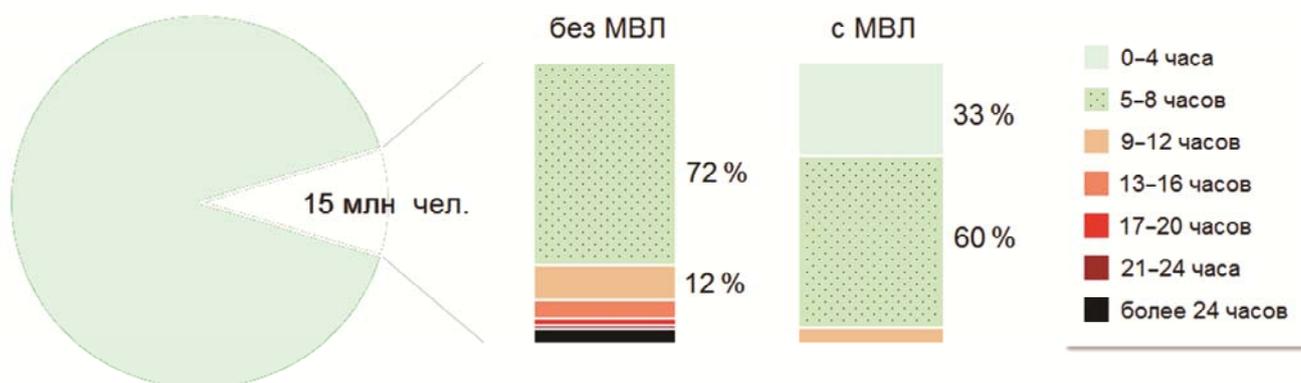


Рис. 6. Влияние организации сети МВЛ на улучшение транспортной доступности в субъектах РФ в настоящее время (распределение численности населения РФ по уровням транспортной доступности)

Fig. 6. The influence of local airline network on the improvement of current transport accessibility in subjects of the Russian Federation (distribution of the Russian Federation population according to the levels of transport accessibility)

В то же время можно сделать приближенную оценку минимального количества МВЛ, необходимого для полного устранения транспортной дискриминации населения в субъектах РФ при  $T_c = 4$  ч. Если исходить из количества территориальных единиц субъектов РФ, которые должны быть охвачены местными воздушными перевозками (т. е. территориальных единиц, в которых фиксируется транспортная дискриминация населения), то суммарное количество МВЛ в стране должно составлять 462 линии (табл. 1). В настоящее время авиационным транспортом охвачено в субъектах РФ 146 территориальных единиц. Для выполнения МСТС с  $T_c = 4$  ч на всей территории страны необходимо организовать в субъектах РФ еще 316 местных воздушных линий. Приведенные оценки с погрешностью до 10 % совпадают с ранее полученными результатами [9, 10]. В то же время оценка численности населения, подверженного транспортной дискриминации в местном сообщении с учетом МВЛ при  $T_c = 4$  ч, заметно меньше, чем 15 млн человек, указанные в [11].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования транспортной доступности позволяют сделать следующие выводы.

1. При использовании только наземного транспорта уровень транспортной доступности столицы субъекта РФ превышает 4 часа для населения, проживающего на территории 462 муниципальных районов и городов областного подчинения в 50 субъектах РФ. Большинство таких территориальных единиц относятся к труднодоступным территориям Северо-Западного, Уральского, Сибирского и Дальневосточного федеральных округов России.

2. Использование воздушного транспорта позволяет улучшить транспортную доступность населения почти в 33 % указанных выше районов. В настоящее время транспортной дискриминации в местном сообщении (время поездки до административного центра субъекта РФ превышает 4 часа) подвергается не менее 10 млн человек, что составляет около 7 % от общей численности населения России.

Разработанный программный комплекс для исследования транспортной доступности в субъектах РФ предполагается в дальнейшем использовать в качестве базовой основы при создании инструментария для решения задач, связанных с оценкой эффективности технологий создания перспективных ЛА для местных воздушных линий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Панкратова А.Р.** Проблемы развития авиаперевозок в дальневосточном регионе // Экономика и управление. 2015. № 12(122). С. 23–28.
2. **Борзова А.С., Железная И.П.** К вопросу о развитии региональной аэропортовой инфраструктуры // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 217(7). С. 23–26.
3. **Дунаевский А.И.** Формирование облика семейства легких многоцелевых самолетов для местных воздушных линий России / Ю.С. Михайлов, А.В. Редькин, С.Л. Чернышев // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2013. № 8. С. 72–79.
4. **Михайлов Ю.С.** Концепция легкого грузопассажирского самолета короткого взлета и посадки для местных воздушных линий / А.В. Петров, Е.А. Пигусов, В.И. Черноусов, А.И. Кишалов, В.И. Бирюк, В.А. Тунцев // Материалы XXV научно-технической конференции по аэродинамике, 27–28 февраля, 2014 г. / Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского. С. 192–194.
5. **Фрайман А.** Опыт США в авиационном обслуживании малых населенных пунктов [Электронный ресурс] // Деловой информационный портал. URL: <https://www.ato.ru/content/opyt-ssha-v-aviacionnom-obsluzhivanii-malyh-naseleennyh-punktov> (дата обращения: 01.03.2018).
6. **Бугроменко В.Н.** Что стоит за сменой парадигм? [Электронный ресурс] // Транспорт России: всероссийская транспортная еженедельная информационно-аналитическая газета. URL: <http://transportrussia.ru/item/161-chto-stoit-za-smenoi-paradigm.html> (дата обращения: 16.06.2017).
7. **Ковалева Е.Н.** Интегральная транспортная доступность как показатель качества транспортного обслуживания // Журнал университета водных коммуникаций. 2011. Вып. 3. С. 171–175.
8. Географические информационные системы и дистанционное зондирование [Электронный ресурс]. URL: <http://gis-lab.info/qa/osmshp.html> (дата обращения: 21.11.2016).
9. **Балашов В.В., Смирнов А.В., Цейтлина Т.О.** Формирование перспективной сети местных воздушных линий России // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2013. № 2. С. 170–176.

**10. Балашов В.В., Смирнов А.В., Цейтлина Т.О.** Оценка состава перспективного парка воздушных судов местных авиалиний России // Материалы XXV научно-технической конференции по аэродинамике, 27–28 февраля, 2014 г. / Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского. С. 46–47.

**11. Смирнов О.М.** Пути развития региональных авиаперевозок в РФ [Электронный ресурс] // Наука и транспорт. Гражданская авиация. URL: [https://www.rostransport.com/science\\_transport/pdf/7/32-35.pdf](https://www.rostransport.com/science_transport/pdf/7/32-35.pdf) (дата обращения: 01.03.2018).

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Егошин Сергей Федорович**, инженер ФГУП «Центральный аэродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского», [sergey4791@yandex.ru](mailto:sergey4791@yandex.ru).

**Смирнов Андрей Валентинович**, кандидат технических наук, начальник отдела ФГУП «Центральный аэродинамический институт им. проф. Н.Е. Жуковского», [smirnov@tsagi.ru](mailto:smirnov@tsagi.ru).

## AIR TRANSPORT ACCESSIBILITY AND TRANSPORT DISCRIMINATION OF POPULATION IN CONSTITUENTS OF THE RUSSIAN FEDERATION

**Sergey F. Egoshin<sup>1</sup>, Andrey V. Smirnov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Central Aerohydrodynamic Institute named after prof. N.E. Zhukovsky, Zhukovsky, Russia*

The article deals with the introduction of numerical indicators for the notions "the air transport accessibility" and "the transport discrimination of the population" as applied to the local (suburban) traffic. Due to significant financial cost of air service, the local airlines are essential only in those regions of the Russian Federation, where the low-cost ground traffic is impossible. Thereby, the air transport accessibility should be considered as paired accessibility "the regional center - the capital of the constituent of the Russian Federation". This fact imposes restrictions on those indicators that can be applied to the relevant numerical estimates. A technique has been developed for numerical estimation of transport accessibility and transport discrimination of the population using the notions "transport accessibility levels" and "minimum social transport standard". The results of calculations with a software package based on geoinformation system are presented. It is shown that when using only the ground transport, the capital transport accessibility level of the constituent of the Russian Federation exceeds four hours for residents including more than 450 municipal and urban districts in 50 constituents of the Russian Federation. The most of these territorial entities belong to the hard-to-reach territories of Northwestern, Ural, Siberian and Far Eastern Federal Districts of Russia. The total population of these entities is about 15 million people, which is more than 10% of the total population of Russia. The existing local airlines can solve the transportation problems in local traffic for about 5 million people. To ensure four-hour level of transport accessibility for the rest of the population, it is necessary to organize at least 300 local airlines in the constituents of the Russian Federation.

**Key words:** transport accessibility, suburban traffic, minimum social transport standard, transport discrimination of population, local airlines

### REFERENCES

- 1. Pankratova, A.R.** (2015). *Problemy razvitiya aviaperevozok v dal'nevostochnom regione* [Problems of Air Transportation in the Russian Far East]. *Ekonomika i upravlenie* [Economics and Management], no. 122(12), pp. 23–28. (in Russian)
- 2. Borzova, A.S. and Zheleznaya, I.P.** (2015). *K voprosu o razvitii regional'noy aeroportovoy infrastruktury* [The Development of Regional Airport Infrastructure]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 7(217), pp. 23–26. (in Russian)
- 3. Dunaevskiy, A.I., Mikhaylov, Y.S., Red'kin, A.V. and Chernyshev, S.L.** (2013). *Formirovaniye oblika semeystva legkikh mnogotsel'nykh samoletov dlya mestnykh vozdukhnykh liniy*

Rossii [Definition of Configuration for a Family of Light Multipurpose Aircraft for Local-Service Airlines of Russia]. *Polet. Obscherossiyskiy nauchno-tekhnicheskiy zhurnal* [Flight, All-Russian Scientific and Technical Journal], no. 8, pp. 72–79. (in Russian)

4. **Mikhaylov, Yu.S., Petrov, A.V., Pigusov, E.A., Chernousov, V.I., Kishalov, A.I., Biryuk, V.I. and Tuntsev, V.A.** (2014). *Kontsepsiya legkogo gruzopassazhirskogo samoleta korotkogo vzleta i posadki dlya mestnykh vozdushnykh liniy* [The Concept of a Light Cargo-and-Passenger STOL Aircraft for Local Airlines]. *Materialy XXV nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po aerodinamike, Tsentral'nyy gidroaerodinamicheskiy institut im. Prof. N.E. Zhukovskogo, 27–28 fevralya, 2014* [The Proceedings of the XXV Scientific and Technical Aerodynamics Conference, Central Aerohydrodynamic Institute named after Prof. N.E. Zhukovsky, 27–28 February, 2014]. Zhukovskiy, pp. 192–194.

5. **Frayman, A.** *Opyt SSHA v aviatsionnom obsluzhivanii malykh naseleennykh punktov* [US Experience in Aviation Services for Small Settlements]. Business Information Portal. Available at: <https://www.ato.ru/content/opyt-ssha-v-aviacionnom-obsluzhivanii-malyh-naseleennykh-punktov> (accessed 01.03.2018).

6. **Bugromenko, V.N.** *Chto stoit za smenoy paradigm?* [What is behind the paradigm shift?]. Transport of Russia All-Russian Transport Weekly Information and Analytical Newspaper. Available at: <http://transportrussia.ru/item/161-chto-stoit-za-smenoy-paradigm.html> (accessed 16.06.2017).

7. **Kovaleva, E.N.** (2011). *Integral'naya transportnaya dostupnost' kak pokazatel' kachestva transportnogo obsluzhivaniya* [Integral Transport Accessibility as a Quality Level of Transport Services]. *Zhurnal universiteta vodnykh kommunikatsiy* [Journal of the University of Water Communications], vol. 3, pp. 171–175. (in Russian)

8. **Balashov, V.V., Smirnov, A.V. and Tseytlina, T.O.** (2013). *Formirovanie perspektivnoy seti mestnykh vozdushnykh liniy Rossii* [The Development of a Perspective Network of Russian Local Airlines]. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva*, no. 2, pp. 170–176.

9. **Balashov, V.V., Smirnov, A.V. and Tseytlina, T.O.** (2014). *Otsenka sostava perspektivnogo parka vozdushnykh sudov mestnykh avialiniy Rossii* [The Evaluation of a Perspective Fleet Composition of the Russian Local Airlines]. *Materialy XXV nauchno-tekhnicheskoy konferentsii po aerodinamike, Tsentral'nyy gidroaerodinamicheskiy institut im. Prof. N.E. Zhukovskogo, 27–28 fevralya, 2014* [The Proceedings of the XXV Scientific and Technical Aerodynamics Conference, Central Aerohydrodynamic Institute named after Prof. N.E. Zhukovsky, 27–28 February, 2014]. Zhukovskiy, pp. 46–47.

10. **Smirnov, O.M.** *Puti razvitiya regional'nykh aviaperevozok v RF* [Development Trends for Regional Air Transportation in the Russian Federation]. *Nauka i transport. Grazhdanskaya aviatsiya* [Science and Transport, Civil Aviation]. Available at: [https://www.rostransport.com/science\\_transport/pdf/7/32-35.pdf](https://www.rostransport.com/science_transport/pdf/7/32-35.pdf) (accessed 01.03.2018).

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Sergey F. Egoshin**, Engineer, FSUE "Central Aerohydrodynamic Institute named after Prof. N.E. Zhukovsky", [sergey4791@yandex.ru](mailto:sergey4791@yandex.ru).

**Andrey V. Smirnov**, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department at FSUE "Central Aerohydrodynamic Institute named after Prof. N.E. Zhukovsky", [smirnov@tsagi.ru](mailto:smirnov@tsagi.ru).

Поступила в редакцию 23.03.2018  
Принята в печать 15.05.2018

Received 23.03.2018  
Accepted for publication 15.05.2018

**АВИАЦИОННАЯ И РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА**

УДК 532.5:629.734

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-91-100

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК  
АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ  
ДВУХОБОЛОЧКОВЫХ ПЛАНИРУЮЩИХ ПАРАШЮТОВ**

**В.В. ОВЧИННИКОВ<sup>1</sup>, Ю.В. ПЕТРОВ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> *Академия государственной противопожарной службы МЧС РФ, г. Москва, Россия*

<sup>2</sup> *Московский государственный технический университет гражданской авиации,  
г. Москва, Россия*

В настоящее время двухоболочковые планирующие парашюты (ДПП) находят достаточное широкое практическое применение, в том числе для решения транспортных задач. Двухоболочковый парашют представляет собой мягкое крыло, форма которого поддерживается скоростным напором в потоке, и является сложнейшей аэроупругой системой. Для определения аэродинамических характеристик такой системы необходимо привлечение методов нелинейной аэродинамики и нелинейной теории упругости, что обуславливает существенные вычислительные затруднения. В данной работе исследуются аэродинамические характеристики установившихся форм различных планирующих парашютов, предложена расчетно-экспериментальная методика их расчета. Показано, что замена объемного профиля ДПП его срединной поверхностью позволяет получать результаты, правильно отражающие качественные эффекты отрывного и безотрывного обтекания. Это приводит к предположению, что такая замена возможна и для получения данных об основных закономерностях обтекания парашютных крыльев конечного размаха. Данные по аэродинамическим характеристикам установившихся форм ДПП позволяют выявить закономерности их изменения в зависимости от раскройной формы парашюта, деформаций его поверхности, вызванных набегающим потоком или управляющими воздействиями. Для решения задачи об обтекании планирующего парашюта потоком воздуха используется метод дискретных вихрей с замкнутыми рамками, который позволяет вычислять аэродинамические характеристики парашютов. Рассматривается обтекание срединной поверхности установившейся формы двухоболочкового планирующего парашюта потоком идеальной несжимаемой жидкости. Проницаемость ткани парашюта не учитывается, т. к. верхнее и нижнее полотнища ДПП выполняются либо из слабо проницаемой, либо из непроницаемой ткани. При отрывном обтекании аэродинамические коэффициенты определяются путем усреднения по времени после расчета до его больших значений. Приводятся результаты расчетов. Показана возможность применения предложенной методики для расчета аэродинамических характеристик ДПП в диапазонах углов атаки до 10° и свыше 20° по упрощенной расчетной схеме с точностью около 10%. В то же время выявлено, что с увеличением удлинения мягкого крыла важно учитывать его арочность для более точного определения аэродинамических характеристик. Предлагаемая методика может использоваться для оперативных оценок аэродинамических сил на этапе проектирования и при планировании трубного эксперимента. Полученные результаты могут оказаться полезными при проектировании ДПП, при постановке и проведении трубных экспериментов.

**Ключевые слова:** аэродинамика, парашют, двухоболочковый планирующий парашют, метод дискретных вихрей.

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время двухоболочковые планирующие парашюты (ДПП) находят все более широкое применение при решении различных народнохозяйственных задач. Их возможности уже сейчас позволяют доставлять грузы весом до нескольких тонн на расстояние свыше 30 км и осуществлять их мягкую управляемую посадку.

Известно большое количество экспериментальных работ, связанных с определением динамических и аэродинамических характеристик ДПП, как, например, [1–5], а также многочисленные исследования в области динамики ДПП с известными аэродинамическими характеристиками [6]. В то же время число работ в области расчетного определения аэродинамических характеристик ДПП ограничено, причем в основном решается задача об обтекании парашюта в плоской постановке. Это обусловлено тем, что ДПП представляет собой фактически мягкое крыло, форма которого поддерживается скоростным напором в потоке, и является сложнейшей аэроупругой системой. Для точного определения характеристик такой системы необходимо

привлечение методов нелинейной аэродинамики и нелинейной теории упругости, что обуславливает существенные вычислительные затруднения. Важные исследования в этой области проводились в ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, НИИ Парашютостроения, МГУ, ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского (см., например, [7–9]) на основе вихревых методов. В 2001 г. одним из авторов статьи был предложен подход к моделированию двухоболочкового парашюта его срединной поверхностью для анализа аэродинамических характеристик [10]. Подобный подход развит и подробно исследован в работе [11], в которой кроме аэродинамического нагружения рассматривается также задача формообразования парашюта. Настоящая статья посвящена разработке на этой основе оперативной методики расчета аэродинамических характеристик ДПП с опорой на экспериментальные данные.

В работе исследуются аэродинамические характеристики установившихся форм различных планирующих парашютов и выясняются некоторые особенности методики их расчета. Данные по аэродинамическим характеристикам установившихся форм ДПП позволяют выявить закономерности их изменения в зависимости от раскройной формы парашюта, деформаций его поверхности, вызванных набегающим потоком или управляющими воздействиями. Полученные результаты могут оказаться весьма полезными при проектировании ДПП, при постановке и проведении трубных экспериментов.

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для решения задачи об обтекании парашюта потоком воздуха используется метод дискретных вихрей с замкнутыми рамками [12], с помощью которого достигнут прогресс в определении аэродинамических характеристик парашютов. Если построить вихревую схему раскройной формы ДПП для метода дискретных вихрей с замкнутыми рамками, то она будет иметь вид, показанный на рис. 1 (здесь показана упрощенная вихревая схема ДПП ПО-9). Из этого рисунка видно, что в задней части крыла рамки, моделирующие верхнюю и нижнюю поверхности парашюта, находятся весьма близко друг к другу. При методических исследованиях, проведенных для плоских профилей, аналогичных профилям планирующих парашютов, было установлено, что для получения достоверных характеристик необходимо размещать не менее 30–40 дискретных вихрей (в трехмерном случае – рамок) по хорде на каждой поверхности (верхней и нижней) профиля. Следовательно, при исследовании трехмерных нестационарных задач (особенно с учетом отрыва потока) требуются большие затраты машинного времени и дополнительные меры по обеспечению устойчивости вычислительного процесса. Поэтому в данной работе принято дополнительное упрощение: вихревая схема строится для срединной поверхности планирующего парашюта (в общем случае деформированного), т. е. ДПП моделируется тонкой несущей поверхностью. Такая вихревая схема для парашюта ПО-9 показана на рис. 2.

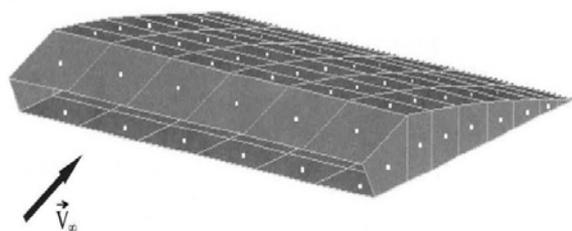


Рис. 1. Вихревая схема планирующего парашюта  
Fig. 1. A vortex model of the paraglider

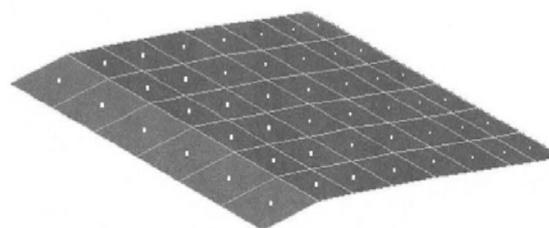
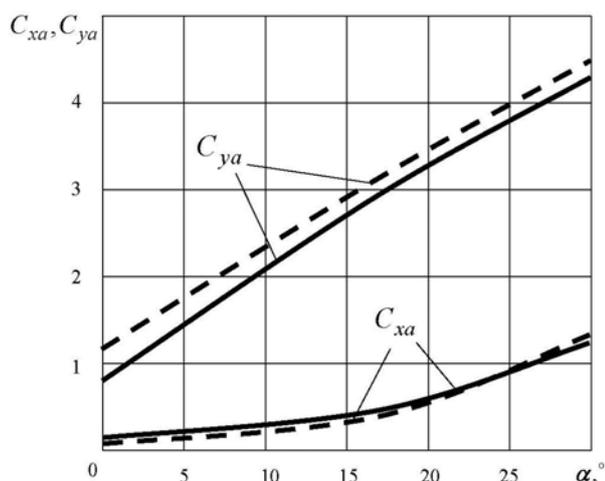
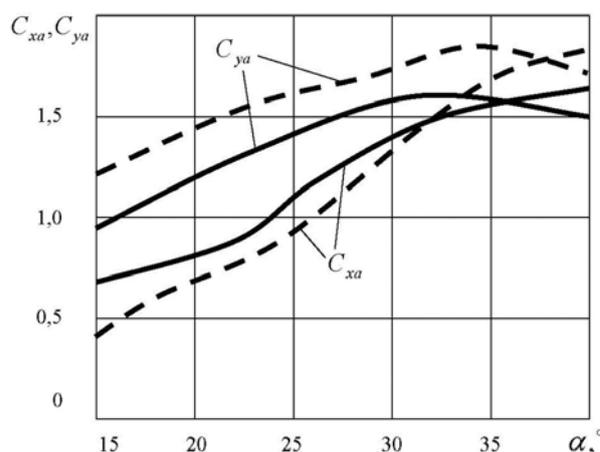


Рис. 2. Вихревая схема для срединной поверхности планирующего парашюта  
Fig. 2. A vortex model for median surface of the paraglider

Косвенно подтверждают допустимость такой замены на этапе проектирования результаты, приведенные на рис. 3 и 4, где сплошной линией показан результат расчета полной модели (рис. 1), а штриховой – для срединной поверхности (рис. 2).



**Рис. 3.** Аэродинамические характеристики профиля ДПП (сплошная линия) и его упрощенной модели (штриховая линия) при безотрывном плоскопараллельном обтекании  
**Fig. 3.** Aerodynamic characteristics of the TSP foil (solid line) and its simplified model (dashed line) at attached plane-parallel flow



**Рис. 4.** Аэродинамические характеристики профиля ДПП (сплошная линия) и его срединной поверхности (штриховая линия) при отрывном обтекании  
**Fig. 4.** Aerodynamic characteristics of the TSP foil (solid line) and its median surface (dashed line) at separated flow

Так, на рис. 3 показаны аэродинамические характеристики профиля ДПП и его срединной поверхности при безотрывном плоскопараллельном обтекании. Видно, что погрешность определения коэффициентов подъемной силы  $C_{ya}$  и силы сопротивления  $C_{xa}$  при замене профиля срединной поверхностью не превышает 5–7 %. Характер зависимости полностью сохранен, и все существенные эффекты могут быть выявлены.

На рис. 4 представлены аналогичные зависимости для отрывного обтекания профиля и его срединной поверхности. Здесь погрешность определения аэродинамических характеристик профиля по упрощенной расчетной схеме не превышает 10–15 %.

Таким образом, замена профиля ДПП его срединной поверхностью позволяет получать результаты, правильно отражающие качественные эффекты отрывного и безотрывного обтекания. Это приводит к предположению, что такая замена возможна и для получения данных об основных закономерностях обтекания парашютных крыльев конечного размаха.

Итак, будем рассматривать обтекание срединной поверхности установившейся формы двухболочкового планирующего парашюта потоком идеальной несжимаемой жидкости. Проницаемость ткани парашюта не учитывается, т. к. верхнее и нижнее полотнища ДПП выполняются либо из слабопроницаемой, либо из непроницаемой ткани, так что на первом этапе исследований их проницаемостью можно пренебречь (впрочем, в случае необходимости она учитывается путем хорошо известных модификаций граничных условий задачи [13]). При отрывном обтекании аэродинамические коэффициенты определяются путем усреднения по времени после расчета до его больших значений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

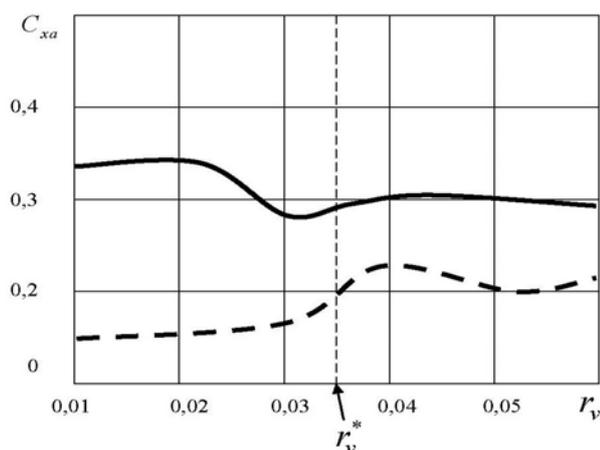
Рассматривался парашют типа ПО-9, для которого существуют достаточно обширные экспериментальные данные ЦАГИ<sup>1</sup>, а также различные масштабные модели парашютных кры-

<sup>1</sup> Исследование парашютного крыла в аэродинамической трубе Т-101 ЦАГИ. НТО ЦАГИ № 3415. М.: ЦАГИ, 1976. 76 с.

льев, экспериментально определенные аэродинамические характеристики которых приводятся в подробном отчете по итогам трубных испытаний [1].

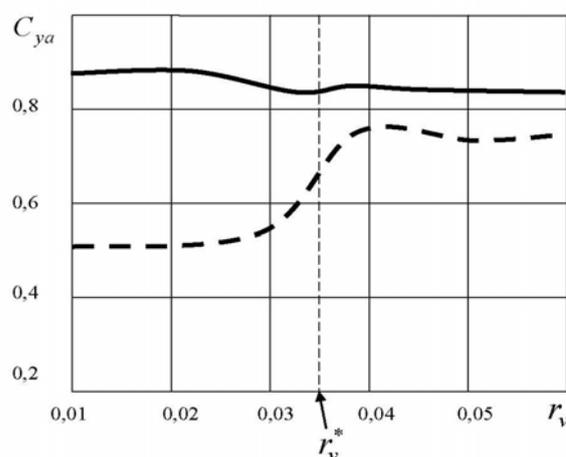
В связи с тем, что расчеты проводились как для безотрывного, так и для отрывного обтекания, кажется целесообразным остановиться здесь на способе выбора такого параметра, как «радиус вихря». Как известно, под «радиусом вихря» в трехмерных задачах метода дискретных вихрей понимают минимальное расстояние от вихревого отрезка, на котором он еще оказывает влияние. Если некоторая точка находится на меньшем расстоянии от вихревого отрезка, то считается, что он не индуцирует в ней никакой скорости. Хотя «радиус вихря» может существенно влиять на численные значения аэродинамических характеристик (особенно при отрывном обтекании, когда от его величины зависит форма свободной вихревой пелены вследствие образования обширных зон распределенной завихренности рядом с несущей поверхностью), способы выбора этой величины и их обоснование для трехмерных задач практически не освещены в литературе. В данном случае, когда делается попытка расчета аэродинамических характеристик ДПП в трехмерной постановке, эту проблему стоит рассмотреть подробнее.

Способ выбора величины «радиуса вихря» в настоящей работе иллюстрируется рис. 5 и 6. На них изображены зависимости расчетных значений аэродинамических коэффициентов сопротивления и подъемной силы ( $C_{xa}$ ,  $C_{ya}$ ) парашюта ПО-9 от радиуса вихря  $r_v$  при безотрывном и отрывном обтекании. Хорошо видно, что при безотрывном обтекании (сплошные линии на рисунках) коэффициенты  $C_{xa}$ ,  $C_{ya}$  почти не зависят от величины  $r_v$ , при отрывном же обтекании существует некоторое значение  $r_v$ , которому соответствует их резкий скачок. В ходе методических исследований было установлено, что чаще всего этот скачок соответствует моменту, когда  $r_v$  становится меньше половины минимального размера вихревой рамки на несущей поверхности. Таким образом, можно выделить «критическое» значение величины  $r_v^*$ , вне небольшой окрестности которого зависимость аэродинамических характеристик от «радиуса вихря» невелика.



**Рис. 5.** Зависимость коэффициента сопротивления парашюта ПО-9 от радиуса вихря  $r_v$  при безотрывном (сплошная линия) и отрывном (штриховая линия) обтекании

**Fig. 5.** Dependence of the drag coefficient of PO-9 paraglider on  $r_v$  vortex radius at attached flow (solid line) and at separated flow (dashed line)



**Рис. 6.** Зависимость коэффициента подъемной силы парашюта ПО-9 от радиуса вихря  $r_v$  при безотрывном (сплошная линия) и отрывном (штриховая линия) обтекании

**Fig. 6.** Dependence of the lift coefficient of PO-9 paraglider on  $r_v$  vortex radius at attached flow (solid line) and at separated flow (dashed line)

Кроме того, из рис. 5, 6 хорошо видно, что для значений  $r_v > r_v^*$  величины коэффициентов  $C_{xa}$ ,  $C_{ya}$  при наличии и отсутствии отрыва близки (для  $C_{ya}$  разница не превышает 15 %), в

то время как при  $r_v < r_v^*$  (на этих рисунках  $r_v^* \approx 0,035$ ) различие между этими коэффициентами весьма существенно. Можно предположить, что при больших значениях величины  $r_v$  ослабевает взаимное влияние вихревых отрезков пелены друг на друга и вихревую систему объекта, вследствие чего нагрузки на него оказываются слабо зависящими от формы пелены и приближаются к таковым в случае безотрывного обтекания. Поэтому в данной работе считалось, что при отрывном обтекании «радиус вихря» должен быть  $r_v < r_v^*$ , причем в достаточной мере удален от «критического значения»  $r_v^*$ .

На рис. 7 и 8 показаны результаты расчетов аэродинамических характеристик полужесткой модели парашютного крыла (поверхности изготовлены из малопроницаемой ткани, нервюры – из дюралюминия) в сравнении с экспериментом [1] (величина угла атаки ДПП в потоке при замене парашютного крыла его срединной поверхностью определялась согласно схеме, показанной на рис. 9).

Из рис. 7 видно, что коэффициент подъемной силы модели, рассчитанный согласно данной методике, очень мало отличается от эксперимента для малых углов атаки ( $\alpha \leq 10^\circ$ ). При больших значениях  $\alpha$  различие между расчетными и экспериментальными данными нарастает. Когда угол атаки достигает значений  $\alpha \geq 20^\circ$ , то, как следует из того же рисунка, неплохое совпадение дает расчет по схеме отрывного обтекания (отрыв в районе максимальной кривизны крыла). Область значений угла атаки  $10^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$  является переходной, и для определения аэродинамических характеристик здесь возможно использование моделей, позволяющих определить место отрыва потока с поверхности крыла, как, например, описанных в [14, 15].

Часть разницы аэродинамических характеристик может быть отнесена на счет сопротивления стропной системы парашюта. Тем не менее расчетная и экспериментальная кривые практически эквидистантны в рассматриваемом диапазоне углов атаки, и, значит, имея всего одну экспериментальную точку, можно внести в результаты расчета нужные поправки. Кроме того, на этапе первоначального проектирования конструктору часто необходимо знать лишь качественные данные, которые позволяет получить описываемая методика.

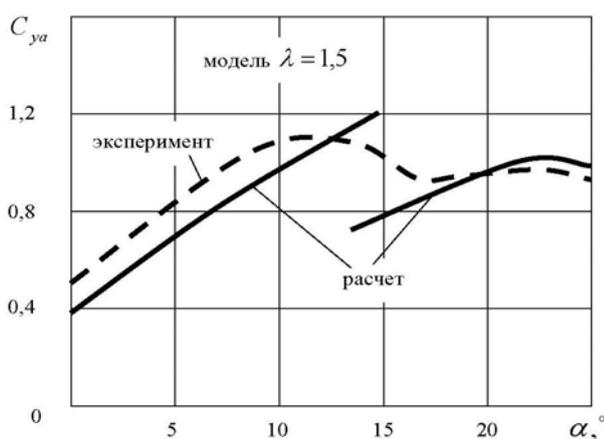


Рис. 7. Расчетные и экспериментальные значения коэффициента подъемной силы полужесткой модели парашютного крыла

Fig. 7. Computed and experimental values of the lift coefficient of a semi-rigid model of the paraglider wing

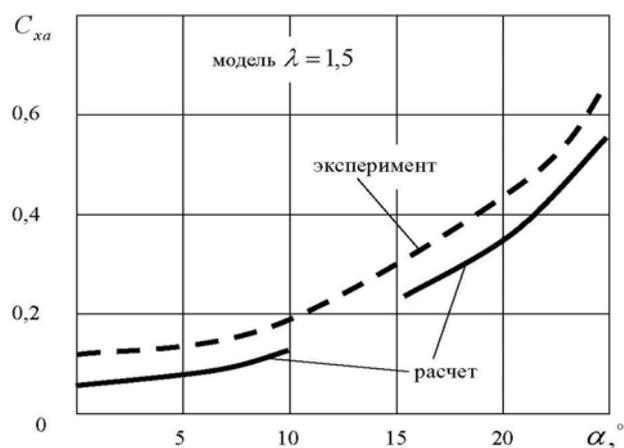
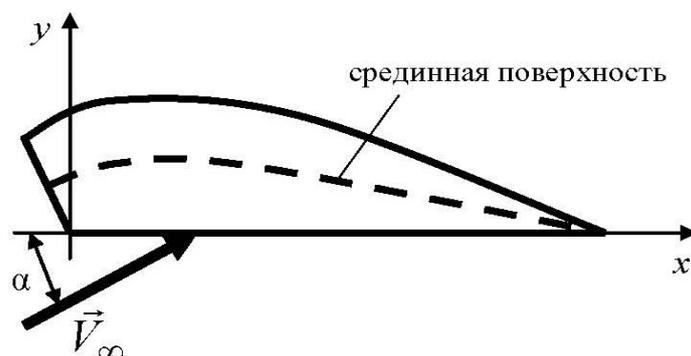


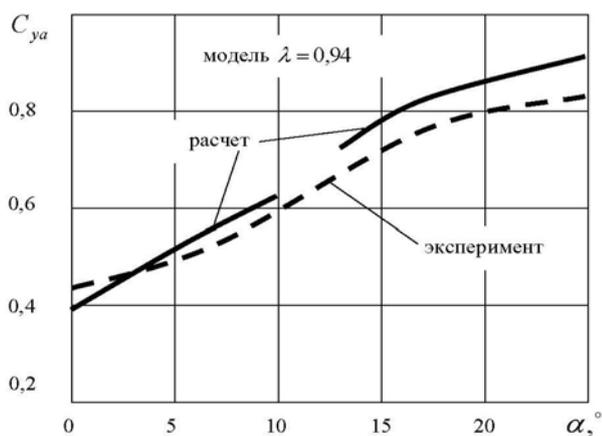
Рис. 8. Расчетные и экспериментальные значения коэффициента сопротивления полужесткой модели парашютного крыла

Fig. 8. Computed and experimental values of the drag coefficient of a semi-rigid model of the paraglider wing



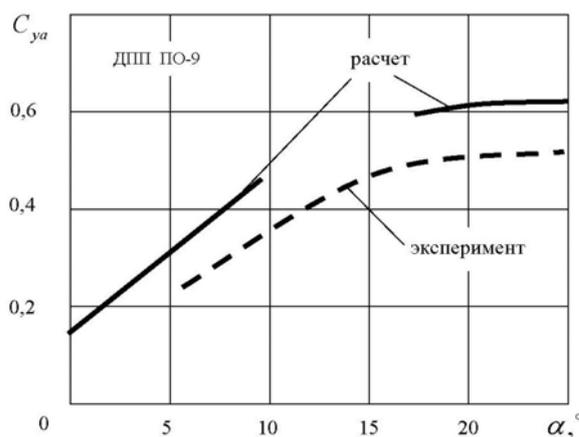
**Рис. 9.** Определение угла атаки при замене парашютного крыла его срединной поверхностью  
**Fig. 9.** Determination of the angle of attack while changing a paraglider wing by its median surface

С помощью предложенной методики проводился расчет мягких парашютных крыльев. При этом применялась расчетная схема срединной поверхности раскройной формы парашюта, как и в предыдущих случаях. На рис. 10 показана расчетная зависимость коэффициента подъемной силы мягкой модели парашютного крыла малого удлинения ( $\lambda = 0,94$ ) в сравнении с экспериментом [1]. Видно удовлетворительное согласование с результатами эксперимента вне переходной области углов атаки ( $10^\circ \leq \alpha \leq 20^\circ$ ). На рис. 11 показаны расчетные зависимости коэффициента подъемной силы планирующего парашюта ПО-9 (удлинение  $\lambda = 1,24$ ) в сравнении с экспериментальными данными ЦАГИ<sup>1</sup>.



**Рис. 10.** Расчетные и экспериментальные зависимости коэффициента подъемной силы мягкой модели парашютного крыла

**Fig. 10.** Computed and experimental dependences of the lift coefficient on a flexible model of the paraglider wing



**Рис. 11.** Расчетные и экспериментальные зависимости коэффициента подъемной силы планирующего парашюта ПО-9

**Fig. 11.** Computed and experimental dependences of the lift coefficient of PO-9 paraglider wing

Видно, что в данном случае предлагаемая методика дает завышенные результаты как при расчете по отрывной, так и по безотрывной схеме обтекания, чего не наблюдалось у мягкого крыла меньшего удлинения. Это можно объяснить тем, что с увеличением масшта-

<sup>1</sup> Исследование парашютного крыла в аэродинамической трубе Т-101 ЦАГИ. НТО ЦАГИ № 3415. М.: ЦАГИ, 1976. 76 с.

бов мягкого крыла влияние его деформации в потоке на аэродинамические характеристики повышается. В качестве примера деформаций можно указать арочность, которую приобретает парашют в потоке. Стрела прогиба такой арки достигает 15–20 % первоначального размаха парашюта, при этом несколько уменьшаются его несущие свойства. Отметим, что экспериментальная и расчетная кривые являются практически эквидистантными. Это позволяет по результатам одного эксперимента сделать поправку расчетных характеристик и сократить число испытаний.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описаны расчетная методика и результаты исследований аэродинамических характеристик установившихся форм различных планирующих парашютов. Данные по аэродинамическим характеристикам установившихся форм ДПП позволяют выявить закономерности их изменения в зависимости от раскройной формы парашюта, деформаций его поверхности, вызванных набегающим потоком или управляющими воздействиями. Результаты расчетов подтверждены экспериментальными данными.

Показана возможность применения предложенной методики для расчета аэродинамических характеристик ДПП в диапазонах углов атаки  $\alpha \leq 10^\circ$  и  $\alpha \geq 20^\circ$  по упрощенной расчетной схеме с точностью около 10 %. В то же время выявлено, что с увеличением удлинения мягкого крыла важно учитывать его арочность для более точного определения аэродинамических характеристик.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Nicolaides J.D.** Parafoil Wind Tunnel Tests. Notre Damme Univ, June, 1997. AFFDL-TR-70–146.
2. **Uddin M. N., Mashud M.** Wind Tunnel Test of a Paraglider (flexible) Wing Canopy // International Journal of Mechatronics Engineering IJMME-IJENS. 2010. № 10(3). Pp. 7–13.
3. **Mashud M., Umemura A.** Experimental Investigation on Aerodynamic Characteristics of a Paraglider Wing // The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences. 2006. № 49(163). Pp. 9–17.
4. **Hanke K., Schenk S.** Evaluating the Geometric Shape of a Flying Paraglider // International Archives of the Photogrammetry. 2014. Vol. XL – 5. 265 p.
5. **Belloc H.** Wind Tunnel Investigation of a Rigid Paraglider Reference Wing // Journal of Aircraft. 2015. № 52(2). Pp. 703–708.
6. **Рысев О.В.** Парашютные системы / А.Т. Пономарев, М.И. Васильев, А.А. Вишняк, И.В. Днепров, Ю.В. Мосеев. М.: Наука, 1996. 288 с.
7. **Lyalin V., Morozov V.** Comparative Efficiency Analyses of the Parachute System for Space Vehicle Return Blocks // 18th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar. AIAA-2005-1682.
8. **Lyalin V., Morozov V., Ponomarev A.** Mathematical Modelling of Parachute Loading Taking into Account the Canopy Shape Changes // 18th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar. AIAA-2005-1676.
9. **Апаринов А.А., Апаринов В.А., Сетуха А.В.** Применение вихревых методов к задачам динамики парашютов // Труды XVI Международного симпозиума МЗДОЗМФ-2013. Харьков: ХНУ, 2013. С. 41–44.
10. **Овчинников В.В.** Методика расчета характеристик аэродинамического нагружения двухболочковых планирующих парашютов // Аэроупругость и прочность летательных аппара-

тов: научно-методические материалы / под ред. Ю.В. Петрова. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. 2001. С. 30–35.

**11. Писарев И.В., Сетуха А.В.** Снесение граничного условия на срединную поверхность при численном решении краевой задачи линейной теории крыла // Выч. мет. программирования. 2014. Т.15, Вып. 1. С. 109–120.

**12. Апарин В.А., Дворак А.В.** Метод дискретных вихрей с замкнутыми вихревыми рамками // Труды ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. 1986. № 1313. С. 424–433.

**13. Белоцерковский С.М.** Моделирование проницаемости в нелинейных задачах теории несущих и тормозящих поверхностей. Применение ЭВМ для исследования аэродинамических характеристик летательных аппаратов / А.Г. Васильченко, А.Т. Пономарев, В.И. Морозов // Труды ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского. 1986. № 1313. С. 349–369.

**14. Апарин В.А., Дмитриев М.Л.** Математическое моделирование отрыва потока с гладкой поверхности тела в рамках идеальной жидкости // Научные чтения, посвященные творческому наследию Н.Е. Жуковского: тезисы докладов. М.: ВВИА, 1997. С. 23–24.

**15. Белоцерковский С.М.** Математическое моделирование плоскопараллельного отрывного обтекания тел / В.Н. Котовский, М.И. Ништ, П.М. Федоров. М.: Наука, 1988. 309 с.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Овчинников Валерий Валерьевич**, доктор технических наук, профессор, начальник кафедры механики и инженерной графики Академии ГПС МЧС России, vvovchinnikov@bk.ru.

**Петров Юрий Владимирович**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической механики и инженерной графики МГТУ ГА, yu.petrov@mstuca.aero.

## THE AERODYNAMIC CHARACTERISTICS CALCULATION METHODOLOGY OF TWO-SHELL PARAGLIDERS

Valery V. Ovchinnicov<sup>1</sup>, Yurii V. Petrov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Fire Fighting Service of State Academy of Emercom of Russia, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

### ABSTRACT

Currently, two-shell paragliders (TSP) find a sufficiently wide application, including the solution of transport problems. A two-shell paraglider is a soft wing, the form of which is supported by the high-speed pressure in the stream and it is a complex aeroelastic system. To determine the aerodynamic characteristics of such system the use of nonlinear aerodynamics and nonlinear theory of elasticity methods is required, it causes the significant computational difficulties. This paper studies the aerodynamic characteristics of various steady-state shapes of gliding parachutes, the calculation-experimental method of their calculation is proposed. It is shown that the replacement of the volumetric profile of TSP median surface allows to receive the results which correctly reflect the qualitative effects of stalled and attached flows. It leads to the assumption that such replacement was possible for obtaining data about the main patterns of parachute finite wings span flow. The aerodynamic characteristics data of TSP steady-state shapes allow to identify the regularities of their changes depending on parachute cutting shape, the deformations of its surface caused by the incoming flow or control actions. To solve the problem of gliding parachute stall, with a stream of air, the discrete vortex method with closed frameworks is used. This method allows to calculate the aerodynamic characteristics of parachutes. The middle surface airflow of TSP steady-state shape with the flow of an ideal incompressible fluid is examined. The parachute fabric permeability is not considered because the upper and lower TSP cloth is either made of low permeable or impermeable fabric. The stalled aerodynamic coefficients are determined by time averaging after calculations up to its larger values. The results of the calculations are given. The possibility of application the proposed methodology for calculation of TSP aerodynamic characteristics in the range of angles of attack to 10° and over 20° for the simplified calculation scheme with accuracy 10% is shown. At the same time, it is re-

vealed that with the increase of soft wing elongation, it is important to consider its main surface curvature for more precise aerodynamic characteristics definition. The proposed methodology can be used for rapid assessments of aerodynamic forces at the design stage and in planning tube experiment. The obtained results can be useful in TSP design during the performance of the tube experiments.

**Key words:** aerodynamics, parachute, two-shell paraglider, the discrete vortex method.

## REFERENCES

1. **Nicolaidis, J.D.** (1997). *Parafoil Wind Tunnel Tests*. Notre Damme Univ, June, AFFDL-TR-70-146.
2. **Uddin, M.N. and Mashud, M.** (2010). *Wind Tunnel Test of a Paraglider (flexible) Wing Canopy*. International Journal of Mechatronics Engineering IJMME-IJENS, no. 3(10), pp. 7–13.
3. **Mashud, M. and Umemura, A.** (2006). *Experimental Investigation on Aerodynamic Characteristics of a Paraglider Wing*. The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, no. 163(49), pp. 9–17.
4. **Hanke, K. and Schenk, S.** (2014). *Evaluating the Geometric Shape of a Flying Paraglider*. International Archives of the Photogrammetry, vol. XL – 5, 265 p.
5. **Belloc, H.** (2015). *Wind Tunnel Investigation of a Rigid Paraglider Reference Wing*. Journal of Aircraft, no. 52(2), pp. 703–708.
6. **Risev, O.V., Ponomarjev, A.T., Vasiljev, M.I., Vishnjakov, A.A., Dneprov, I.V. and Moseev, Y.V.** (1996). *Parashutnie sistemi [The Parachute Systems]*. Moscow: Nauka Publ., 288 p. (in Russian)
7. **Lyalin, V. and Morozov, V.** (2005). *Comparative Efficiency Analyses of the Parachute System for Space Vehicle Return Blocks. 18th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar*. AIAA-2005-1682.
8. **Lyalin, V., Morozov, V. and Ponomarev, A.** (2005). *Mathematical Modelling of Parachute Loading Taking into Account the Canopy Shape Changes. 18th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar*. AIAA-2005-1676.
9. **Aparinov, A.A., Aparinov, V.A. and Setukha, A.V.** (2013). *Primenenie vikhrevikh metodov k zadacham dinamiki parashutov [The Application of Vortex Methods to the Problems of the Dynamics of Parachutes]*. Trudi XVI Mezdunarodnogo simpoziuma MZDOZMF-2013. Kharkov: HNU, pp. 41–44. (in Russian)
10. **Ovchinnikov, V.V.** (2001). *Metodika rascheta harakteristik ajerodinamicheskogo nagru-zhenija dvuhobolochkovykh planirujushhih parashjutov [The method of calculating the characteristics of the aerodynamic loading is twocovering gliding parachutes]*. *Ajerouprugost' i prochnost' letatel'nyh apparatov. Nauchno-metodicheskie materialy*. Pod red. Ju.V. Petrova. Moscow: VVIA im. prof. N.E. Zhukovskogo, pp. 30–35. (in Russian)
11. **Pisarev, I.V. and Setuha, A.V.** (2014). *Snesenie granichnogo uslovija na sredinnuju poverhnost' pri chislennom reshenii kraevoj zadachi linejnoy teorii kryla [Introduction of the Boundary Condition on the Median Surface in the Numerical Solution of the Boundary Value Problem of Linear Wing Theory]*. *Vych.met. programirovanija*, vol. 15, issue 1, pp. 109–120. (in Russian)
12. **Aparinov, V.A. and Dvorak, A.V.** (1986). *Metod diskretnikh vikhrej s zamknutimi vikhrevimi ramkami [The method of discrete vortices with closed vortex frames]*. Trudi VVIA im. Prof. N.E. Zhukovsky. Moscow, no. 1313, pp. 424–433. (in Russian)
13. **Belocerkovsky, S.M., Vasilchenko, A.G., Ponomarev, A.T. and Morozov, V.I.** (1986). *Modelirovanije pronicaemosti v nelinejnikh zadachakh teorii nesushikh I tormozjashikh poverkhnostjakh [Modeling of permeability in nonlinear problems of the theory of bearing and braking surfaces]*. The use of computers to study the aerodynamic characteristics of the aircraft. Trudi VVIA im. N.E. Zhukovsky. Moscow, no. 1313, pp. 349–369. (in Russian)

14. Aparinov, V.A. and Dmitriev, M.L. (1997). *Matematicheskoye modelirovanije otriva potoka s gladkoj poverkhnosti tela v ramkakh idealnoj zidkosti* [Mathematical modelling of flow separation from a smooth body surface in the framework of ideal fluid]. *Tezisi doklada. Nauchnije chteniia, posvjashchennije tvorcheskomu naslediju N.E. Zhukovsky* [Theses of the report. Scientific readings, devoted to the creative heritage of N.E. Zhukovsky]. Moscow: VVIA, pp. 23–24. (in Russian)

15. Belocerkovsky, S.M., Kotovsky, V.N., Nisht, M.I. and Fedorov, P.M. (1988). *Matematicheskoye modelirovanije ploskoparallelnogo otivnogo obtecanija tel* [Mathematical modeling of plane-parallel separated flows over bodies]. Moscow: Nauka Publ., 309 p. (in Russian)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Valery V. Ovchinnikov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Mechanics and Engineering Graphics Department at Fire Fighting Service of State Academy of Emercom of Russia, vvovchinnikov@bk.ru.

**Yurii V. Petrov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Engineering Mechanics and Engineering Graphics Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, yu.petrov@mstuca.aero.

Поступила в редакцию 23.01.2018  
Принята в печать 15.05.2018

Received 23.01.2018  
Accepted for publication 15.05.2018

**МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ**

УДК 629.735.33

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-101-114

**УМЕНЬШЕНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ВНЕШНИХ УСЛОВИЙ В АЭРОПОРТАХ МЕСТНОГО ЗНАЧЕНИЯ**

**А.Л. РЫБАЛКИНА<sup>1</sup>, А.С. СПИРИН<sup>2</sup>, Е.И. ТРУСОВА<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Московский государственный технический университет гражданской авиации,  
г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Лианозовский электромеханический завод, г. Москва, Россия*

Проблема воздействия на воздушное судно неблагоприятных метеоусловий, в том числе электрических разрядов, продолжает оставаться актуальной. Для благополучного выполнения полетов авиация как вид транспорта должна обеспечить безопасность, регулярность и экономичность воздушных перевозок. В решении выше перечисленных задач всегда активное участие принимает авиационная метеорология, так как от своевременного прогнозирования неблагоприятных метеоусловий зависит безопасность полетов. Современное аэродромное и самолетное оборудование, а также новая метеорологическая техника помогли повысить безопасность полетов, и снизить количество авиационных происшествий, связанных с неблагоприятными метеоусловиями, однако это не позволило решить все проблемы метеорологического обеспечения гражданской авиации. Особо остро данная проблема стоит в аэропортах местного значения, где зачастую отсутствуют какие-либо средства метеообеспечения и предупреждения об опасных явлениях погоды или их недостаточно. В статье проанализированы различные неблагоприятные метеоусловия, их влияние на воздушные суда, приведена статистика связанных с неблагоприятными метеоусловиями авиационных происшествий и показана доля метеоусловий среди факторов, влияющих на безопасность полетов. Особое внимание в статье уделено проблеме электрических разрядов на воздушные суда. Проанализированы последствия попадания электрических разрядов на воздушные суда, а также способствующие электрическим разрядам метеоусловия. В целях повышения безопасности полетов в аэропортах местного значения предложено создание мобильных пунктов сбора, обработки и передачи данных метеорологической информации, территориально разнесенных по зоне аэродрома, что позволяет создать мобильную сеть метеорадиолокаторов. Приведена структурная схема развертывания мобильной сети метеорадиолокаторов.

**Ключевые слова:** метеоинформация, электрические разряды на воздушные суда, мобильная сеть метеорадиолокаторов.

**ВВЕДЕНИЕ**

В мировой авиационной практике известно множество случаев авиационных происшествий, связанных с попаданием воздушных судов в неблагоприятные метеоусловия, в том числе актуальной является проблема воздействия электрических разрядов на воздушные суда.

Современное аэродромное и самолетное оборудование, а также новая метеорологическая техника помогли повысить безопасность полетов и снизить количество авиационных происшествий, связанных с неблагоприятными метеоусловиями, однако это не позволило решить все метеорологические проблемы обеспечения гражданской авиации.

Применяемое оборудование для обеспечения безопасности полетов в сложных метеоусловиях не исключает зависимость авиации от погоды. Особо остро данная проблема стоит в аэропортах местного значения, где зачастую отсутствуют какие-либо средства метеообеспечения и предупреждения об опасных явлениях погоды или их недостаточно. Не редки и случаи поражения воздушных судов молниями [1], а также их электризация. Поэтому в работе рассматривается задача снижения воздействия неблагоприятных метеоусловий, в частности воздействия электрических разрядов на воздушные суда путем создания мобильной сети метеорадиолокаторов.

## АКТУАЛЬНОСТЬ ИЗУЧЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ВНЕШНИХ УСЛОВИЙ

Авиация находится в большой зависимости от погодных условий, так как вся ее деятельность происходит в атмосфере. В полете на самолет оказывают влияние температура, давление воздуха, направление и скорость ветра, количество, характер и высота облаков, осадки.

От условий погоды зависит безопасность полетов, под которой понимают состояние, при котором риски, связанные с авиационной деятельностью, относящейся к эксплуатации воздушных судов или непосредственно обеспечивающей такую эксплуатацию, снижены до приемлемого уровня и контролируются<sup>1</sup> [2]. Обеспечение безопасности полетов является важнейшей задачей, направленной на снижение числа авиационных происшествий и инцидентов [3].

На рис. 1 показано количество авиационных происшествий в гражданской авиации РФ<sup>2,3</sup>. Из графика следует, что наблюдается рост числа авиационных происшествий.



Рис. 1. Количество авиационных происшествий в гражданской авиации РФ за 2005–2016 гг.  
Fig. 1. The number of accidents in the Russian Federation civil aviation for 2005–2016

Факторы, влияющие на безопасность полетов, можно разделить на человеческий, технический и неблагоприятные внешние условия [4, 5]. Более подробно рассмотрим неблагоприятные внешние условия, к которым относятся события или явления во внешней среде, создающие угрозу безопасности полета: неблагоприятные метеорологические условия, большие скопления птиц в воздухе, наличие спутных следов от ранее пролетевших самолетов и т. д.

Распределение факторов, обусловивших авиационные происшествия за пять лет представлены на рис. 2<sup>4,5</sup>. Наибольшее количество авиационных происшествий (79 %) связано с человеческим фактором, 19 % связано с отказами и неисправностями авиационной техники, 2 % – с неблагоприятными внешними условиями.

<sup>1</sup> Приложение 19 к Конвенции о международной гражданской авиации. Управление безопасностью полетов [Электронный ресурс]. URL: [http://www.icao.int/Annexes/Annex19\\_cons\\_ru.pdf](http://www.icao.int/Annexes/Annex19_cons_ru.pdf) (дата обращения: 23.12.17).

<sup>2</sup> Межгосударственный авиационный комитет. Информация. Доклады о состоянии безопасности полетов в гражданской авиации [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mak.ru/> (дата обращения: 11.04.16).

<sup>3</sup> Межгосударственный авиационный комитет. Отчеты о состоянии безопасности полетов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mak-iac.org/rassledovaniya/bezopasnost-poletov/> (дата обращения: 23.12.17).

<sup>4</sup> Межгосударственный авиационный комитет. Информация. Доклады о состоянии безопасности полетов в гражданской авиации [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mak.ru/> (дата обращения: 11.04.16).

<sup>5</sup> Межгосударственный авиационный комитет. Отчеты о состоянии безопасности полетов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mak-iac.org/rassledovaniya/bezopasnost-poletov/> (дата обращения: 23.12.17).



Рис. 2. Факторы, определившие авиационные происшествия в 2010–2015 гг.  
Fig. 2. Factors that determined the accidents in 2010–2015

Неблагоприятные внешние условия, помимо основной причины авиационного происшествия, могут также выступать в качестве сопутствующего фактора, как показано в табл. 1. В большом количестве авиационных происшествий прослеживается совокупное воздействие неблагоприятных внешних условий и человеческого фактора.

Таблица 1  
Table 1

Количество и доля авиационных происшествий, связанных с неблагоприятными внешними условиями

The number and percentage of accidents associated with adverse external conditions

Год	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Авиационные происшествия	25	24	24	38	40	29	38
Авиационные происшествия, связанные с неблагоприятными внешними условиями	6	3	3	7	5	4	5
Доля авиационных происшествий, связанных с неблагоприятными внешними условиями, %	24	12,5	12,5	18,4	12,5	13,8	13,2

Таким образом, необходимо более подробно изучить и проанализировать авиационные происшествия, в которых имело место воздействие неблагоприятных внешних условий.

При рассмотрении авиационных происшествий, связанных с воздействием неблагоприятных внешних условий, с самолетами (рис. 3) чаще всего имеют место нарушение метеоминимума и потеря пространственной ориентировки в условиях ограниченной видимости [6]. Для вертолетов (рис. 4) также наибольшее количество авиационных происшествий связано с нарушением метеоминимума. Помимо этого, часто отмечаются: полеты в условиях, не соответствующих правилам визуальных полетов, а также потеря пространственной ориентировки в условиях ограниченной видимости.

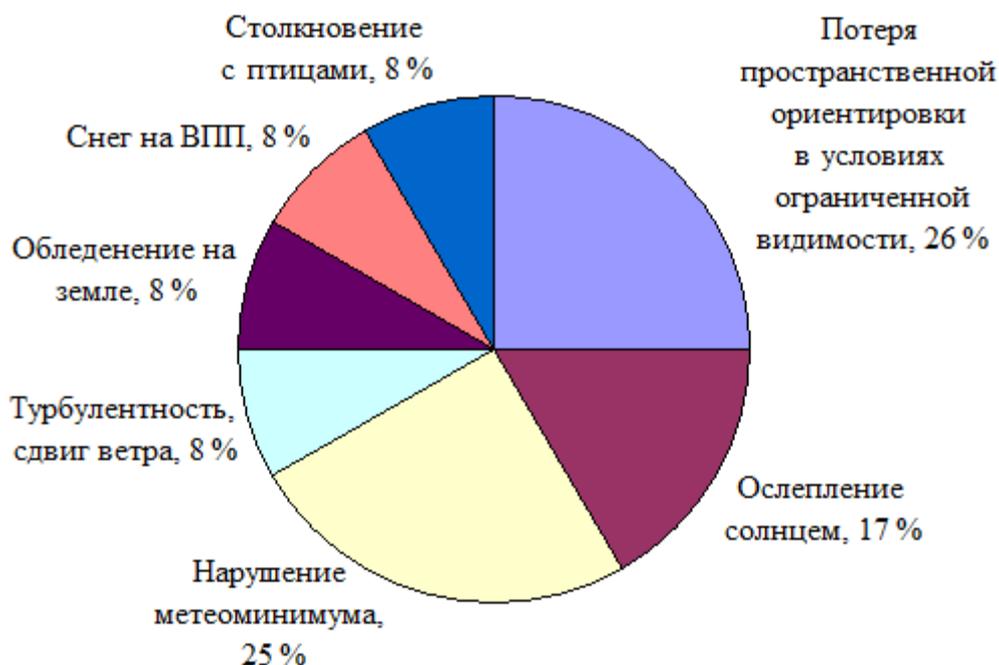


Рис. 3. Распределение причин авиационных происшествий, связанных с неблагоприятными внешними условиями, для самолетов в 2008–2014 гг.

Fig. 3. Distribution of the causes of accidents related to unfavorable external conditions for aircraft in 2008–2014



Рис. 4. Распределение причин авиационных происшествий, связанных с неблагоприятными внешними условиями, для вертолетов в 2008–2014 гг.

Fig. 4. Distribution of the causes of accidents related to unfavorable external conditions for helicopters in 2008–2014

Из диаграмм видно, что большинство авиационных происшествий, связанных с неблагоприятными внешними условиями, обусловлено влиянием различных метеоусловий. На рис. 5 показано изменение количества авиационных происшествий<sup>6,7</sup>, связанных с влиянием метеоусловий за 2009–2016 гг. Начиная с 2013 г. наблюдалась тенденция к снижению авиационных происшествий, а с 2015 г. число авиационных происшествий увеличивается.

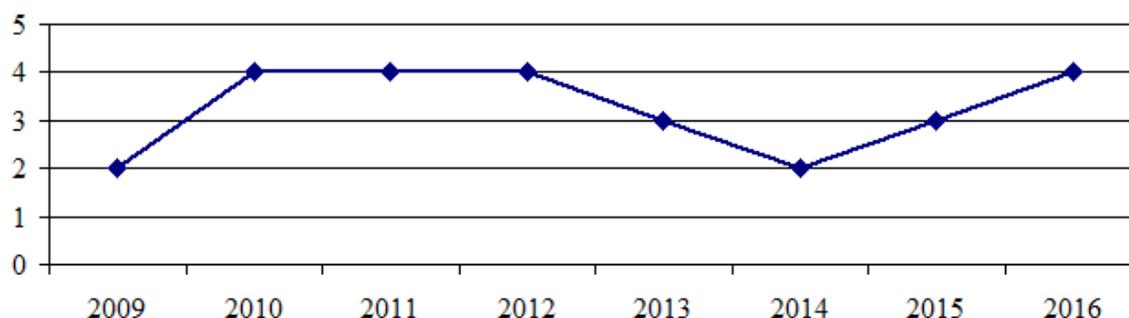


Рис. 5. Количество авиационных происшествий в гражданской авиации РФ, связанных с влиянием метеоусловий, за 2009–2016 гг.

Fig. 5. The number of accidents in the Russian Federation civil aviation, associated with meteorological conditions influence, for 2009–2016

Наиболее частыми погодными условиями, в которых возникают проблемы, являются (рис. 6): дымка, ливневые осадки, ограниченная видимость, кучево-дождевая облачность, сильный порывистый ветер, а также наличие снегопада или метели.



Рис. 6. Виды неблагоприятных метеоусловий, оказавших влияние на развитие авиационных происшествий в гражданской авиации РФ за 2009–2016 гг.

Fig. 6. Types of unfavorable weather conditions that influenced the aviation accidents development in the Russian Federation civil aviation for 2009–2016

<sup>6</sup> Межгосударственный авиационный комитет. Информация. Доклады о состоянии безопасности полетов в гражданской авиации [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mak.ru/> (дата обращения: 11.04.16).

<sup>7</sup> Межгосударственный авиационный комитет. Отчеты о состоянии безопасности полетов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mak-iac.org/rassledovaniya/bezopasnost-poletov/> (дата обращения: 23.12.17).

Также был выявлен ряд проблем, связанных с неполучением экипажем актуальной информации о неблагоприятных метеоусловиях. В их числе: неоправдавшийся прогноз погоды, отсутствие прогноза погоды по маршруту и случаи, когда экипаж за метеоинформацией не обращался.

## АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, СОСТАВЛЯЮЩИХ НЕБЛАГОПРИЯТНЫЕ МЕТЕОУСЛОВИЯ

Проанализируем факторы, составляющие неблагоприятные метеоусловия, и их влияние на воздушные суда.

1. Ветер, сдвиг ветра. Наличие продольного ветра приводит к изменению длины разбега ВС. При наличии бокового ветра самолет может начать разворачивать против ветра из-за силы, которую этот ветер создает, что может привести на посадке к приземлению вне взлетно-посадочной полосы<sup>8</sup>.

Также опасны для авиации сильные сдвиги ветра. При горизонтальном сдвиге ветра ВС может лететь выше или ниже расчетной траектории. Вертикальный сдвиг ветра может привести к полету ниже расчетной траектории, срыву потока, сваливанию самолета на крыло и к возможному столкновению воздушного судна с землей.

2. Атмосферная турбулентность. Атмосферная турбулентность вызывает интенсивную болтанку самолетов. Изменяются высота, курс и скорость полета; устойчивость и управляемость самолета ухудшаются; а износ отдельных агрегатов и узлов увеличивается.

3. Облачность и ограниченная видимость. Полеты в облаках или при плохой видимости опасны тем, что, во-первых, отсутствует визуальная ориентировка и ухудшаются условия видимости из кабины самолета. Во-вторых, пилотирование можно выполнять только по приборам. В-третьих, при полете в облаках, а также в зоне плохой видимости возникает или опасная турбулентность, или обледенение воздушных судов. Также могут возникать другие опасные явления погоды, возможны миражи и цветные дымки, которые очень затрудняют полет.

4. Метеорологические явления, ухудшающие видимость: осадки, метели, туманы, пыльные или песчаные бури и мгла. При метелях на аэродромах возникают снежные заносы [5], затрудняющие, а иногда на какой-то срок и исключающие, работу авиации. Опасность пыльных (песчаных) бурь заключается в плохой видимости, сильном ветре и сильной турбулентности в нижнем слое атмосферы. Полет в зоне переохлажденного дождя и снега, помимо ухудшения видимости, опасен возможностью обледенения.

5. Обледенение. В результате обледенения изменяются аэродинамические условия обтекания самолета воздушным потоком [7], а также увеличивается масса самолета и нарушается равновесие аэродинамических сил. Последствия обледенения могут быть самыми разными, начиная от ухудшения радиосвязи, потери визуальной ориентировки до попадания кусков льда в двигатель. Поэтому сильное обледенение является существенной проблемой для авиации.

6. Грозы и шквалы. Грозы опасны интенсивной турбулентностью в облаках, способной вызвать сильную болтанку и перегрузки, превышающие предельно допустимые значения; сильным обледенением на высотах, где температура воздуха ниже 0 °С; возможностью поражения самолета молниями; интенсивными ливневыми осадками.

Град также представляет серьезную опасность для полетов. При ударе градин о поверхность самолета могут возникать различные повреждения [7] – от вмятин на поверхности до разгерметизации кабины и пассажирского салона.

7. Электризация самолетов. Электризации самолетов способствуют электрические свойства облаков, осадков, а также характеристика самого самолета и режим полета. В полете электрический заряд «провоцирует» разряд молнии в самолет даже в тех случаях, когда напряжен-

<sup>8</sup> ICAO Doc 9817 Руководство по сдвигу ветра на малых высотах [Электронный ресурс]. 2005. URL: [http://aviadocs.com/icaodocs/Docs/9817\\_cons\\_ru.pdf](http://aviadocs.com/icaodocs/Docs/9817_cons_ru.pdf) (дата обращения: 23.12.17).

ность электрического поля (без самолета) в воздухе еще не достигла пробивной напряженности. А после посадки при заправке самолета топливом может проскочить искра между заправочным пистолетом и открытой горловиной топливного бака со всеми вытекающими отсюда последствиями. Более подробно вопросы электризации самолетов рассмотрены далее.

### ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ НА ВОЗДУШНЫЕ СУДА КАК ФАКТОР, ВЛИЯЮЩИЙ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ПОЛЕТОВ

Проблемы, связанные с взаимодействием атмосферного электрического разряда с движущимся летательным аппаратом, возникли с появлением авиации. Попадание молний в воздушные суда может привести к авиационным происшествиям и инцидентам.

Но так как все современные модели пассажирских и военных самолетов имеют защиту от удара молнии в обшивку, то чаще имеют место инциденты, связанные с электрическими разрядами на воздушное судно в полете. На рис. 7 показаны пути тока молниевых разрядов при различных вариантах входа и выхода [8].

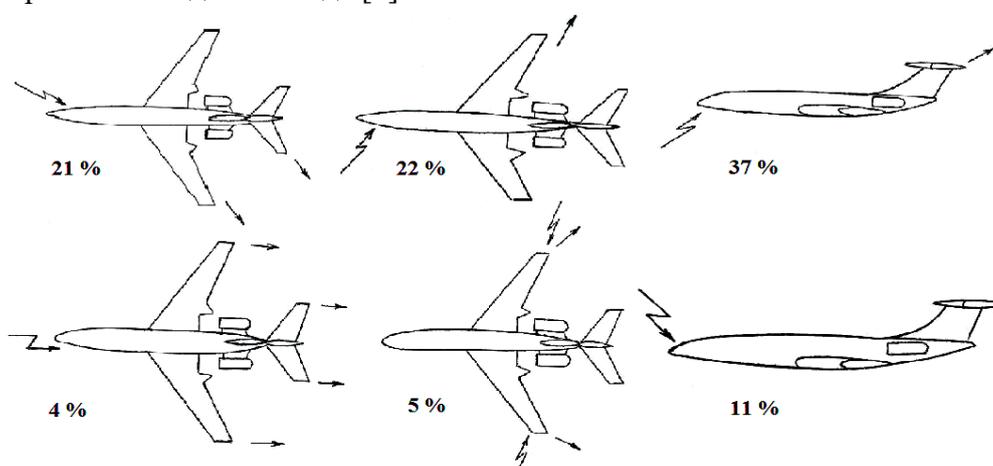


Рис. 7. Пути тока молниевых разрядов при различных вариантах входа и выхода  
Fig. 7. Current paths of a lightning discharge for various types of input and output

По статистике, современный авиалайнер встречается с молнией в среднем каждые 2000–3000 часов полета<sup>9</sup> [13]. К наиболее частым последствиям попадания электрических разрядов в воздушные суда относятся (рис. 8): повреждение обтекателя радиолокационной станции, обгорание электрических разрядников, повреждение двигателя, оплавление обшивки воздушного судна.

Воздействуя на металлические элементы конструкции, молния может быть причиной таких визуально наблюдаемых электротермических воздействий, как проплавление, эрозия в зоне воздействия разряда, прожоги, оплавление головок соединительных элементов, в первую очередь заклепок, с потерей ими служебных свойств [9, 10]. Также существует электромеханическое воздействие, в результате которого происходит образование вмятин на обшивке, загибов консольных элементов; перегрузка заклепок и других соединительных элементов в результате возникающих в обшивке волн напряжений. Если вовремя не выявить повреждения такого рода, это может привести к отказам авиационной техники. Попадание молнии в двигатель может стать причиной нарушения его работы. Проблема остаточной намагниченности элементов конструкции воздушного судна, возникающая в результате воздействия молнии, зачастую делает неработоспособными целые системы навигационного комплекса. Однако диагностировать и устранить такие повреждения достаточно трудно.

<sup>9</sup> Молниезащита самолетов [Электронный ресурс]. URL: <http://www.bezpeka-plus.com.ua/news/molniezashhita-samoletov> (дата обращения: 23.12.17).



Рис. 8. Места повреждений воздушных судов в результате попадания электрических разрядов  
Fig. 8. Aircraft damage places as a result of contact with electrical discharges

Поражение воздушного судна в полете электрическими разрядами связано с электрическими свойствами атмосферы: находящиеся в воздухе пылинки, капли сконденсированной влаги, частицы осадков, кристаллы льда и другие имеют электрический заряд, поэтому самолеты в полете электризуются<sup>10</sup>. Электрические свойства облаков, осадков, а также характеристика самого самолета и режим полета способствуют электризации самолетов. Электрические свойства облаков и осадков связаны с их фазовым состоянием (капли, кристаллы), формой, размерами, концентрацией в единице объема, электрическим зарядом частичек и напряженностью электрического поля в окрестностях облаков. Также влияние оказывают особенности конструкции воздушного судна, материал покрытия, тип двигателей и параметры статических стекателей.

На рис. 9 показано влияние свойств облаков на величину заряда, приобретаемого самолетом [8]. Каждый вид облаков характеризуется некоторой статистической кривой. В облаках конвективных форм – ливневых и мощных кучевых – создается наибольшая вероятность приобретения большого заряда, однако вероятность приобретения заряда существует также и в слоисто-дождевых и – в меньшей степени – в слоистых облаках.

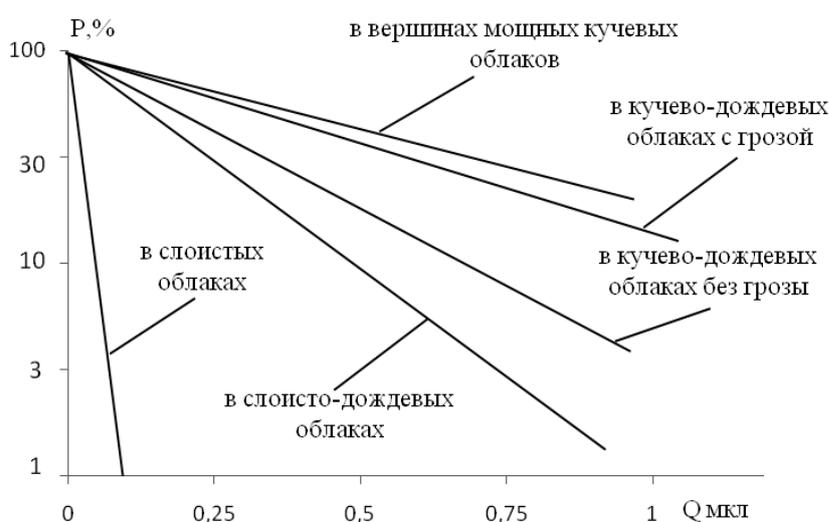


Рис. 9. Кривая интегральной вероятности приобретения самолетом заряда больше указанной величины  
Fig. 9. The curve of integral probability of plane acquisition of a charge more than the indicated value

<sup>10</sup> ICAO Doc 9817 Руководство по сдвигу ветра на малых высотах [Электронный ресурс]. 2005. URL: [http://aviadocs.com/icaodocs/Docs/9817\\_cons\\_ru.pdf](http://aviadocs.com/icaodocs/Docs/9817_cons_ru.pdf) (дата обращения: 23.12.17).

На электризацию воздушного судна существенное влияние оказывает микроструктура облаков. Таким образом, чем больше в облаке кристаллов, а не жидкой воды, тем сильнее электрические токи, заряжающие самолет. Поэтому мощно-кучевые, кучево-дождевые и плотные слоисто-дождевые облака являются наиболее опасными видами облачности для авиации. Во время полета самолета в высокослоистых и перисто-слоистых облаках также может произойти сильная электризация самолета. В облаках большой вертикальной протяженности обычно наблюдается повышенная электризация самолетов.

Электризация самолета – сложный и неоднородный процесс, так как в полете самолет одновременно приобретает электрический заряд и теряет его. Величина электрического заряда на самолете зависит от состояния токов, заряжающих и разряжающих самолет.

Заряд  $Z$  на самолете появляется главным образом в результате взаимодействия частиц облаков и осадков с поверхностью самолета  $Z_{нов}$  и взаимодействия частиц несгоревшего топлива с материалом выхлопной системы двигателя  $Z_{ов}$ , однако данной причине не придают большого значения.

$$Z = Z_{нов} + Z_{ов} \quad (1)$$

Разряд  $P$  (стекание заряда с поверхности самолета) происходит за счет проводимости горячих выхлопных газов  $P_{вг}$ , срыва частиц облака или осадков с поверхности самолета  $P_{нов}$  и коронного разряда  $P_{кр}$ .

$$P = P_{вг} + P_{нов} + P_{кр} \quad (2)$$

Разница в скоростях заряда и разряда самолета обуславливает величину электрического заряда, оставшегося на самолете после его посадки

$$Z_{ВС} = Z - P = Z_{нов} + Z_{ов} - P_{вг} - P_{нов} - P_{кр} \quad (3)$$

Попадание в ВС электрических разрядов чаще всего наблюдается в условиях грозовой деятельности, реже в условиях кучево-дождевой облачности без грозы, а также в условиях слоистой облачности. Таким образом, вероятность электрического разряда на воздушное судно в полете при различных атмосферных условиях будет определяться выражениями:

$$- \text{в грозу: } P_{Г} = P_{ПвГ} \cdot P_{УМвГ}, \quad (4)$$

$$- \text{в кучево-дождевой облачности: } P_{КДО} = P_{ПвКДО} \cdot P_{УМвКДО}, \quad (5)$$

$$- \text{в слоистой облачности: } P_{СО} = P_{ПвСО} \cdot P_{УМвСО}, \quad (6)$$

где:  $P_{ПвГ}$  – вероятность попадания в грозу,

$P_{УМвГ}$  – вероятность электрического разряда на ВС в грозу,

$P_{ПвКДО}$  – вероятность попадания в кучево-дождевую облачность,

$P_{УМвКДО}$  – вероятность электрического разряда на ВС в кучево-дождевой облачности,

$P_{ПвСО}$  – вероятность попадания в слоистую облачность,

$P_{УМвСО}$  – вероятность электрического разряда на ВС в слоистой облачности.

Вероятность отсутствия электрического разряда на ВС в полете будет определяться следующими выражениями:

$$- \text{ в грозу: } Q_G = 1 - P_G, \quad (7)$$

$$- \text{ в кучево-дождевой облачности: } Q_{КДО} = 1 - P_{КДО}, \quad (8)$$

$$- \text{ в слоистой облачности: } Q_{СО} = 1 - P_{СО}. \quad (9)$$

Тогда вероятность электрического разряда на ВС в полете будет определяться следующим выражением:

$$P = 1 - (1 - P_{ПвГ} \cdot P_{УМвГ}) \cdot (1 - P_{ПвКДО} \cdot P_{УМвКДО}) \cdot (1 - P_{ПвСО} \cdot P_{УМвСО}). \quad (10)$$

Для уменьшения числа поражений самолетов молниями и, соответственно, уменьшения вероятности возникновения авиационных происшествий и инцидентов актуальным является располагать точными данными о метеорологической обстановке в районе аэродрома вылета и посадки. При анализе и оценке метеорологической обстановки в районе полетов и для обеспечения безопасности полета экипажу необходимо использовать данные метеорадиолокационных наблюдений.

### ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПОЛЕТОВ ПУТЕМ СОЗДАНИЯ МОБИЛЬНОЙ СЕТИ МЕТЕОРАДИОЛОКАТОРОВ

Для уточнения метеорологической обстановки в зоне аэродрома, не оборудованного метеорологическими средствами наблюдения, для оперативного развертывания предлагается предусмотреть установку мобильных пунктов сбора, обработки и передачи данных метеорологической информации, территориально разнесенных по зоне аэродрома, что позволяет создать мобильную сеть метеорадиолокаторов.

Каждый такой пункт состоит (рис. 10) из мобильного метеорологического радиолокатора (ММРЛ), комплекса средств обработки и передачи информации, связанного с центром управления полетами (ЦУП). В этот комплекс входит терминал абонентской станции авиационной фиксированной спутниковой связи, речевые каналы связи на специально выделенных частотах на базе радиостанции ОВЧ-диапазона, радиостанция прослушивания радиообмена «борт – земля» (с блокировкой возможности выхода в эфир), а также комплекс сопряжения, передачи и документирования информации. Электропитание комплекса предусматривается автономное 220 В 50 Гц от мобильного электрогенератора. В составе пункта предлагается установить рабочее место оператора и места для служебных пассажиров (не менее трех человек).

Комплекты оборудования предполагается разместить на автомобилях типа «металлический фургон» с длинной базой и высокой крышей.

Остановимся на каждой из подсистем более подробно.

Мобильный метеорологический радиолокатор предназначен для автоматического (автоматизированного) анализа метеорологической обстановки в местах непосредственного базирования авиации, а также для создания радиолокационного метеорологического поля там, где нет возможности установки стационарного метеорологического радиолокатора или такая установка нецелесообразна.

Радиолокатор предназначен для решения задач обнаружения и классификации метеорологических явлений (в том числе и гроз) при круговом, секторном, растровом обзоре пространства в ближней аэродромной зоне; обнаружения зон опасной турбулентности, сдвига ветра и обледенения с приоритетом в секторах взлета и посадки воздушных судов; автоматического прогнозирования конфликтных и опасных ситуаций, связанных с попаданием ВС в опасные метеорологические зоны, а также формирования соответствующих сигналов для диспетчеров.

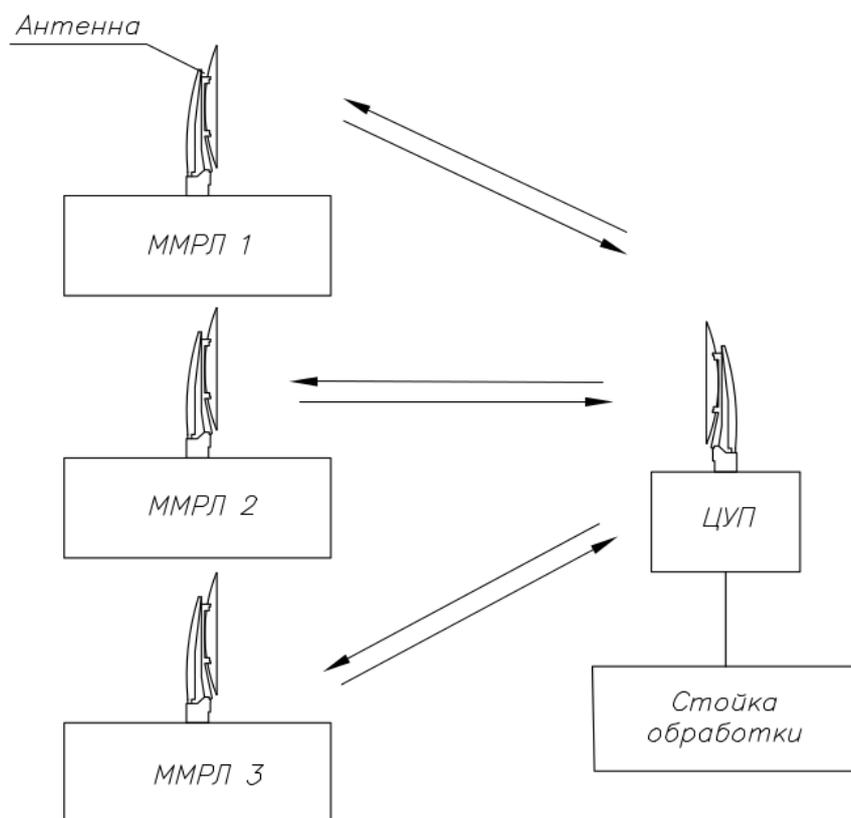


Рис. 10. Структурная схема сети мобильных метеорологических радиолокаторов  
Fig. 10. Mobile meteorological radars network structural diagram

В составе абонентской станции авиационной фиксированной спутниковой связи (АЗС) предлагается использовать антенный пост с установленным на нем оборудованием наружной установки (на крыше микроавтобуса) и оборудование внутренней установки. Оборудование внутренней установки АЗС монтируется в аппаратный шкаф в составе мобильного пункта управления.

В качестве речевого канала оперативной связи между мобильным пунктом и ВС, выполняющим полеты, предполагается использовать радиостанцию ОВЧ-диапазона мощностью до 50 Вт с ОВЧ-антенной, установленной на телескопической мачте.

Организация единого информационного пространства мобильного пункта позволит обеспечить управление, мониторинг и контроль состояния системы с единого терминала, выполненного на базе механически защищенного ноутбука.

Основные функции единого информационного пространства мобильного пункта: организация телефонной связи на базе VoIP, организация документирования информации (аудио и видео), организация резервных каналов связи на базе технологий GSM и WiMAX.

Организация телефонной связи на базе VoIP позволяет осуществить оперативную телефонную связь с командным пунктом и другими мобильными пунктами.

Станция записи позволяет документировать аудио- и видеoinформацию в течение всего времени работы мобильного пункта, также система позволяет осуществить документирование всех событий, происходящих в мобильном пункте.

Для обеспечения документирования дорожной обстановки в подвижном состоянии в состав комплекса включен видеорегистратор.

В качестве основного канала передачи данных в режиме реального времени предлагается использование спутникового канала АФСС. В качестве резервного канала в

состав комплекса предлагается включить каналы передачи данных на базе технологий GSM и WiMAX. При этом для защиты каналов применяется шифрование IP-трафика и организация VPN-тоннелей.

Основным элементом мобильной сети метеорадиолокаторов является командный пункт, чаще всего располагаемый на территории аэродрома оснащения, также включающий в себя главный мобильный пункт, в который стекается вся информация от мобильных пунктов. В главном мобильном пункте предлагается разместить всю серверную аппаратуру комплекса оснащения, а также аппаратуру сопряжения с существующими на аэродроме метеорологическими средствами для передачи информации конечным пользователям (диспетчерам, аэродромным службам и прочим).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проблема метеобеспечения, в том числе воздействия электрических разрядов на воздушные суда, продолжает оставаться актуальной. Поэтому важным является своевременное выявление условий, способствующих электризации.

В крупных аэропортах в настоящее время создается сеть радиолокационных метеостанций, однако эта сеть не охватывает аэродромы, располагающиеся в аэропортах местного значения, и аэродромы северных регионов России.

В работе показана возможность создания мобильной метеорологической радиолокационной станции, позволяющей определять опасные метеоусловия, в том числе метеоусловия которые могут спровоцировать электрические разряды на воздушные суда.

Это позволит совершенствовать систему предупреждения неблагоприятных метеорологических явлений, что является важным компонентом обеспечения безопасности полетов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Камзолов С.К., Самохин А.В. Об опасности полетов в грозу (версии двух катастроф) // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 180. С. 102–105.
2. Николайкин Н.И., Рыбалкина А.Л. Чрезвычайные ситуации последних лет на территории России // Безопасность в техносфере. 2009. № 2. С. 41–46.
3. Старков Е.Ю., Николайкин Н.И., Климов П.И. Организация экологической защиты территории авиационного происшествия // Научный Вестник МГТУ ГА. 2016. Т. 19, № 5. С. 200–205.
4. Николайкин Н.И., Зубков Б.В., Рыбалкина А.Л. Анализ статистики чрезвычайных ситуаций в современной гражданской авиации // Проблемы анализа риска. 2008. Т. 5, № 1. С. 38–52.
5. Иванов А.И. Совершенствование взаимодействия работников, обслуживающих авиатехнику, путем подбора состава бригад для снижения числа ошибок / А.А. Кузнецов, Н.И. Николайкин, В.Д. Шаров // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2017. № 1 (35). С. 41–47.
6. Рыбалкина А.Л., Спирин А.С. Развитие радиолокационного геофизического мониторинга окружающей среды с целью повышения безопасности полетов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2015. № 222. С. 138–142.
7. Богаткин О.Г. Авиационная метеорология: учебник. СПб.: РГГМУ, 2005.
8. Зосимов В.М. Средства и методы противомолниевой защиты самолетов / Б.В. Зубков, С.К. Камзолов, М.Г. Голубева, С.А. Тепнадзе. Тбилиси: Профиздат, 1999.

9. Камзолов С.К. Основные поражающие факторы при воздействии молнии на воздушное судно. Обеспечение безопасности полетов в сложных метеоусловиях: межвузовский сборник научных трудов. М.: МГТУ ГА, 1996. С. 3–8.

10. Камзолов С.К. Учет неоднородности канала молнии в модели ее электромеханического воздействия при ударе в обшивку воздушного судна // Научный Вестник МГТУ ГА. 2009. № 140. С. 66–73.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Рыбалкина Александра Леонидовна**, кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности полетов и жизнедеятельности Московского государственного технического университета гражданской авиации, a.ribalkina@mstuca.aero.

**Спирин Алексей Сергеевич**, кандидат технических наук, начальник отдела Лианозовского электромеханического завода, alex2102@inbox.ru.

**Трусова Елена Игоревна**, магистрант Московского государственного технического университета гражданской авиации, elenatru2011@yandex.ru.

## REDUCING INFLUENCE OF ADVERSE EXTERNAL CONDITIONS IN THE LOCAL AIRPORTS

**Alexandra L. Rybalkina<sup>1</sup>, Aleksey S. Spirin<sup>2</sup>, Elena I. Trusova<sup>1</sup>**  
<sup>1</sup>*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*  
<sup>2</sup>*JSC LEMZ R&P Corp, Moscow, Russia*

### ABSTRACT

The problem of the unfavorable weather conditions impact on aircraft, including electric discharges on aircraft, continues to be relevant. For the successful implementation of flights, aviation as a type of transport should ensure safety, regularity and economy of air transportation. The aerial meteorology always takes an active part in above problems solution, since flight safety depends on timely prediction of unfavorable weather conditions. Modern airfield and aircraft equipment, as well as a new meteorological technique, helped to improve flight safety and reduce the number of accidents associated with adverse weather conditions, but this did not solve all the problems of civil aviation meteorological support. This problem is especially acute in small airports, where there are often no means of meteorological support and warnings about dangerous weather phenomena or they are insufficient. The article analyzes various unfavorable weather conditions, their influence on aircraft, provides statistics related to unfavorable weather conditions of aviation accidents, and shows the proportion of meteorological conditions among the factors affecting safety. Particular attention is paid to the problem of electric discharges to aircraft. The consequences of electric discharges on aircraft, as well as weather conditions contributing to electric discharges, are analyzed. In order to improve flight safety at local airports, it is proposed to create mobile units for collecting, processing and transmitting meteorological information that is territorially spread over the aerodrome zone; it allows to create mobile meteorological radar network. The structural scheme of the deployment of the mobile network for meteorological radars is given.

**Key words:** meteorological information, electrical discharges on aircraft, mobile weather radars network.

### REFERENCES

1. Kamzolov, S.K. and Samokhin, A.V. (2012). *Ob opasnosti polotov v grozu (versii dvukh katastrof)* [On danger of flights in thunderstorm (Versions of two disasters)]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 180, pp. 102–105. (in Russian)
2. Nikolaykin, N.I. and Rybalkina, A.L. (2012). *Chrezvychaynyye situatsii poslednikh let na territorii Rossii* [The organization of ecological protection of the aviation accident area]. Safety in the technosphere, no. 2, pp. 41–46. (in Russian)

3. Starkov, E.Y., Nikolaykin, N.I. and Klimov, P.I. (2016). *Organizatsiya ekologicheskoy zashchity territorii aviatsionnogo proisshestviya* [Emergencies of recent years in Russia]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, vol. 19, no. 5, pp. 220–205. (in Russian)
4. Nikolaykin, N.I., Zubkov, B.V. and Rybalkina, A.L. (2008). *Analiz statistiki chrezvychaynykh situatsiy v sovremennoy grazhdanskoj aviatsii* [Analysis of emergency statistics in modern civil aviation]. Problems of risk analysis, vol. 5, no. 1, pp. 38–52. (in Russian)
5. Ivanov, A.I., Kuznetsov, A.A., Nikolaykin, N.I. and Sharov, V.D. (2017). *Improving the interaction of workers serving aircraft, by selecting the brigade staff to reduce the number of errors* [Interaction improvement of the workers serving aviation equipment by selection of crews structure for decrease in mistakes number]. XXI century: the results of the past and the problems of the present plus, no. 35(1), pp. 41–47. (in Russian)
6. Rybalkina, A.L. and Cpirin, A.S. (2015). *Razvitie radiolokacionnogo geofizicheskogo monitoringa okruzhajushhej sredy s cel'ju povysheniya bezopasnosti poletov* [Development of radar environment geophysical monitoring in order to improve aviation safety]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 222, pp. 138–142. (in Russian)
7. Bogatkin, O.G. (2005). *Aviacionnaja meteorologija. Uchebnik* [Aviation meteorology. Textbook]. St. Peterburg: RGGMU. (in Russian)
8. Zosimov, V.M., Zubkov, B.V., Kamzolov, S.K., Golubeva, M.G. and Tepnadze, S.A. (1999). *Sredstva i metody protivomolnievoj zashchity samoletov* [Means and methods of aircraft anti-lightning protection]. Tbilisi: Profizdat. (in Russian)
9. Kamzolov, S.K. (1996). *Osnovnye porazhajushhie faktory pri vozdejstvii molnii na vozdushnoe sudno. Obespechenie bezopasnosti poletov v slozhnyh meteouslovijah: Mezhvuzovskij sbornik nauchnyh trudov* [The main damaging factors of aircraft lightning strike. Ensuring flight safety in difficult weather conditions: Interuniversity scientific papers collection]. Moscow: MGTU GA, pp. 3–8. (in Russian)
10. Kamzolov, S.K. (2009). *Uchet neodnorodnosti kanala molnii v modeli yeyo elektromekhanicheskogo vozdeystviya pri udare v obshivku vozdushnogo sudna* [The impact of the heterogeneity of the channel of lightning in the model of its electromechanical action with the stroke into the skin of the air vessel]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 140, pp. 66–73. (in Russian)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Alexandra L. Rybalkina**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Flight and Life Safety Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, rybalkina@list.ru.

**Aleksei S. Spirin**, Candidate of Technical Sciences, Head of Department, Joint-Stock Company "Lianozovo Electromechanical Plant Research and Production Corporation", alex2102@inbox.ru.

**Elena I. Trusova**, Graduate Student, Moscow State Technical University of Civil Aviation, elenatru2011@yandex.ru.

Поступила в редакцию 18.12.2017  
Принята в печать 15.05.2018

Received 18.12.2017  
Accepted for publication 15.05.2018

УДК 621.396.98.004.1

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-115-124

## ВЛИЯНИЕ УРОВНЯ БЕЗОТКАЗНОСТИ НА ЗАТРАТЫ, СВЯЗАННЫЕ С ПРОИЗВОДСТВОМ И ГАРАНТИЙНЫМ ОБСЛУЖИВАНИЕМ ИННОВАЦИОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

И.М. ТЕР-СААКОВА<sup>1</sup>, Н.И. ПОДАЛЯКИНА<sup>1</sup>, В.А. ХОДАКОВСКИЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Рижский авиационный институт, г. Рига, Латвия*

Основу рынка народного потребления в настоящее время составляют нерезервированные изделия. Надежность этих устройств целиком определяется уровнем безотказности их составляющих. С промышленными изделиями не бытового назначения резервирование как в ремонтируемой, так и в неремонтируемой аппаратуре используется на различных уровнях: это резервирование на уровне узлов, блоков и аппаратуры в целом, а также на уровне элементов (глубокое дробное резервирование). Составить прогноз по доле изделий, выходящих из строя в процессе эксплуатации, можно зная вероятность безотказной работы изделия за определенное время. В статье приведен показатель вероятности безотказной работы изделия – количественно оцениваемая величина, которая рассчитывается как отношение неотказавшего числа изделий к их общему числу. Приведен график, характеризующий изменения вероятности безотказной работы изделий. Предполагается, что вероятность безотказной работы изделий изменяется по экспоненциальному закону. Рассмотрено построение экономической модели на основе категории безотказности изделий. Эта модель построена с учетом условия, что гарантии на изделие, выдаваемые предприятием-изготовителем, должны быть соотнесены с числом возможных отказов изделий за это время. Сделан вывод, что категория безотказности изделий является единственной категорией оценки риска предприятия-изготовителя на рынке при выдаче гарантий на свою продукцию. Сделано предположение, что цена повышения безотказности может быть различной и зависит от многих обстоятельств, но всегда повышение надежности изделия связано с ростом его стоимости. Решена задача, связанная с тем, что часть изделий, поставляемых предприятием-изготовителем на рынок, откажет. Таким образом, необходимо знать долю отказавших изделий, которая определяется качеством изготовления и надежностью изделия, заложенной в процессе его проектирования и производства. Приведен график зависимости общих суммарных затрат на производство и эксплуатацию инновационных изделий от вероятности их безотказной работы. Сформулированы основные достоинства предлагаемой экономической модели.

**Ключевые слова:** вероятность безотказной работы, резервирование, экономическая модель, эксплуатация изделия.

### ВВЕДЕНИЕ

В сфере народного потребления изделия промышленного производства – как правило, изделия нерезервированные (радиоприемники, телевизоры, записывающая аппаратура, т. е. вся электробытовая техника). Надежность этих устройств целиком определяется уровнем безотказности их составляющих.

Иное положение с промышленными изделиями небытового назначения, где резервирование аппаратуры используется достаточно часто. В первую очередь имеется в виду различного рода неремонтируемая (невосстанавливаемая) радиоэлектронная аппаратура. Резервирование как в ремонтируемой, так и в неремонтируемой аппаратуре используется на различных уровнях: это резервирование на уровне узлов, блоков и аппаратуры в целом, а также на уровне элементов (глубокое дробное резервирование) [1].

Необходимо отметить, что даже предварительный анализ сформированных экономических моделей общих расходов на производство и обслуживание у потребителя отказавших изделий показывает, что эти модели для резервированных и нерезервированных устройств существенно отличаются и требуют отдельного исследования.

Рынок поставил разработчика и изготовителя инновационных изделий в положение стороны, крайне заинтересованной поведением изделий в процессе эксплуатации. В этом для предприятия-изготовителя вся специфика деятельности в условиях рынка. Это не только расходы на ремонт или замену отказавших в процессе эксплуатации изделий, но и его конкуренто-

способность как производителя этих изделий. При этом предприятие-изготовитель совершенно обоснованно исходит из того, что определенная доля его изделий может отказать в процессе их использования [2].

Понятно, что предприятие-изготовителя не может не интересоваться размером этой доли от общего числа поступающих на рынок изделий, так как это дополнительные расходы на их ремонт или полную замену.

### ВЕРОЯТНОСТЬ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ ИЗДЕЛИЯ

Составить прогноз по доле изделий, выходящих из строя в процессе эксплуатации, можно, зная вероятность безотказной работы изделия  $P$  за время  $t$ .

Показатель вероятности безотказной работы изделия – это количественно оцениваемая величина, которая рассчитывается как отношение неотказавшего числа изделий к их общему числу [3]:

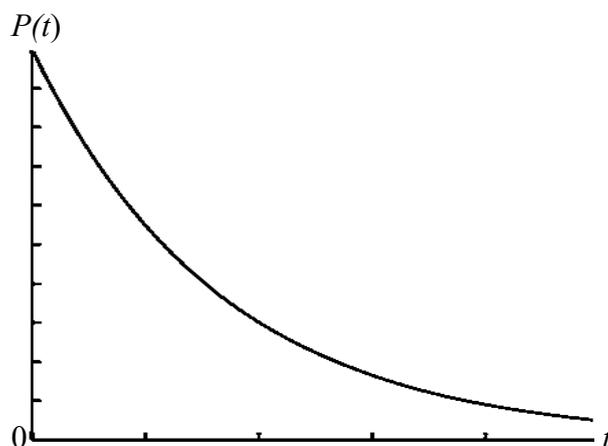
$$P(t) = N - n(t) / N, \quad (1)$$

где  $N$  – общее число изделий;

$n(t)$  – число изделий, отказавших за время  $t$ .

Поскольку с ростом времени эксплуатации величина  $n(t)$  растет, т. е. растет число отказавших изделий, то величина  $P(t)$  со временем уменьшается.

Характер изменения вероятности безотказной работы изделий  $P(t)$  представлен на рис. 1.



**Рис. 1.** Характер изменения вероятности безотказной работы инновационного изделия  
**Fig. 1.** The nature of the change in the probability of failure-free operation of an innovative product

В инженерной практике величину  $P(t)$  принято считать изменяющейся по экспоненциальному закону [4]:

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

где  $\lambda = \frac{1}{T}$  – интенсивность отказов изделия, имеющая размерность  $1/ч$ ;

$T$  – среднее время безотказной работы (наработка на отказ).

## ПОСТРОЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ БЕЗОТКАЗНОСТИ ИЗДЕЛИЙ

В основу построения экономических моделей положена категория безотказности изделий. Это объясняется тем, что категория безотказности является временной функцией, как это было показано на примере вероятности безотказной работы изделия  $P(t)$ . По мере эксплуатации число отказавших изделий  $n(t)$  растёт. При этом совершенно очевидно, что гарантии на изделие, выдаваемые предприятием-изготовителем, должны быть соотнесены с числом возможных отказов изделий за это время.

Знание величины возможных отказов и вероятности безотказной работы для предприятия-изготовителя является вопросом его жизнеспособности на рынке. В этом плане категория безотказности изделий является единственной категорией оценки риска предприятия-изготовителя на рынке при выдаче гарантий на свою продукцию.

Как правило, время  $t$  в вышеуказанном выражении (2) будет выступать в экономических моделях в роли гарантийного срока  $t_g$  предприятия-изготовителя, так как именно в течение гарантийного срока предприятие-изготовитель интересуется своим изделием в процессе его эксплуатации. По истечении этого срока дальнейшей судьбой изделия предприятие-изготовитель может не интересоваться, но в действительности оно это делает, обеспечивая послегарантийный ремонт изделий с оплатой услуг потребителем.

Предположим, что вероятность безотказной работы изделия составляет 0,9 за время  $t = 2$  года. Это означает, что за 2 года из 100 изделий могут отказаться до 10, что позволяет предприятию-изготовителю оценить дополнительные расходы на ремонт или замену потребителю отказавших изделий [5].

Предположим, что предприятие-изготовитель с учетом требований рынка приняло решение установить срок гарантии на изделие 3 года. В этом случае с учетом соотношения (2) имеем систему уравнений

$$\begin{cases} P(t_{g1}) = \exp\{-\lambda t_{g1}\}; \\ P(t_{g2}) = \exp\{-\lambda t_{g2}\}, \end{cases} \quad (3)$$

откуда

$$p(t_{g2}) = \exp[(t_{g2} - t_{g1}) \ln p(t_{g1})]. \quad (4)$$

При  $t_{g1} = 2$  года и  $t_{g2} = 3$  года получим

$$p(t_{g2}) = \exp(-1,5 \ln 0,9) \cong 0,85, \quad (5)$$

т. е. из 100 изделий могут отказаться 15.

Аналогичным образом могут быть проведены оценки величины вероятности безотказной работы для других значений гарантийных сроков и принято решение исходя из требований рынка и стоимости ремонта или замены изделий, которые могут отказаться.

В современных условиях, учитывая темпы развития технологий производства, не исключено, что при кардинальном пересмотре материалов, технологии и схемных решений может оказаться, что новое изделие с повышенной вероятностью безотказной работы будет стоить меньше своего аналога-предшественника с более низким уровнем безотказности.

Это, безусловно, может иметь место, но, как правило, только в виде исключения, поскольку в подавляющем числе случаев повышение безотказности изделия связано с использованием более надежных и, следовательно, более дорогостоящих комплектующих, дополнительных расходов на исследования и проведение дополнительных испытаний, удорожанием входного контроля и подобным, что, конечно, требует дополнительных затрат. Именно это обстоятельство определяет весь спектр возможных решений предприятия-изготовителя в борьбе за рынок [6].

Если стоимость изделия с безотказностью  $p$  составляет  $C$ , то стоимость аналогичного изделия с более высокой безотказностью  $p_1 > p$  составляет  $C_1 > C$ .

Более высокая надежность изделий может быть достигнута различными путями и в общем случае она не одинакова для различных изделий в силу эксплуатационных и схемно-технических особенностей. Величина вероятности безотказной работы одного и того же изделия может быть достигнута предприятиями-изготовителями разными путями, но даже при одном и том же выбранном пути повышения безотказности изделия она не может быть одинаковой на различных предприятиях-изготовителях.

Иначе говоря, цена повышения безотказности может быть различной и зависит от многих обстоятельств, но всегда, если  $p_1 > p$ , то  $C_1 > C$ , повышение надежности изделия всегда связано с ростом его стоимости.

Указанное правило не относится к общим затратам на производство и эксплуатацию партии изделий, поступивших на рынок, хотя для каждого из этих изделий соотношение  $C_1 > C$  при  $p_1 > p$  справедливо всегда.

В этом нет ничего неожиданного, так как затраты на повышение безотказности изделий могут оказаться ниже затрат на ремонт отказавших изделий или наоборот.

Любая попытка предприятия уйти от затрат средств на повышение безотказности изделия может привести к потере конкурентоспособности предприятия-изготовителя на рынке сбыта.

Можно экономить на, как правило, дорогой программе по разработке и внедрению мероприятий, направленных на повышение безотказности изделий, но это обязательно повлечет за собой дополнительные затраты на гарантийный ремонт или замену отказавших у потребителя изделий.

Более того, повышенный объем ремонтных работ, даже если он более выгоден по сравнению с повышением безотказности изделия, также приведет к потере конкурентоспособности предприятия-изготовителя на рынке, его статуса как поставщика продукции с большим количеством ремонтируемых изделий.

Предприятие-изготовитель, исходя из общих затрат на программу создания и сбыта продукции и различного рода частных экономических решений между затратами на ремонт и повышение надежности изделий, в первую очередь должно ориентироваться именно на повышение безотказности изделий, так как этим обеспечивается главное – конкурентоспособность предприятия-изготовителя на рынке сбыта.

Цена повышения безотказности изделий – главный показатель любой экономической модели рынка.

Поиск путей повышения безотказности изделий с минимальными затратами средств – изначальное и главное звено в программе создания и сбыта продукции.

В настоящее время в современной практике отсутствует направление работ по исследованию и оценке экономической эффективности различных путей повышения безотказности инновационных изделий. При этом ни одно предприятие не владеет вопросом формирования цены с учетом повышения надежности выпускаемых инновационных изделий.

Исходя из того, что часть изделий, поставляемых предприятием-изготовителем на рынок, откажет, необходимо знать долю отказавших изделий, которая определяется каче-

ством изготовления и надежностью изделия, заложенной в процессе его проектирования и производства.

Предприятие-изготовитель в течение установленного им гарантийного срока на изделие обязано или отремонтировать отказавшие изделия, или заменить их новыми. В обоих случаях существует такой определенный уровень безотказности изделия  $P_{онт}$ , при котором общие суммарные затраты  $C_{\Sigma}$  на его создание, производство и ремонт отказавшего изделия или замену его новым имеют минимальное значение [7].

При гарантийном обслуживании отказавших изделий общие стоимостные затраты предприятия-изготовителя определяются следующим образом:

$$C_{\Sigma} = C_{изг} + C_{рем}, \quad (6)$$

где  $C_{\Sigma}$  – общие стоимостные затраты предприятия-изготовителя на производство и гарантийное обслуживание изделий;

$C_{изг}$  – затраты предприятия-изготовителя на создание и производство изделий;

$C_{рем}$  – затраты предприятия-изготовителя на гарантийное обслуживание отказавших у потребителя изделий.

Стоимость изготовления изделия тем выше, чем выше его безотказность, т. е.

$$C_{изг} = a_1 p^{\alpha} \quad (7)$$

при  $\alpha > 0$ , где  $\alpha$  – *const*, характеризует в общем случае нелинейный характер роста стоимости инновационного изделия по мере повышения его надежности.

В свою очередь,

$$C_{рем} = \frac{b}{p^{\beta}} \quad \text{при } \beta > 0, \quad (8)$$

где  $\beta$  – *const*, как и величина  $\alpha$  в выражении (7), характеризует в общем случае нелинейный характер снижения стоимости гарантийного ремонта изделия по мере роста его безотказности.

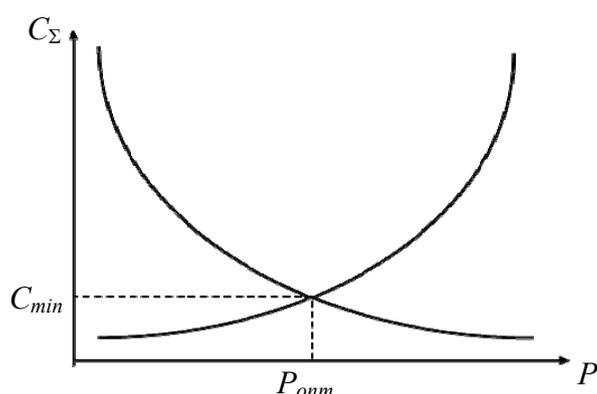
С учетом (7) и (8) выражение (6) принимает вид [8]

$$C_{\Sigma} = a_1 p^{\alpha} + \frac{b}{p^{\beta}}. \quad (9)$$

На рис. 2 зависимость общих суммарных затрат на производство и эксплуатацию инновационных изделий от вероятности их безотказной работы представлена графически.

Главной особенностью этой зависимости является наличие такого уровня безотказности, при котором стоимость затрат на изготовление и ремонт изделий минимальна. Обеспечение безотказности инновационных изделий, отличной от оптимального значения, приведет к перерасходу средств [9].

При  $p < p_{опт}$  перерасход средств будет происходить за счет увеличения работ по восстановлению (ремонту) изделий. При  $p > p_{опт}$  перерасход средств будет происходить за счет дополнительных расходов на повышение безотказной работы инновационных изделий.



**Рис. 2.** Зависимость общих затрат  $C_{\Sigma}$  предприятия-изготовителя на производство и гарантийное обслуживание изделий от вероятности их безотказной работы  
**Fig. 2.** Dependence of the total costs  $C_{\Sigma}$  of the manufacturer on production and warranty maintenance of products against the probability of their trouble-free operation

Величина оптимальной вероятности безотказной работы изделия и минимальные суммарные затраты на производство и эксплуатацию изделий определяются из условия  $dC_{\Sigma} / dp = 0$  с использованием соотношения (9).

Дифференцируя это соотношение, после ряда элементарных преобразований получим [10]

$$P_{opt} = \alpha + \beta \sqrt{\frac{b\beta}{a_1\alpha}}. \quad (10)$$

С учетом выражений (9) и (10) соответственно находим

$$C_{\Sigma min} = a_1 \left(\frac{b\beta}{a_1\alpha}\right)^{\frac{\alpha}{\alpha+\beta}} + b \left(\frac{b\beta}{a_1\alpha}\right)^{\frac{-\beta}{\alpha+\beta}}. \quad (11)$$

При замене отказавших у потребителя изделий новыми предприятие-изготовитель, зная уровень безотказности своих изделий за установленный гарантийный срок, должно заранее спланировать производство дополнительного числа изделий для замены потребителю отказавших. Это означает, что для каждой партии объемом  $N_1$  изделий предприятие-изготовитель выпускает дополнительно  $(1 - p)N_1$  изделий, где  $(1 - p)$  – вероятность отказа изделий за гарантийный срок обслуживания. В результате общий выпуск изделий в партии  $N_{\Sigma}$  составит [11]

$$N_{\Sigma} = N_1 + (1 - p) N_1 = N_1 (2 - p), \quad (12)$$

причем  $N_1 (2 - p) > N_1$ , так как вероятность безотказной работы изделия всегда находится в пределах  $0 < p < 1$ .

Если стоимость каждого изделия  $C$ , то общие суммарные затраты  $C_{\Sigma}$  предприятия-изготовителя на производство и эксплуатацию общей партии изделий составят

$$C_{\Sigma} = CN_{\Sigma} = N_1 (2 - p)C. \quad (13)$$

В самом общем случае стоимость изделия зависит от уровня его надежности  $p$ . Поэтому по аналогии с выражением (9)

$$C = \alpha p^\gamma. \quad (14)$$

Совместное решение уравнений (13) и (14) дает следующее выражение [12]:

$$C_\Sigma = N_1 (2 - p) \alpha p^\gamma. \quad (15)$$

Как и прежде, исходя из условия  $dC_\Sigma / dp = 0$ , находим

$$\frac{dC_\Sigma}{dp} = 2N_1 \alpha p^{\gamma-1} - N_1 \alpha (\gamma + 1) p^\gamma = 0,$$

откуда

$$p_{opt} = \frac{2\gamma}{\gamma + 1}. \quad (16)$$

Таким образом, как в случае гарантийного ремонта отказавшего изделия, так и при его замене новым, всегда существует такой уровень безотказности изделия, определяемый соотношением (16), при котором общие суммарные затраты предприятия-изготовителя на создание и замену потребителю отказавших изделий новыми за установленный гарантийный срок имеют минимальное значение, которое с учетом соотношений (15) и (16) равно

$$C_{\Sigma min} = N_1 \left(2 - \frac{2\gamma}{\gamma + 1}\right) \alpha \left(\frac{2\gamma}{\gamma + 1}\right)^\gamma = N_1 \alpha \gamma^\gamma \left(\frac{2}{\gamma + 1}\right)^{\gamma+1}. \quad (17)$$

Таким образом, в технических условиях на ремонтируемые или заменяемые изделия требования к их безотказности должны определяться соотношениями (10) и (16) соответственно. Общие расходы на изготовление и эксплуатацию изделий в обоих случаях будут минимальны и определяются выражениями (11) и (17) соответственно.

К сожалению, в ряде случаев оптимальное значение вероятности безотказной работы может оказаться в области недопустимо низких значений (в случае высокой стоимости избранного пути повышения безотказности изделия это, как правило, имеет место), что исключает использование рассматриваемой модели.

Предприятие-изготовитель будет вынуждено отказаться от оптимальной модели и перейти в область более высоких значений вероятности безотказной работы и соответственно более высокому уровню суммарных затрат на производство и эксплуатацию изделий по отношению к оптимальной модели. Если при этом предприятие-изготовитель пойдет по пути повышения безотказности изделия, то характер роста общей стоимости затрат будет следовать кривой рис. 2.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно сформулировать следующие основные достоинства предлагаемой экономической модели:

- в каждом конкретном случае, исходя из минимальных затрат на программу создания и эксплуатации изделия, формируются соответственно требования к его безотказности;
- эти требования должны быть научно обоснованными, исключать произвольный характер задания требований по безотказности к изделию и определять выбор соответствующих схемно-технических решений при создании этого изделия;

– такой подход исключает предъявление завышенных требований к безотказности комплекующих, и прежде всего к используемой элементной базе, что особенно важно, так как повышение безотказности элементной базы инновационного изделия является процессом длительным и особенно дорогостоящим;

– предлагаемая экономическая модель является универсальной и применима к любым изделиям. Там, где этот метод не используется, имеют место необоснованное задание завышенных или заниженных требований к безотказности изделий, что, как следствие, приводит к перерасходу денежных и материальных средств или к производству некачественных изделий и потере деловой репутации предприятия-изготовителя. В условиях рынка данная экономическая модель является предпочтительной.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Павлов И.В. Статистические методы оценки надежности сложных систем по результатам испытаний. М.: Радио и связь, 1982. 168 с.
2. Ushakov I.A. Handbook of Reliability Engineering. New York: John Wiley, 1999.
3. Северцев Н.А. Безопасность и отказоустойчивость динамических систем. М.: Культура и техника, 2013. 420 с.
4. Северцев Н.А. Безопасность и защита сложных систем. М., 2014. 238 с.
5. Затучный Д.А. Оценка надежности системы передачи видеoinформации // Электросвязь. 2009. № 4. С. 32–34.
6. Затучный Д.А., Колодий П.П. Вычисление надежности видеосистем на основе построения дополнительных структур // Научный Вестник МГТУ ГА. Серия «Навигация и УВД». 2008. № 136. С. 126–130.
7. Затучный Д.А. Оценка вероятности безотказной работы при передаче информации // Научный Вестник МГТУ ГА. 2013. № 198. С. 88–90.
8. Павлов И.В., Разгуляев С.В. Асимптотические оценки надежности системы с резервированием разнотипными элементами // Инженерный журнал: наука и инновации. 2015. № 2(38). С. 5.
9. Павлов И.В. Нижняя оценка надежности по результатам ускоренных испытаний // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2015. № 3. С. 80–86.
10. Павлов И.В. Доверительные границы для показателей надежности системы с возрастающей функцией интенсивности отказов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 2. С. 70–75.
11. Павлов И.В. Оценка надежности системы с резервированием по результатам испытаний ее элементов // Автоматика и телемеханика. 2017. № 3. С. 149–158.
12. Павлов И.В., Разгуляев С.В. Построение доверительных границ для коэффициента готовности системы с восстанавливаемыми элементами // Вестник МГТУ имени Н.Э. Баумана. Сер. «Естественные науки». 2015. № 4(61). С. 15–22.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Ирина Михайловна Тер-Саакова**, кандидат технических наук, доцент Рижского авиационного института, vilandes@yandex.ru.

**Наталья Ивановна Подалякина**, кандидат технических наук, доцент Рижского авиационного института, vilandes@yandex.ru.

**Владимир Анатольевич Ходаковский**, профессор, доктор технических наук, профессор Рижского авиационного института, vilandes@yandex.ru.

## INFLUENCE OF FAILURE-FREE OPERATION LEVEL ON COSTS RELATED TO PRODUCTION AND GUARANTEE SERVICE OF INNOVATIVE PRODUCTS

Irina M. Ter-Saakova<sup>1</sup>, Nataliya I. Podalyakina<sup>1</sup>, Vladimir A. Khodakovskiy<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Riga Aviation Institute, Riga, Latvia

### ABSTRACT

Basis of market of national consumption is presently formed by non-redundant products. Reliability of these devices is wholly determined by the level of failure-free operation of their constituents. With the industrial products of the non-domestic use redundancy both in the repaired and non-repaired equipment is used on different levels: redundancy at the level of components, blocks and units on the whole, and also at the level of elements (deep fractional redundancy). To make a forecast on the share of products that fail during operation, one can know the probability of failure-free operation of the product for a certain time. The article gives the indicator of the probability of failure-free operation of the product – a quantifiable estimated value, which is calculated as the ratio of the undisclosed number of products to their total number. The graph characterizing the changes in the probability of failure-free operation of the products is given. It is assumed that the probability of failure-free operation of articles varies exponentially. The construction of an economic model based on the category of fail-safe products is considered. This model is built taking into account the condition that the product guarantees issued by the manufacturer should be correlated with the number of possible failures of the products during this time. The conclusion is made that the product reliability category is the only category of risk assessment of the manufacturer on the market when issuing guarantees for its products. The assumption is made that the price of improving the reliability can be different and depends on many circumstances, but always increase of the product reliability is associated with an increase of its cost. The problem is solved, due to the fact that some of the products supplied by the manufacturer to the market will fail. Thus, it is necessary to know the proportion of failed products, which is determined by the quality of manufacture and reliability of the product put in the process of its design and production. The graph of the dependence of the total costs for the production and operation of innovative products on the probability of their trouble-free operation is given. The main advantages of the proposed economic model are formulated.

**Key words:** probability of failure-free operation, redundancy, economic model, operation of the product.

### REFERENCES

1. Pavlov, I.V. (1982). *Statisticheskie metody ocenki nadyozhnosti slozhnyx sistem po rezultatam ispytaniy* [Statistical methods for assessing the reliability of complex systems based on test results]. Moscow: Radio and Communication, 168 p. (in Russian)
2. Ushakov, I.A. (1999). *Handbook of Reliability Engineering*. New York: John Wiley.
3. Severtsev, N.A. (2013). *Bezopasnost i otkazoustojchivost dinamicheskix sistem* [Security and fault tolerance of dynamic systems]. Moscow: Culture and Technology, 420 p. (in Russian)
4. Severtsev, N.A. (2014). *Bezopasnost i zashhita slozhnyx sistem* [Security and protection of complex systems]. Moscow, 238 p. (in Russian)
5. Zatushny, D.A. (2009). *Ocenka nadyozhnosti sistemy peredachi videoinformacii* [Evaluation of the reliability of the video transmission system]. Journal of Electrosvyaz, no. 4, pp. 32–34. (in Russian).
6. Zatushny, D.A. and Kolodiy, P.P. (2008). *Vychislenie nadyozhnosti videosistem na osnove postroeniya dopolnitelnyx struktur* [Calculation of reliability of video systems based on the construction of additional structures]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, series "Navigation and ATC", no. 136, pp. 126–130.
7. Zatushny, D.A. (2013). *Ocenka veroyatnosti bezotkaznoj raboty pri peredache informacii* [Estimation of the probability of failure-free operation in the transmission of information]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 198, pp. 88–90. (in Russian)
8. Pavlov, I.V. and Razgulyaev, S.V. (2015). *Asimptoticheskie ocenki nadyozhnosti sistemy s rezervirovaniem raznotipnymi ehlementami* [Asymptotic estimates of the reliability of the system

with redundancy of different types of elements]. Engineering Journal: Science and Innovation, № 38(2), p. 5. (in Russian)

9. **Pavlov, I.V.** (2015). *Nizhnyaya ocenka nadyozhnosti po rezul'tatam uskorenykh ispytaniy* [Lower reliability score based on accelerated test results]. Problems of machine building and machine reliability, no. 3, pp. 80–86. (in Russian)

10. **Pavlov, I.V.** (2017). *Doveritel'nye granicy dlya pokazatelej nadyozhnosti sistemy s vozrastayushchej funkciej intensivnosti otkazov* [Confidence limits for reliability indicators of the system with increasing function of failure rate]. Problems of machine building and machine reliability, no. 2, pp. 70–75. (in Russian)

11. **Pavlov, I.V.** (2017). *Ocenka nadyozhnosti sistemy s rezervirovaniem po rezul'tatam ispytaniy eyo ehlementov* [Evaluation of the reliability of the system with redundancy based on the test results of its elements]. Automation and telemechanics, no. 3, pp. 149–158. (in Russian)

12. **Pavlov, I.V. and Razgulyaev, S.V.** (2015). *Postroenie doveritel'nyh granic dlya koehfficienta gotovnosti sistemy s vosstanavlivaemymi ehlementami* [Creation of confidence limits for the system availability factor with the elements to be restored]. Bulletin of the Moscow State Technical University named after N.E. Bauman. Series: Natural Sciences, no. 61(4), pp. 15–22. (in Russian)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Irina M. Ter-Saakova**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Riga Aviation Institute, vilandes@yandex.ru.

**Nataliya I. Podalyakina**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Riga Aviation Institute, vilandes@yandex.ru.

**Vladimir A. Khodakovsky**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Riga Aviation Institute, vilandes@yandex.ru.

Поступила в редакцию  
Принята в печать

17.10.2017  
15.05.2018

Received  
Accepted for publication

17.10.2017  
15.05.2018

УДК 539.421

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-125-138

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛЕЕВОГО РЕМОНТНОГО СОЕДИНЕНИЯ**

**А.А. ФЕДОТОВ<sup>1</sup>, А.В. ЦИПЕНКО<sup>1</sup>, А.И. ЛЕБЕДЕВ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
г. Москва, Россия*

<sup>2</sup>*Naus Inc., Отдел промышленности и энергетики, г. Москва, Россия*

В условиях прогнозируемого роста объема пассажирских перевозок авиационным транспортом дополнительное внимание будет уделяться организации конкурентоспособного процесса технического обслуживания и ремонта гражданских воздушных судов. Внедрение новых технологических процессов ремонта конструкций планера самолета и применение современных информационных технологий на этапе проектирования процедур ремонта могут стать преимуществами на расширяющемся рынке услуг послепродажной поддержки воздушного флота гражданской авиации. Клеевой ремонт конструкций планера позволяет более полно использовать несущие способности конструкционных материалов, но применение технологии клеевых соединений требует более сложной процедуры прочностного расчета. Для проведения достоверных расчетов целесообразно применение современных программных пакетов конечно-элементного моделирования, возможности которых позволяют получать адекватные результаты вычислений параметров клеевого ремонтного соединения при действии циклической нагрузки. В данной статье сделан акцент на применении методов конечно-элементного моделирования развития трещины в изотропном материале и способах ускоренного вычисления отклика конструкции с трещиной на циклическое механическое воздействие. Моделирование развития трещины осуществляется при помощи методики XFEM, когда к созданной конечно-элементной аппроксимации добавляются асимптотическая функция имитации вершины трещины и функция разрыва, задающая зазор между поверхностями трещины. Моделирование усталостных свойств ремонтного соединения производится по методике прямого циклического нагружения, использующей разложение в ряд Фурье и интегрирование по времени функции нелинейного поведения материала. Результат интегрирования в каждой заданной точке истории нагружения используется в дальнейшем для прогнозирования усталостной деградации свойств материала на последующем шаге расчета и позволяет оценивать скорость развития повреждений в материале. По итогам анализа результатов расчета сделан вывод о соответствии данных численного моделирования данным натурных экспериментов и приводится оценка времени, затраченного на проведение расчета с применением методов ускоренного моделирования циклического нагружения.

**Ключевые слова:** конечно-элементная модель, клеевой ремонт, циклическое механическое нагружение.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Прогноз объемов перевозок пассажиров и грузов<sup>1</sup> [1] показывает, что ведущие производители авиационной техники ожидают устойчивого роста объемов пассажиропотока в ближайшие 15–20 лет. Для удовлетворения запросов по перевозкам авиакомпаниям потребуется увеличивать флот на 3,5 % ежегодно, что в итоге к 2036 году (с учетом вывода из эксплуатации устаревших и выработавших ресурс самолетов) потребует производства и поставки 41 тыс. новых воздушных судов всех классов. Рост числа эксплуатируемых гражданских самолетов повлечет за собой и расширение объема рынка услуг по техническому обслуживанию и ремонту воздушных судов (ВС) на 3,8–4,1 % в год до 109 млрд долл. к 2027 году [1], [2], что делает более привлекательным этот рынок для компаний, ранее не оказывавших таких услуг, включая собственных разработчиков и производителей авиационной техники (АТ).

<sup>1</sup> Current Market Outlook. Boeing Commercial Airplanes [Электронный ресурс].  
URL: <http://www.boeing.com/commercial/market/current-market-outlook-2017> (дата обращения: 02.02.2018).

Привлечение разработчика АТ к регулярному техническому обслуживанию позволяет разрабатывать и внедрять технологии эксплуатации и ремонта, ранее признаваемые коммерчески нецелесообразными и/или технически трудноосуществимыми при выполнении операций персоналом авиакомпаний, эксплуатирующих ВС. Среди прочих к этой категории операций будет относиться технологический процесс установки ремонтных заплат на поврежденные элементы планера воздушного судна при помощи клеевых составов – процедура клеевого ремонта конструкций планера [3]. Несмотря на наличие значительной базы знаний по теории и особенностям практического применения клеевых составов при создании технических объектов различного назначения [4–14], клеевые соединения при эксплуатации АТ применяются ограниченно. В то же время разработаны и апробированы методики проведения клеевых ремонтных операций на металлических конструкциях планера с применением композитных и гибридных металл-полимерных заплат с использованием клеевых составов<sup>2,3</sup> [15–22].

Однако только лишь факт владения технологиями клеевых ремонтов не означает естественного отражения этих технологий в эксплуатационных документах к ВС. Для проектируемого или эксплуатируемого объекта авиационной техники необходимо разработать и внедрить методику проектировочного расчета клеевых ремонтных соединений, достаточно простую для использования квалифицированным инженером-конструктором без глубокой переподготовки и достаточно надежную в плане применяемых методов расчета для выявления и отсеивания проигрышных вариантов проектируемого соединения. Использование такой методики в цепочке процесса разработки процедур ремонта позволит проводить оперативный анализ направлений поиска оптимальной конструкции. Использование аналогичной методики может быть экономически целесообразным в ходе послепродажного обслуживания флота для сокращения времени ответа на запросы организаций, эксплуатирующих ВС.

### КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ КЛЕЕВОГО РЕМОНТА

Для численного анализа работы клеевого ремонта под нагрузкой была построена конечно-элементная (КЭ) модель клеевого ремонта в среде инженерных расчетов Abaqus. В ходе исследования ставилась задача сформировать КЭ-модель, результаты расчета которой адекватно отражают работу клеевого соединения и позволяют использовать полученный алгоритм вычислений для прогноза скорости развития повреждений в отремонтированном элементе конструкции.

Численная модель ремонта состоит из модели обшивки, содержащей трещину исходной длины, и модели заплаты, выполненной из композиционного материала. Передача усилия клеевой прослойкой между обшивкой и заплатой моделируется заданием условий контакта двух деталей по сопрягаемым поверхностям. Общий вид геометрии модели показан на рис. 1 ( $t_p$  – толщина заплаты,  $t_s$  – толщина обшивки). Характер роста трещины определялся размахом коэффициента интенсивности напряжений (КИН) в вершине трещины  $\Delta K$  – разницей между КИН при максимальном и минимальном уровне механического воздействия за 1 цикл нагружения.

<sup>2</sup> ТР 1.4.1831-98. Ремонт сотовых клееных конструкций из алюминиевых сплавов и полимерных композиционных материалов в условиях авиаремонтных предприятий и эксплуатирующих организаций: технологическая рекомендация. М.: Федеральная служба воздушного транспорта РФ, 1998.

<sup>3</sup> ТР 1.2.1683-2000. Применение клеев и композиционных материалов клеевых для ремонта изделий авиакосмической техники: технологическая рекомендация. М.: Федеральная служба воздушного транспорта РФ, 2000.

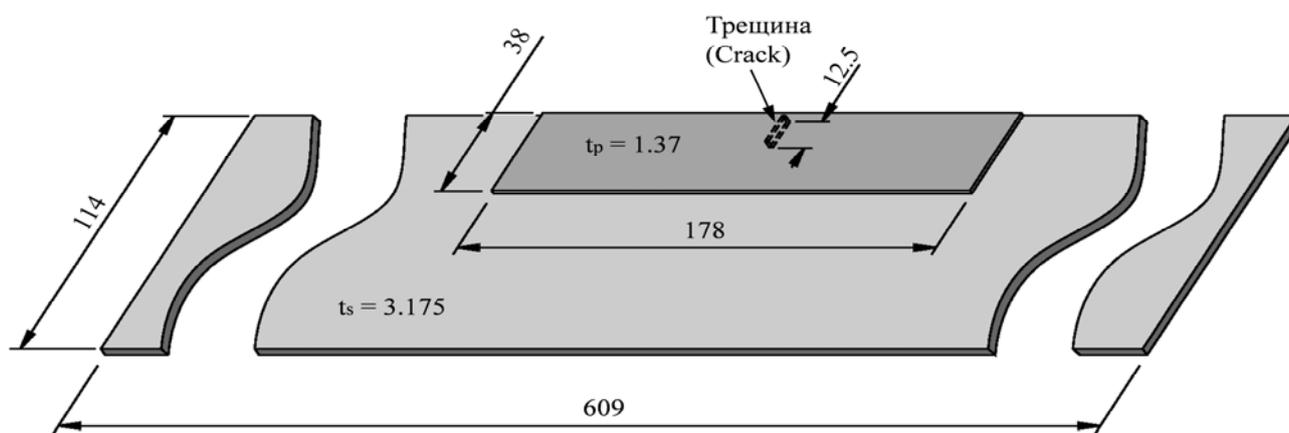


Рис. 1. Геометрия расчетной области конечно-элементной модели (размеры в мм)  
Fig. 1. Dimensions of the finite element model (dimensions in mm)

Для настройки численного расчета и проверки корректности КЭ-модели на начальном этапе проводилось решение задачи растяжения пластины с существующей трещиной заданного размера при отсутствии ремонтной заплаты. Результаты КЭ-расчета сравнивались с данными натурных экспериментов, приведенных в отчете<sup>4</sup>. Для снижения объема расчета модели-ровалась половина образца для испытаний, по плоскости симметрии задавалось граничное условие симметрии. Размеры образца отличались от указанных на рис. 1 и составляли 305 × 76 × 3,175 мм с краевой трещиной длиной 6,35 мм в середине образца. Используемые свойства алюминиевого сплава 7075-T6 приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Table 1

Характеристики сплава 7075-T6 для КЭ-расчета  
Properties of 7075-T6 alloy for FE analysis

Модуль упругости, ГПа (GPa)	73,1
Модуль сдвига, ГПа (GPa)	28
Коэффициент Пуассона	0,33
Коэффициент линейного температурного расширения, $\alpha \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	23,2
Предел прочности при растяжении, МПа (MPa)	462 (67000 psi)
Трещиностойкость $K_{IC}$ , МПа $\sqrt{\text{м}}$ (MPa $\sqrt{\text{m}}$ )	77 [23]

К образцу была приложена синусоидальная циклическая нагрузка амплитудой 9,82 кН с коэффициентом асимметрии цикла  $R = 0,1$ .

Для моделирования процесса развития повреждения при циклической нагрузке применялись расчетные методы Abaqus: XFEM и Direct Cyclic Approach.

### 1. Метод моделирования развития трещины XFEM

Метод XFEM (Extended finite element method) применяется для моделирования разрывов сплошности материала (трещин) и позволяет искать решения уравнений в частных производных для разрывных функций [24]. Метод XFEM задает априорную информацию о ходе решения в КЭ пространстве для симуляции несплошности и сингулярности в материалах независимо от схемы разбиения на конечные элементы. В данном методе к существующей конечно-

<sup>4</sup> 7075-T6 and 2024-T351. Aluminum Alloy Fatigue Crack Growth Rate Data. NASA report TM-2005-213907. 2005.

элементной аппроксимации добавляются новые степени свободы при помощи функций «насыщения»: асимптотическая функция для моделирования вершины трещины и функция разрыва для задания зазора между поверхностями трещины.

Общий принцип работы метода XFEM можно показать на примере двумерной трещины (рис. 2)<sup>5</sup> [25].

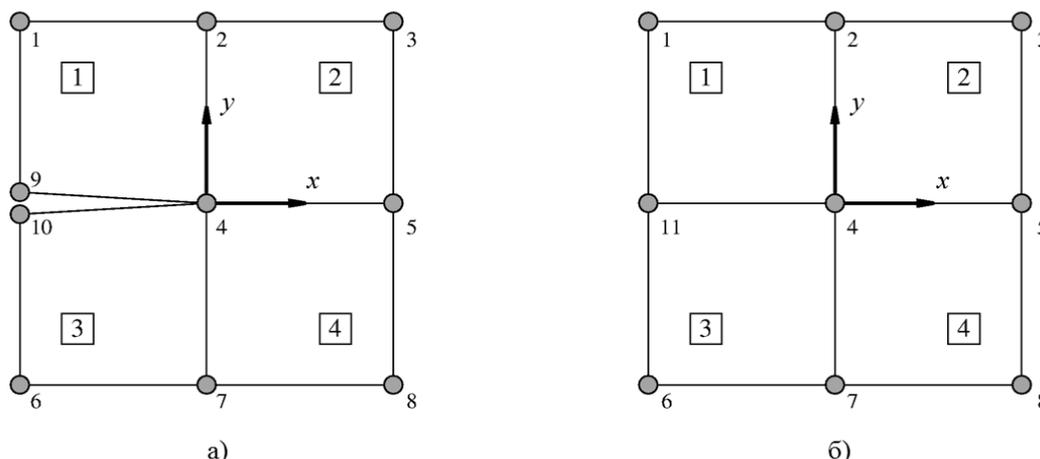


Рис. 2. Схема двумерного случая метода XFEM: а – КЭ-сетка с трещиной, б – КЭ-сетка без трещины  
Fig. 2. 2D-case schema of XFEM: a – FE mesh with crack, b – FE mesh without crack

Конечно-элементная аппроксимация решения приведенного участка модели будет выражаться:

$$\mathbf{u}^h(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{10} N_i(\mathbf{x}) \mathbf{u}_i,$$

где  $N_i$  – функция формы для  $i$ -го узла,  $\mathbf{u}_i$  – вектор перемещений  $i$ -го узла,  $\mathbf{x}$  – вектор координат узла сетки. Введем параметры  $\mathbf{k}$  и  $\mathbf{l}$  как

$$\mathbf{k} = \frac{\mathbf{u}_9 + \mathbf{u}_{10}}{2}, \quad \mathbf{l} = \frac{\mathbf{u}_9 - \mathbf{u}_{10}}{2}.$$

Представив векторы перемещений узлов 9 и 10 в виде  $\mathbf{u}_9 = \mathbf{k} + \mathbf{l}$ ,  $\mathbf{u}_{10} = \mathbf{k} - \mathbf{l}$ , можно получить решение конечно-элементной задачи как выражение

$$\mathbf{u}^h = \sum_{i=1}^8 N_i \mathbf{u}_i + \mathbf{k}(N_9 + N_{10}) + \mathbf{l}(N_9 - N_{10}) H(\mathbf{x});$$

здесь функция скачка  $H(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, & y > 0; \\ -1, & y < 0. \end{cases}$

Заменив сумму  $N_9 + N_{10}$  функцией формы для нового «фиктивного» узла  $N_{11}$  и  $\mathbf{k}$  на  $\mathbf{u}_{11}$ , получим конечно-элементную аппроксимацию в виде

$$\mathbf{u}^h = \underbrace{\sum_{i=1}^8 N_i \mathbf{u}_i + N_{11} \mathbf{u}_{11}}_{\text{обычное КЭ решение}} + \underbrace{\mathbf{l} N_{11} H(\mathbf{x})}_{\text{функция «насыщения»}} \quad (1)$$

<sup>5</sup> Abaqus/CAE 6.10 User's Manual, Dassault Systèmes, 2010.

В структуре выражения (1) два первых слагаемых представляют собой стандартное решение по методу конечных элементов, а третье слагаемое описывает «зазор» между поверхностями трещины, соответственно, сетка с трещиной может быть представлена в расчете сеткой без фактической трещины, но с добавочной функцией разрыва.

Для моделирования сингулярности в вершине трещины вводится дополнительная асимптотическая функция  $\psi$  в ячейках, прилегающих к трещине (рис. 3) [25].

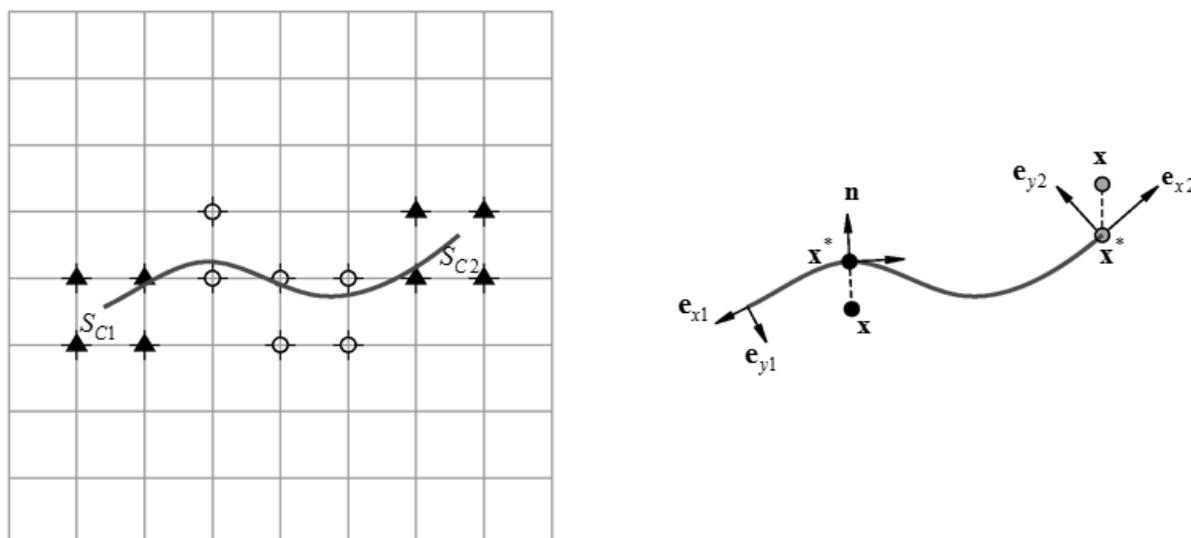


Рис. 3. Схема расчета локальной трещины в КЭ-сетке  
Fig. 3. Schema of the local crack analysis with FE mesh

Обозначив все узлы расчетной сетки как  $S$ , узлы, окружающие вершину трещины, как  $S_c$ , узлы, чьи связи пересекаются трещиной, как  $S_h$ , получим решение задачи в форме

$$\mathbf{u} = \sum_{I \in \mathcal{S}} N_I(\mathbf{x}) \left[ \mathbf{u}_I + \underbrace{H(\mathbf{x}) \mathbf{a}_I}_{I \in \mathcal{S}_h} + \sum_{i=1}^4 \underbrace{\psi_i(\mathbf{x}) \mathbf{b}_I^i}_{I \in \mathcal{S}_c} \right], \quad (2)$$

где  $\mathbf{u}_I$  – вектор перемещений узлов,  $\mathbf{a}_I$  – вектор степеней свободы узлов сетки, совместно с функцией скачка  $H(\mathbf{x})$  представляющий зазор между поверхностями трещины,  $\mathbf{b}_I^i$  – вектор степеней свободы узлов сетки, совместно с функцией вершины трещины  $\psi_i(\mathbf{x})$  представляющий сингулярность в материале.

Функция скачка может быть определена в виде [26]

$$H(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, & \text{при } (\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) \cdot \mathbf{n} \geq 0, \\ -1, & \text{в остальных случаях,} \end{cases}$$

где  $\mathbf{x}^*$  – координаты точки трещины, ближайшей к рассматриваемой точке  $\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{n}$  – вектор внешней нормали в точке  $\mathbf{x}^*$ .

Для изотропного упругого материала (каким в данном случае можно считать алюминиевый сплав 7075-T6) функция вершины трещины представляется в виде [26]

$$\{\psi_i(\mathbf{x})\}_{i=1}^4 = \left[ \sqrt{r} \sin \frac{\alpha}{2}, \sqrt{r} \cos \frac{\alpha}{2}, \sqrt{r} \sin \frac{\alpha}{2} \sin \alpha, \sqrt{r} \cos \frac{\alpha}{2} \sin \alpha \right],$$

где  $(r, \alpha)$  – локальные полярные координаты в вершине трещины,  $-\pi \leq \alpha \leq \pi$ .

Для расчета развития существующей трещины задаются характеристики трещиностойкости материала и производится вычисление действующей интенсивности напряжений в вершине трещины. КИН определяется по методу  $J$ -интеграла, позволяющему определять скорость высвобождения энергии деформации вблизи вершины трещины. Для двумерной трещины  $J$ -интеграл записывается в виде

$$J = \lim_{\Gamma \rightarrow 0} \int_{\Gamma} \mathbf{n} \times \mathbf{H} \times \mathbf{q} \, d\Gamma,$$

где  $\Gamma$  – контур, охватывающий вершину трещины,  $\mathbf{n}$  – вектор внешней нормали к контуру,  $\mathbf{q}$  – вектор направления развития трещины. Функция  $\mathbf{H}$  представляется зависимостью:

$$\mathbf{H} = W \mathbf{I} - \boldsymbol{\sigma} \times \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}},$$

$W$  – упругая энергия деформации,  $\mathbf{I}$  – единичный тензор,  $\boldsymbol{\sigma}$  – тензор напряжений Коши,  $\mathbf{u}$  – вектор перемещений.

Для изотропного материала  $J$ -интеграл связан с коэффициентами интенсивности напряжений по трем модам следующим выражением:

$$J = \frac{1}{E} (K_I^2 + K_{II}^2) + \frac{1}{2G} K_{III}^2$$

( $\bar{E} = E$  для плоско-напряженного состояния,  $\bar{E} = \frac{E}{1-\nu^2}$  для плоско-деформированного состояния); а для чистого нормального раскрытия трещины по моде I выражение для  $J$ -интеграла выглядит еще проще:

$$J_I = K_I^2 \left( \frac{1-\nu^2}{E} \right).$$

После нахождения численными методами значения  $J$ -интеграла (Abaqus предлагает такую возможность) можно определить КИН в вершине трещины и получить облако точек для построения зависимости скорости прироста трещины от КИН и провести сравнение результатов КЭ-расчета с данными натуральных испытаний.

## 2. Метод моделирования усталостного поведения конструкции

Традиционный подход к определению долговечности материала конструкции связан с построением кривых  $S-N$  (величина нагрузки к числу циклов до разрушения). Такой подход широко применяется при проектировании различных изделий, но он не позволяет напрямую установить зависимость между размерами повреждений и числом циклов приложенной нагрузки. Другой метод прогнозирования долговечности материала опирается на характеристику развития повреждения под действием неупругих деформаций, при которых происходит стабилизация отклика конструкции по истечении множества циклов нагружения<sup>6</sup>. Поскольку прямое моделирование циклической нагрузки даже на простейшей конструкции обычно занимает неприемлемое время, численное моделирование процессов сопротивления усталости проводят на основе малого интервала времени из общей истории нагружения конструкции, после чего отклик

<sup>6</sup> Abaqus/CAE 6.10 User's Manual, Dassault Systèmes, 2010.

материала на усталостную нагрузку экстраполируют по эмпирическим зависимостям на весь интересующий период времени нагружения.

Метод прямого циклического нагружения (Direct Cyclic Approach) позволяет построить модель усталостного поведения конструкции, эффективную с точки зрения времени вычислений и потребных ресурсов. Метод использует разложение в ряд Фурье и интегрирование по времени нелинейного поведения материала для получения стабилизированного отклика конструкции в дискретных точках истории нагружения. Решение в каждой такой точке используется для прогнозирования усталостной деградации свойств материала на следующем шаге расчета, что позволяет оценивать скорость развития повреждений в материале. Циклическое нагружение приводит к накоплению в материале пластических деформаций, что в свою очередь способствует развитию существующих в материале повреждений. Развитие повреждений будет характеризоваться установившимся гистерезисом энергии деформаций при приложении циклической нагрузки (рис. 4).

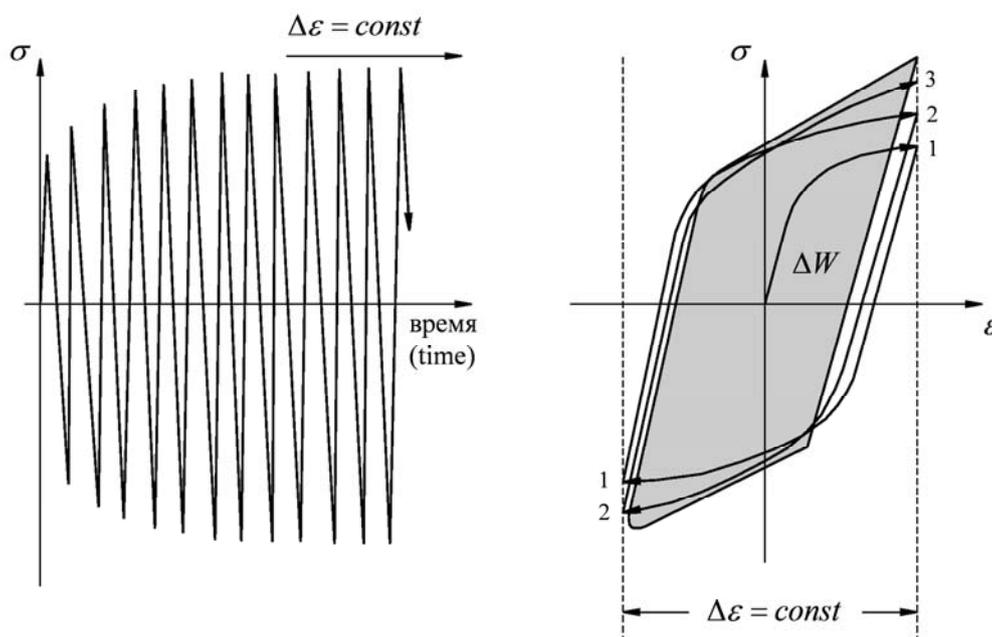


Рис. 4. Накопление пластических деформаций при прямом циклическом нагружении  
Fig. 4. Accumulation of plastic strains during direct cyclic loading

Характер развития повреждения будет определяться величиной накопленной за цикл энергии неупругой деформации  $\Delta w$ . Свойства материала и  $\Delta w$  используются для определения цикла  $N_0$ , на котором начнется рост повреждения. В конце каждого стабилизированного цикла нагрузки  $N$  проводится проверка условия начала роста повреждения  $N > N_0$  для всех узловых точек рассматриваемого материала; деградация свойств не применяется до тех пор, пока заданное условие не выполнено. Как только условие начала развития повреждения выполнено для какой-либо узловой точки материала к концу стабилизированного цикла  $N$ , производится экстраполяция переменной поврежденности материала  $D_N$  до следующего цикла нагрузки с заданным шагом  $\Delta N$ . Новое состояние материала будет описываться зависимостью

$$D_{N+\Delta N} = D_N + \frac{\Delta N}{L} c_3 \Delta W^{c_4},$$

где  $L$  – характерная длина,  $c_3$  и  $c_4$  – константы материала, известные по результатам усталостных испытаний стандартизированных образцов, выполненных из рассматриваемого материала.

Численная реализация описанного метода имеет ограничения в виде запрета на изменение условий контакта поверхностей в процессе расчета, кроме этого, модель имеет дело с малыми деформациями и перемещениями точек материала и не может дать корректного решения для задач, предполагающих наличие значительных пластических деформаций.

По результатам численного моделирования разрушения пластины из алюминиевого сплава 7075-T6 с краевой трещиной было проведено сравнение полученной зависимости роста повреждения от числа циклов приложенной нагрузки  $\Delta a(N)$  с известными экспериментальными данными [26] (рис. 5).

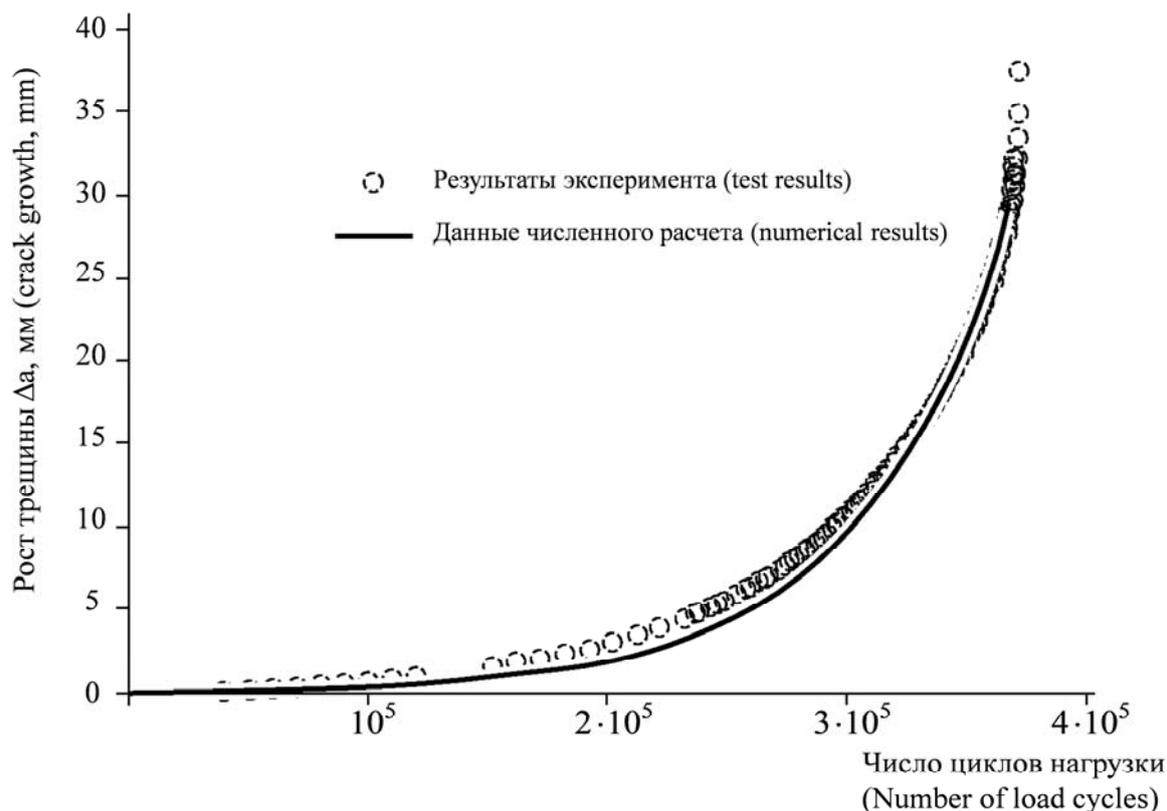


Рис. 5. Сравнение результатов численного расчета разрушения пластины из сплава 7075-T6 с экспериментальными данными

Fig. 5. Comparison of the analysis numerical results of plate fracture with test data

Из графика на рис. 5 видно, что при заданных параметрах численной модели наблюдается хорошее совпадение результатов расчета с данными натурных экспериментов, что позволяет использовать созданную КЭ-модель для анализа развития повреждения при наличии установленной на пластину ремонтной заплаты.

## РЕЗУЛЬТАТЫ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА КЛЕЕВОГО РЕМОНТА

Для моделирования клеевого ремонтного соединения исходная модель разрушения алюминиевой пластины была дополнена моделью композитной боропластиковой заплаты, установленной на место повреждения так, чтобы трещина располагалась в центре заплаты. Сравнение результатов расчета по созданной КЭ-модели проводилось по данным, опубликованным в работе [27]. Для приведения модели в соответствие модельному случаю, опи-

санному в литературе, геометрия расчетной области была изменена (размеры пластины, заплата и трещины указаны на рис. 1). Свойства материала боропластиковой заплаты приведены в табл. 2.

Таблица 2  
Table 2

Характеристики 1 слоя боропластика для КЭ-расчета  
1-ply properties of the boron plastic for FE analysis

Продольный модуль упругости, ГПа (GPa)	193,0
Поперечный модуль упругости, ГПа (GPa)	18,7
Коэффициент Пуассона	0,21
Модуль сдвига, ГПа (GPa)	5,5
Толщина слоя, мм (mm)	0,137
Продольный коэффициент линейного температурного расширения, $\alpha \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	4,3
Поперечный коэффициент линейного температурного расширения, $\alpha \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$	21,4

Пластина с установленной заплатай нагружалась циклическим растягивающим усилием с амплитудой 120 МПа и коэффициентом асимметрии цикла  $R = 0,1$ .

На рис. 6 приведены графики изменения КИН (при максимальной и минимальной нагрузке в цикле) в вершине трещины, построенные на основе данных созданной КЭ-модели для некоторых значений длины трещины  $a$ , и дается сравнение с КИН, указанными в работе [27]. Отмечается хорошее совпадение результатов КЭ-расчета по построенной модели с опубликованными ранее результатами исследований, что дает возможность сделать вывод о корректной работе численной модели клеевого ремонта.

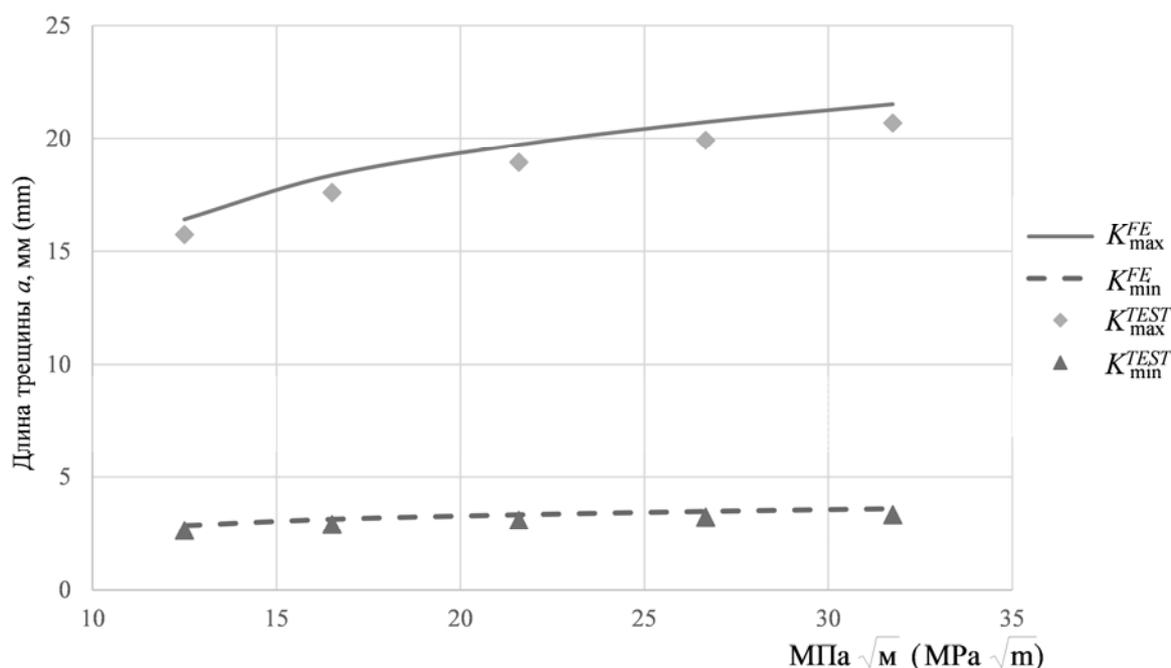


Рис. 6. Сравнение результатов численного моделирования с экспериментальными данными [27]  
Fig. 6. Comparison of the numerical data with test data given in [27]

Отклонение значений КИН по результатам численного эксперимента  $K^{FE}$  не превышает 7 % для значений при максимальной нагрузке в цикле и не превышает 5 % для значений при минимальной нагрузке за 1 цикл.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы в программной среде расчетного комплекса Abaqus была построена конечно-элементная модель клеевого ремонтного соединения. После настройки модели по данным натурных экспериментов был проведен анализ скорости развития повреждения в виде трещины в пластине из алюминиевого сплава при наличии установленной ремонтной заплаты, замедляющей рост трещины. Вычисления проводились на персональном компьютере с CPU Intel Core i7, 3 GHz и RAM 6 Gb. Количество конечных элементов, потребовавшихся для сходимости расчета и получения значений, близких к данным натурных экспериментов, составило 10930.

По итогам численного анализа можно сделать следующие выводы:

– полученная конечно-элементная модель позволяет проводить анализ эффективности работы ремонтной заплаты и оценивать скорость развития повреждения в ремонтируемой конструкции;

– сравнение величин КИН, полученных в ходе КЭ-моделирования, с величинами, известными по опубликованным данным натурных экспериментов, позволяет сделать вывод об адекватности получаемых результатов расчета;

– переоценка расчетных значений КИН по сравнению с результатами эксперимента на 5–7 % позволяет рассчитывать скорость развития повреждения и устанавливать ограничения на допустимые размеры трещины с запасом по прочности;

– применение технологии прямого циклического нагружения (Direct Cyclic Approach) способствует существенному сокращению времени расчета одного варианта конструкции: расчет напряженно-деформированного состояния при действии одного цикла синусоидальной нагрузки занял 10 с, что потребовало бы около месяца для непосредственного расчета всего интервала нагружения в  $3,5 \cdot 10^5$  циклов, тогда как применение Direct Cyclic Approach позволило получить удовлетворительные результаты расчета при действии циклической нагрузки за 180 мин.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Harrison M.** MRO Forecast and Market Trends // Proceeding of IATA 12th Maintenance Cost Conference. Bangkok, 14–15 Sept. 2016.
2. **Cooper T.** Global Fleet & MRO Market Forecast Summary 2017–2027 [Электронный ресурс] / J. Smiley, C. Porter, C. Precourt. URL: <http://www.oliverwyman.com/our-expertise/insights/2017/feb/2017-2027-fleet-mro-forecast.html> (дата обращения 09.02.2018).
3. **Moore V.** Views Diverge On Bonded Repairs To Primary Composite Structures. AWIN First, Oct 13, 2014 [Электронный ресурс]. URL: <http://aviationweek.com/mro/views-diverge-bonded-repairs-primary-composite-structures> (дата обращения 09.02.2018).
4. **Артюхин Ю.П.** Напряжения в клеевых соединениях // Исследования по теории пластин и оболочек. 1973. Вып. 8. С. 23–28.
5. **Воробей В.В., Сироткин О.С.** Соединения элементов конструкций из композиционных материалов. Л.: Машиностроение, 1985.
6. **Кутыинов В.Ф.** Расчет клеевых соединений // Проектирование, расчет и испытания конструкций из композиционных материалов. Руководящие технические материалы. М.: ЦАГИ, 1979. Вып. 7. С. 14–31.

7. Семин М.И. Проектирование клеевых соединений. М.: Машиностроение, 1982.
8. Хватан А.М. Расчет клеевого соединения с учетом пластичности клея // Ученые записки ЦАГИ. 1979. Т. X, № 4. С. 140–143.
9. Швечков Е.И., Кудряшов А.Б., Хватан А.М. Анализ напряженно-деформированного состояния клеевого соединения // Проблемы прочности. 1985. № 9. С. 88–92.
10. Турусов Р.А. Адгезионная механика. М.: НИУ МГСУ, 2016. 228 с.
11. Фрейдин А.С., Турусов Р.А. Свойства и расчет адгезионных соединений. М.: Химия, 1990.
12. Турусов Р.А., Маневич Л.И. Метод контактного слоя в адгезионной механике // Клеи. Герметики. Технологии. 2009. № 6. С. 2–10.
13. Tomblin J.S. Bonded Repair of Aircraft Composite Sandwich Structures / L. Salah, J.M. Welch, M.D. Borgman. Report DOT/FAA/AR-03/74, 2004.
14. Baker A.A., Rose L.R.F., Jones R. Advances in the Bonded Composite Repairs of Metallic Aircraft Structure. Elsevier Ltd, 2002.
15. Куликов В.В., Петрова А.П. Применение клеев при ремонте авиационной техники: обзор литературы // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2017. № 2. С. 21–27.
16. Петрова А.П., Куликов В.В. Клеевые материалы, используемые в ремонтно-восстановительных работах // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2009. № 9. С. 5–14.
17. Петрова А.П., Куликов В.В. Свойства клеевых материалов, используемых в ремонтно-восстановительных работах // Клеи. Герметики. Технологии. 2008. № 8. С. 2–12.
18. Виленц В.С. Особенности ремонта дефектов типа «отслоение-расслоение» на сотовых конструкциях из алюминиевых сплавов и композитных материалов в условиях эксплуатации // Клеи. Герметики. Технологии. 2008. № 11. С. 14–17.
19. Жадова Н.С., Лукина Н.Ф., Тюменева Т.Ю. Самоклеящиеся материалы для временного оперативного ремонта внешней поверхности изделий авиационной техники // Клеи. Герметики. Технологии. 2012. №6. С. 2–4.
20. Куликов В.В. Подготовка поверхности алюминиевых сплавов при проведении ремонта авиационной техники с применением клеев / Т.Г. Павловская, А.П. Петрова, К.Е. Захаров // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2016. № 2. С. 14–17.
21. Куликов В.В. Исследование процесса отверждения эпоксидного клея ВК-27 на поверхности фенольно-каучукового клеевого подслоя ВК-25 / В.М. Алексахин, Н.В. Антюфеева, А.П. Петрова, И.А. Шарова // Клеи. Герметики. Технологии. 2017. № 4. С. 2–5.
22. Шарова И.А. Влияние подслоя фенольно-каучуковых клеев на свойства эпоксидного клея холодного отверждения ВК-27 и его модификаций при проведении ремонта авиационной техники / В.В. Куликов, А.П. Петрова, О.А. Шуклина // Клеи. Герметики. Технологии. 2016. № 10. С. 18–21.
23. Нестеренко Б.Г. Трещиностойкость материалов обшивки конструкций гражданских самолетов // Научный вестник МГТУ ГА. 2010. № 153. С. 7–14.
24. Belytschko T., Black T. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 1999. Vol. 45, No. 5. Pp. 601–620.
25. Moës N., Dolbow J., Belytschko T. A finite element method for crack growth without remeshing // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 1999. Vol. 46, No. 1. Pp. 132–150.
26. Sukumar N. Extended finite element method for three-dimensional crack modelling / N. Moës, B. Moran, T. Belytschko // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2000. Vol. 48, No. 11. Pp. 1549–1570.
27. Duong C.N., Wang C.H. On the characterization of fatigue crack growth in one-sided bonded repair // Journal of Engineering Materials and Technology. 2004. Vol. 136. Pp. 192–198.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Федотов Алексей Александрович**, аспирант МАИ, alexey.a.fedotov@inbox.ru.

**Ципенко Антон Владимирович**, доктор технических наук, заведующий кафедрой МАИ, tsipenko\_av@mail.ru.

**Лебедев Алексей Игоревич**, инженер-проектировщик, Hays Inc. Russia, aleksey.lebedev.2011@bk.ru.

## NUMERICAL MODELLING OF THE AIRFRAME DAMAGE GROWTH FOR THE ADHESIVE REPAIR JOINT CALCULATION

**Alexey A. Fedotov<sup>1</sup>, Anton V. Tsipenko<sup>1</sup>, Aleksey I. Lebedev<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Hays Inc., Energy Industry Department, Moscow, Russia*

### ABSTRACT

In the context of the predicted growth in air transportation, the additional attention will be paid to the organization of the competitive maintenance and repair operations for the commercial airplanes. The implementation of new technological processes for airframe repairs and the application of modern information technologies during the development of the repair procedures can be a significant advantage in the expanding market of post-production support of the commercial air fleet. Airframe adhesive repairs allow using lifting abilities of the materials more intensively, but application of the adhesive joints technology requires more complicated strength calculation procedure. It is advisable to utilize the modern finite element software packages to perform the reliable calculation. The capabilities of these software packages allow obtaining adequate computational results for adhesive repair joint parameters subjected to cyclic loads. This paper is concentrated on application of the finite element methods to simulate the crack growth in isotropic material and on methods for accelerated calculation of the mechanical response of cracked structures. Crack growth simulation is performed based on XFEM methods where the created finite element model is complemented with asymptotic imitation function of crack tip and with discontinuous jump function across the crack surfaces. Fatigue properties of the repair joint are modelled in accordance with direct cyclic approach, where a Fourier series approximation with time integration of the nonlinear material behavior is applied. After that, the result of integration at each point of the load history is used for the prediction of the material fatigue properties degradation at the next step of computation; this allows us to evaluate the material damage growth rate. Based on calculation results, a conclusion was made that the received numerical data match the full-scale test results; the time spent for calculation with the usage of accelerated computational methods was evaluated.

**Key words:** finite element model, adhesive repair, cyclic mechanical load.

### REFERENCES

1. **Harrison, M.** (2016). *MRO Forecast and Market Trends*. Proceeding of IATA 12th Maintenance Cost Conference. Bangkok, 14–15 Sept.
2. **Cooper, T., Smiley, J., Porter, C. and Precourt, C.** *Global Fleet & MRO Market Forecast Summary 2017–2027*. Available at: <http://www.oliverwyman.com/our-expertise/insights/2017/feb/2017-2027-fleet-mro-forecast.html> (accessed 09.02.2018).
3. **Moore, V.** (2014). *Views Diverge On Bonded Repairs To Primary Composite Structures*. *AWIN First*, Oct 13, 2014. Available at: <http://aviationweek.com/mro/views-diverge-bonded-repairs-primary-composite-structures> (accessed 09.02.2018).
4. **Artyukhin, Y.P.** (1973). *Napryazheniya v kleevykh soedineniyakh* [Stresses in bonded joints]. *Issledovaniya po teorii plastin i obolochek* [Researches on theory of plates and shells], iss. 8, pp. 23–28. (in Russian)

5. Vorobei, V.V. and Sirotkin, O.S. (1985). *Soedineniya elementov konstruksii iz kompozitsionnykh materialov* [Joints of structural elements made of composite materials]. Leningrad: Mashinostroenie. (in Russian)
6. Kut'inov, V.F. (1979). *Raschet klevykh soedinenii*. [Analysis of bonded joints]. *Proektirovanie, raschet i ispytaniya konstruksii iz kompozitsionnykh materilov. Rukovodyashchie tekhnicheskie materialy* [Design, analysis and testing of the composite structures. Technical handbook]. Moscow: TsAGI, Iss. 7, pp. 14–31. (in Russian)
7. Semin, M.I. (1982). *Proektirovanie klevykh soedinenii* [Design of bonded joints]. Moscow: Mashinostroenie. (in Russian)
8. Khvatan, A.M. (1979). *Raschet klevogo soedineniya s uchetom plastichnosti kleya* [Analysis of bonded joint with adhesive plasticity]. *Uchenye zapiski TsAGI*, vol. X, no. 4, pp. 140–143. (in Russian)
9. Shvechkov, E.I., Kudryashov, A.B. and Khvatan, A.M. (1985). *Analiz napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya klevogo soedineniya* [Analysis of stress-strain condition of the bonded joint]. *Problemy prochnosti*, no. 9, pp. 88–92. (in Russian)
10. Turusov, R.A. (2016). *Adgezionnaya mekhanika* [Adhesive mechanics]. Moscow: NRU MGSU, 228 p. (in Russian)
11. Freidin, A.S. and Turusov, R.A. (1990). *Svoistva i raschet adgezionnykh soedinenii* [Properties and analysis of adhesive joints]. Moscow: Khimiya. (in Russian)
12. Turusov, R.A. and Manevich, L.I. (2010). *Contact layer method in adhesive mechanics*. Polymer Science. Series D, vol. 3, no. 1, pp. 1–9.
13. Tomblin, J.S., Salah, L., Welch, J.M. and Borgman, M.D. (2004). *Bonded Repair of Aircraft Composite Sandwich Structures*. Report DOT/FAA/AR-03/74.
14. Baker, A.A., Rose, L.R.F. and Jones, R. (2002). *Advances in the Bonded Composite Repairs of Metallic Aircraft Structure*. Elsevier Ltd.
15. Kulikov, V.V. and Petrova, A.P. (2017). *Primenenie klev pri remonte aviatsionnoi tekhniki. (Obzor literatury)* [Application of the adhesives for aircraft repairs. (Literature survey)]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*, no. 2, pp. 21–27. (in Russian)
16. Petrova, A.P. and Kulikov, V.V. (2009). *Klevye materialy, ispol'zuemye v remontno-vosstanovitel'nykh rabotakh* [Adhesive materials used for repair-and-renewal operations]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*, no. 9, pp. 5–14. (in Russian)
17. Petrova, A.P. and Kulikov, V.V. (2009). *Properties of adhesive materials used in repair-and-renewal operations*. Polymer Science. Series D, vol. 2, no. 1, pp. 34–43.
18. Vilents, V.S. (2009). *Peculiarities of repairing delamination-lamination-type defects on honeycomb sandwiches made from aluminum alloys and composite materials under operating conditions*. Polymer Science. Series D, vol. 2, no. 2, pp. 112–114.
19. Zhadova, N.S., Lukina, N.F. and Tyumeneva, T.Yu. (2012). *Samokleyashchiesya materialy dlya vremennogo operativnogo remonta vneshnei poverkhnosti izdelii aviatsionnoi tekhniki* [Self-adhesive materials for temporary operative repairs on the outer surface of aircraft structures]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, no. 6, pp. 2–4. (in Russian)
20. Kulikov, V.V., Pavlovskaya, T.G., Petrova, A.P. and Zakharov, K.E. (2016). *Podgotovka poverkhnosti alyuminievykh splavov pri provedenii remonta aviatsionnoi tekhniki s primeneniem klev* [Surface preparation of the aluminum alloys for aircraft bonded repairs]. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*, no. 2, pp. 14–17. (in Russian)
21. Kulikov, V.V., Aleksashin, V.M., Antyufeeva, N.V., Petrova, A.P. and Sharova, I.A. (2017). *Issledovanie protsessa otverzheniya epoksidnogo kleya VK-27 na poverkhnosti fenol'no-kauchukovogo klevogo podsloya VK-25* [Research of the curing process of epoxy adhesive VK-27 on the surface of phenolic-rubber adhesive sublayer of VK-25]. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*, no. 4, pp. 2–5. (in Russian)

22. Sharova, I.A., Kulikov, V.V., Petrova, A.P. and Shuklina, O.A. (2016). *Vliyanie pod-sloya fenol'no-kauchukovykh kleev na svoistva epoksidnogo kleya kholodnogo otverzhdeniya VK-27 i ego modifikatsii pri provedenii remonta aviatsionnoi tekhniki* [Effect of phenolic-rubber adhesive sub-layer on the properties of the low-temperature cure epoxy adhesive VK-27 and it's modifications for aircraft repairs purposes]. Klei. Germetiki. Tekhnologii, no. 10, pp. 18–21. (in Russian)

23. Nesterenko, B.G. (2010). *Crack resistance of skin materials for civil airplane structures*. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 153, pp. 7–14. (in Russian)

24. Belytschko, T. and Black, T. (1999). *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 45, no. 5, pp. 601–620.

25. Moës, N., Dolbow, J. and Belytschko, T. (1999). *A finite element method for crack growth without remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 46, no. 1, pp. 132–150.

26. Sukumar, N., Moës, N., Moran, B. and Belytschko, T. (2000). *Extended finite element method for three-dimensional crack modelling*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 48, no. 11, pp. 1549–1570.

27. Duong, C.N. and Wang, C.H. (2004). *On the characterization of fatigue crack growth in one-sided bonded repair*. Journal of Engineering Materials and Technology, vol. 136, pp. 192–198.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Alexey A. Fedotov**, Postgraduate Student of Moscow State Aviation Institute, alexey.a.fedotov@inbox.ru.

**Anton V. Tsipenko**, Doctor of Technical Sciences, Head of Chair of Moscow Aviation Institute, tsipenko\_av@mail.ru.

**Aleksey I. Lebedev**, Design Engineer, Hays Inc. Russia, aleksey.lebedev.2011@bk.ru.

Поступила в редакцию 06.04.2018  
Принята в печать 15.05.2018

Received 06.04.2018  
Accepted for publication 15.05.2018

УДК 517.977.58

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-139-149

## ПРИМЕНЕНИЕ ГИБРИДНОГО МЕТОДА СЛУЧАЙНОГО ПОИСКА В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

А.В. ПАНТЕЛЕЕВ<sup>1</sup>, Д.А. РОДИОНОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
г. Москва, Россия

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 16-07-00419 А

В работе предложена модификация метода случайного поиска с последовательной редукцией области исследования (метода Luus – Jaakola), относящегося к классу метаэвристических методов поиска глобального экстремума. Предложен гибридный метод глобальной оптимизации, основанный на совместном использовании метода случайного поиска с последовательной редукцией области исследования, метода адаптивного случайного поиска и метода поиска наилучшей пробы. Полученный модифицированный метод применен для решения прикладных инженерных задач оптимизации параметров технических систем. Этот класс задач возникает при проектировании ракетно-космических и авиационных конструкций. Целью таких задач является минимизация стоимости или веса рассматриваемой конструкции. Подобные задачи представляют собой задачи условной глобальной оптимизации со сложным рельефом поверхностей уровня целевой функции и с большим числом переменных, что делает применение классических методов глобальной оптимизации малоэффективным, в то время как использование метаэвристических методов позволяет получить достаточно точное решение за приемлемое время. В работе решение задачи глобальной условной оптимизации происходит с использованием метода внешних штрафов. Выполняется переход к задаче оптимизации вспомогательной целевой функции, при этом параметры штрафа подбираются так, чтобы выполнялись наложенные ограничения, определяющие множество допустимых решений. В работе рассмотрены две прикладные задачи: определение параметров сосуда высокого давления и определение параметров натяжной/компрессионной пружины. На основе предложенного алгоритма разработан комплекс программ, решающих данные прикладные задачи, результаты работы которого сравниваются с результатами работы немодифицированного метода случайного поиска с последовательной редукцией области исследования и другими метаэвристическими алгоритмами. Сравнение полученных результатов демонстрирует эффективность предложенного метода.

**Ключевые слова:** метаэвристические методы оптимизации, глобальный экстремум, случайный поиск, гибридные методы.

### ВВЕДЕНИЕ

В статье предлагается модификация метода случайного поиска с последовательной редукцией области исследования [1, 2], принадлежащего к классу метаэвристических методов поиска глобального экстремума [3], который ранее уже успешно применялся для решения задач глобальной оптимизации [4], а также задач нахождения оптимального управления [5]. Предлагается использовать различные процедуры случайного поиска, связанные между собой как параллельно, так и последовательно. Поэтому разработанный метод относится к классу гибридных методов глобальной оптимизации.

Рассматриваемый алгоритм поиска условного глобального экстремума применен к задачам оптимизации параметров различных технических систем. В работе рассматриваются прикладные задачи, связанные с инженерной деятельностью: определение параметров сосуда высокого давления [6, 7] и определение параметров натяжной/компрессионной пружины [6, 8].

Задача определения параметров сосуда высокого давления сводится к определению минимальной по стоимости конструкции сосуда, т. е. к поиску параметров системы: толщины, толщины головки, внутреннего радиуса и длины цилиндрической части сосуда. В задаче определения параметров натяжной/компрессионной пружины необходимо найти диаметр

проволоки, средний диаметр витка и число активных витков, соответствующих минимальной по весу конструкции пружины. Конструкция пружины должна удовлетворять ограничениям по минимальному отклонению, напряжению сдвига, частоте колебаний и ограничениям на внешний диаметр.

Для решения данных задач использовался метод внешних штрафов. Прикладные задачи, включающие в себя критерий оптимизации и ограничения на физические свойства системы, сводятся к задаче оптимизации вспомогательной функции с одновременным подбором параметров штрафа.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Дана целевая функция  $f(x) = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , определенная на множестве допустимых решений  $D \subseteq R^n$ . Требуется найти условный глобальный минимум функции  $f(x)$  на множестве  $D$ , т. е. такую точку  $x^* \in D$ , что  $f(x^*) = \min_{x \in D} f(x)$ , где  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ ,  $D = \{x \mid x_i \in [a_i, b_i], i = 1, 2, \dots, n\}$ .

## СТРАТЕГИЯ ПОИСКА РЕШЕНИЯ

Гибридный метод случайного поиска содержит два этапа, реализующих последовательное улучшение приближенного решения задачи условной глобальной оптимизации.

На первом этапе метода применяется процедура адаптивного случайного поиска. Основная идея заключается в существенном увеличении величины шага в случае удачной попытки в случайном направлении из текущей точки. Если число неудачных попыток из точки достигает максимальной величины, то величина шага значительно уменьшается. Целью является интенсивное предварительное исследование множества допустимых решений и нахождение хорошего начального приближения для реализации дальнейших процедур поиска глобального минимума.

На втором этапе применяется процедура поиска наилучшей пробы. Из текущей точки генерируются  $R$  пробных точек, из которых выбирается наилучшая. Текущая точка при этом не учитывается. Из найденной наилучшей точки реализуется дальнейший поиск. Поскольку текущая точка исключена из рассмотрения, в этом случае становятся возможными шаги в направлении возрастания функции. Они могут позволить преодолевать локальные минимумы при поиске глобального экстремума. Если из текущей точки поиск в случайных направлениях не удачен, то по полученным пробным точкам находится статистический антиградиент и делается пробный шаг в этом направлении. Если и он оказывается неудачным, величина шага уменьшается до тех пор, пока не станет меньше заданной величины.

На третьем этапе применяется метод случайного поиска с редукцией области исследования (метод Luus – Jaakola) [1, 2], который использует идею переменной области поиска новых решений, в процессе работы метода она подвергается редукции (сокращению) и восстановлению (расширению).

Работа метода начинается с выбора начальной точки на множестве допустимых решений и задания размеров начальной области исследования. При отсутствии какой-либо информации о решаемой задаче начальная точка задается в центре области допустимых решений или в точке, получаемой в результате предыдущих этапов поиска.

На каждой итерации из начальной точки генерируется определенное число дочерних точек в случайных направлениях с учетом характерных размеров множества исследования. При этом если какая-либо координата новой точки не принадлежит множеству допустимых реше-

ний, то в качестве значения этой координаты принимается соответствующая граница области допустимых решений. Среди дочерних точек и начальной точки выбирается наилучшая, которой соответствует минимальное значение целевой функции. Выбранная точка является начальной точкой для следующей итерации.

В конце каждой итерации сокращается размер области исследования. После завершения заданного числа итераций завершается «проход» метода и проверяются условия неэффективности поиска. В начале каждого последующего «прохода» размер области исследования восстанавливается. Параметры редукции и восстановления подбираются таким образом, что в начале каждого следующего «прохода» размер области исследования меньше, чем в начале предыдущего. Восстановление размера области исследования позволяет улучшить эффективность метода, уменьшая вероятность сходимости к точке локального экстремума. Процесс завершается после реализации заданного числа «проходов» или при выполнении условий неэффективности поиска.

В задачах оптимизации технических систем рассматривается некоторая техническая система, характеризующаяся вектором  $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ , где  $x_i$  – параметры системы. В рассматриваемых в данной статье задачах параметрами являются размеры составных частей конструкций. Каждая система должна удовлетворять ограничениям  $g^j(x) \leq 0, j = 1, \dots, m$ , характеризующим физические свойства конструкции (например, ограничения по напряжению на отдельные детали). Требуется минимизировать стоимость или вес конструкции.

Стратегия решения таких задач заключается в переходе от исходной задачи к задаче поиска глобального экстремума вспомогательной функции  $F(x_1, \dots, x_n)$ , полученной с помощью

применения метода внешних штрафов, которая имеет вид 
$$F(x) = f(x) + \sum_{j=1}^m c_j \cdot [\max\{0, g^j(x)\}]^2,$$

где  $c_j$  – параметры штрафа.

## АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

### Шаг 1. Формирование начальной точки.

Шаг 1.1. Задать параметры метода:

- число генерируемых точек  $R$ ;
- коэффициент редукции множества поиска  $\gamma$ ;
- коэффициент восстановления множества поиска  $\eta$ ;
- максимальное число проходов  $P$ ;
- число итераций, выполняемых за один проход  $ITER$ ;
- коэффициент расширения  $\alpha \geq 1$ ;
- коэффициент сжатия  $0 < \beta < 1$ ;
- $M$  – максимальное число неудачно выполненных испытаний на текущей итерации;
- $t_0 = 1$  – начальную величину шага;
- $t_{\min}$  – минимальную величину шага;
- $N1$  – максимальное число итераций адаптивного поиска;
- минимальное приращение по величине целевой функции  $\varepsilon_1$ ;
- минимальное изменение координат вектора решения  $\varepsilon_2$ .

Положить  $j = 0$  (счетчик числа итераций).

Шаг 1.2. Задать начальную точку поиска  $x^{(0)}$  в центре множества допустимых решений  $D$ . Для этого каждую координату вычислить по формуле  $x_i^{(0)} = \frac{a_i + b_i}{2}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ . Положить  $x_{best}^j = x^{(0)}$ .

**Шаг 2.** Реализовать процедуру адаптивного поиска.

Шаг 2.1. Положить  $k = 0$  (счетчик числа неудачных шагов адаптивного поиска).

Шаг 2.2. Получить случайный вектор  $\xi^j = (\xi_1^j, \dots, \xi_n^j)^T$ , где  $\xi_i^j$  – случайная величина, равномерно распределенная на интервале  $[-1, 1]$ . Вырабатывается случайная величина  $\eta^j$ , равномерно распределенная на  $[0, 1]$ , а затем используется линейное преобразование:  $\xi_i^j = 2\eta_i^j - 1$ .

Шаг 2.3. Вычислить  $x^{j+1} = x_{best}^j + t_j \frac{\xi^j}{\|\xi^j\|}$ .

Проверить принадлежность сгенерированных точек множеству допустимых решений:

- если  $x_i^{j+1} < a_i$ , то положить  $x_i^{j+1} = a_i$ ;
- если  $x_i^{j+1} > b_i$ , то положить  $x_i^{j+1} = b_i$ .

Иначе продолжать генерировать точки до тех пор, пока ограничения не будут выполнены.

Шаг 2.4. Проверить выполнение условий:

а) если  $f(x^{j+1}) < f(x_{best}^j)$ , шаг удачный. Положить  $z^{j+1} = x_{best}^j + \alpha(x^{j+1} - x_{best}^j)$  и определить, является ли текущее направление  $(x^{j+1} - x_{best}^j)$  удачным:

- если  $f(z^{j+1}) < f(x_{best}^j)$ , то направление поиска удачное. Положить  $x_{best}^{j+1} = z^{j+1}$ ,  $t_{j+1} = \alpha t_j$ ,  $j = j + 1$  и проверить условие окончания. Если  $j < N1$ , перейти к шагу 2.2. Если  $j = N1$ , адаптивный поиск завершить:  $x^* \cong x_{best}^j$ ; перейти к шагу 3;

- если  $f(z^{j+1}) \geq f(x_{best}^j)$ , направление поиска неудачное, перейти к шагу 2.5;

б) если  $f(x^{j+1}) \geq f(x_{best}^j)$ , шаг неудачный и перейти к шагу 2.5.

Шаг 2.5. Оценить число неудачных шагов из текущей точки:

а) если  $k < M$ , следует положить  $k = k + 1$  и перейти к шагу 2.2;

б) если  $k = M$ , проверить условие окончания:

- если  $t_j \leq t_{\min}$ , процесс закончить:  $x^* \cong x_{best}^j$ ,  $f(x^*) \cong f(x_{best}^j)$ ; перейти к шагу 3.
- если  $t_j > t_{\min}$ , положить  $t_j = \beta t_j$  и перейти к шагу 2.2.

**Шаг 3.** Реализовать процедуру поиска наилучшей пробной точки с поиском вдоль статистического антиградиента при неудаче.

Шаг 3.1. Задать начальную точку  $x^0 = x^*$ ,  $t_0 = 1$  – начальную величину шага,  $N2$  – максимальное число итераций поиска наилучшей пробы. Положить  $k = 0$ .

Шаг 3.2. Получить  $R$  реализаций случайного вектора  $\xi^j = (\xi_1^j, \dots, \xi_n^j)^T$ , где  $j = 1, \dots, R$ ;  $\xi_i^j$  – случайная величина, равномерно распределенная на интервале  $[-1, 1]$ .

Шаг 3.3. Вычислить

$$y^j = x^k + t_k \frac{\xi^j}{\|\xi^j\|}, \quad j = 1, \dots, R.$$

Проверить принадлежность сгенерированных точек множеству допустимых решений:

- если  $y_i^j < a_i$ , то положить  $y_i^j = a_i$ ;
- если  $y_i^j > b_i$ , то положить  $y_i^j = b_i$ .

Иначе продолжать генерировать точки до тех пор, пока ограничения не будут выполнены.

Шаг 3.4. Найти  $y^m$  из условия  $f(y^m) = \min_{1 \leq j \leq M} f(y^j)$ .

Проверить выполнение условий:

а) если  $f(y^m) < f(x^k)$ , шаг удачный. Положить  $x^{k+1} = y^m$ ,  $t_{k+1} = t_k$ ,  $k = k + 1$  и проверить условие окончания. Если  $k < N2$ , положить  $j = 1$  и перейти к шагу 3.2. Если  $k = N$ , поиск завершить:  $x^* \cong x^k$ ; перейти к шагу 4;

б) если  $f(y^m) \geq f(x^k)$ , шаг неудачный; положить  $y^{m+1} = x^k + t_k \frac{\xi^{m+1}}{\|\xi^{m+1}\|}$ , где

$$\xi^{m+1} = -\frac{1}{t_k} \sum_{j=1}^R \xi^j [f(x^k + t_k \frac{\xi^j}{\|\xi^j\|}) - f(x^k)] - \text{вектор статистического антиградиента. Проверить}$$

выполнение условий:

– если  $f(y^{m+1}) < f(x^k)$ , шаг удачный. Положить  $x^{k+1} = y^{m+1}$ ,  $t_{k+1} = t_k$ ,  $k = k + 1$  и проверить условие окончания. Если  $k < N2$ , положить  $j = 1$  и перейти к шагу 3.2. Если  $k = N2$ , поиск завершить:  $x^* \cong x^k$ ; перейти к шагу 4;

– если  $f(y^{m+1}) \geq f(x^k)$ , перейти к шагу 3.5.

Шаг 3.5. Проверить условие окончания:

а) если  $t_k \leq t_{\min}$ , процесс закончить:  $x^* \cong x^k$ ,  $f(x^*) \cong f(x^k)$ ; перейти к шагу 4;

б) если  $t_k > t_{\min}$ , положить  $t_k = bt_k$ ,  $j = 1$  и перейти к шагу 3.2.

**Шаг 4. Реализовать процедуру поиска с редукцией и восстановлением области поиска.**

Шаг 4.1. Положить  $x_{best}^j = x^*$ ,  $j = 0$  (счетчик числа итераций),  $q = 0$  (счетчик числа проходов).

Шаг 4.2. Восстановление области поиска. Задать вектор, характеризующий размеры текущего множества поиска:  $r^j = \eta^q \cdot r_{in}^j$ .

Шаг 4.3. Генерация дочерних точек.

Шаг 4.3.1. Используя наилучшее решение на текущей итерации  $x_{best}^j$ , генерировать  $R$  дочерних точек:  $x^{j+1,k} = x_{best}^j + D^k \cdot r^j$ ,  $k = 1, \dots, R$ , где  $D^k$  – диагональная матрица со случайными взаимно независимыми элементами, равномерно распределенными на отрезке  $[-1, 1]$ .

Шаг 4.3.2. Проверить принадлежность сгенерированных точек области допустимых решений:

- если  $x_i^{j+1,k} < a_i$ , то положить  $x_i^{j+1,k} = a_i$ ;
- если  $x_i^{j+1,k} > b_i$ , то положить  $x_i^{j+1,k} = b_i$ .

Шаг 4.3.3. Вычислить значения целевой функции в дочерних точках и сравнить их с наилучшим достигнутым значением  $f(x_{best}^j)$ . Если  $f(x^{j+1,k}) < f(x_{best}^j)$ , то положить  $x_{best}^j = x^{j+1,k}$ .

Иначе положить  $x_{best}^{j+1} = x_{best}^j$ .

Шаг 4.4. Редукция области поиска. Задать вектор, характеризующий размеры редуцированного множества поиска:  $r^{j+1} = \gamma r^j$ .

Шаг 4.5. Проверка условия завершения прохода:

- если  $j < ITER$ , то положить  $j = j + 1$  и перейти к шагу 4.3;
- если  $j = ITER$ , то запомнить наилучшее решение в конце прохода  $x_{best\ p}^q = x_{best}^j$ , положить  $q = q + 1$  и перейти к шагу 4.6.

Шаг 4.6. Проверка условий завершения поиска:

- если  $q < P$ , перейти к шагу 4.7;
- если  $q = P$ , процесс поиска завершить, перейти к шагу 4.8.

Шаг 4.7. Проверка условий неэффективности поиска:

- если  $q = 1$ , положить  $j = 1$  и перейти к шагу 4.2.
- если  $q > 1$ , то проверить условия неэффективности поиска:

а)  $|f(x_{best\ p}^q) - f(x_{best\ p}^{q-1})| < \varepsilon_1$ ,

б)  $\max_i \left| \frac{x_{best\ p\ i}^q - x_{best\ p\ i}^{q-1}}{x_{best\ p\ i}^q} \right| < \varepsilon_2$  (при  $x_{best\ p\ i}^q \neq 0, i = 1, \dots, n$ ).

Если хотя бы одно из условий «а» или «б» не выполнено, процесс продолжить, положить  $j = 1$  и перейти к шагу 4.2.

Если оба условия выполняются, процесс поиска завершить, перейти к шагу 4.8.

Шаг 4.8. Выбор решения.

Шаг 4.8.1. Закончить работу алгоритма. В качестве решения (приближенного) задачи  $f(x^*) = \min_{x \in D} f(x)$  выбрать наилучшее решение в конце прохода  $x_{best\ p}^q$ , которому соответствует наименьшее значение целевой функции.

Шаг 4.8.2. Определить общее число выполненных итераций  $ITER^*$ , учитывая число выполненных проходов и число итераций на каждом из проходов:  $ITER^* = q \cdot ITER$ .

## РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Задача определения параметров сосуда высокого давления.* В рассматриваемой задаче требуется определить параметры баллона для хранения сжатого газа [6, 7]. Целью является определение минимальной по стоимости конструкции сосуда, заключающейся в определении вектора параметров  $x = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T$ , соответствующих толщине, толщине головки, внутреннему радиусу и длине цилиндрической части. Кроме того, величины  $x_1$  и  $x_2$  являются дискретными величинами (описывающими кратность параметра величине 0,0625). Задача может быть формализована следующим образом:

$$f(x) = 0,6224 \cdot \tilde{x}_1 \cdot x_3 \cdot x_4 + 1,7781 \cdot \tilde{x}_2 \cdot x_3^2 + 3,1661 \cdot \tilde{x}_1^2 \cdot x_4 + 19,84 \cdot \tilde{x}_1^2 \cdot x_3,$$

$$g^1(x) = -\tilde{x}_1 + 0,0193 \cdot x_3 \leq 0, \quad g^2(x) = -\tilde{x}_2 + 0,00954 \cdot x_3 \leq 0,$$

$$g^3(x) = -\pi \cdot x_3^2 \cdot x_4 - \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot x_3^3 + 1296000 \leq 0, \quad g^4(x) = x_4 - 240 \leq 0,$$

где  $\tilde{x}_1 = 0,0625 \cdot \langle x_1 \rangle$ ,  $\tilde{x}_2 = 0,0625 \cdot \langle x_2 \rangle$ ,  $\langle \cdot \rangle$  – целая часть числа.

Множество допустимых решений  $D = [1; 99,99] \cdot [1; 99,99] \cdot [10; 200] \cdot [10; 200]$ .

Зададим следующие параметры алгоритма: количество генерируемых точек  $R = 100$ ; число проходов  $P = 10$ ; число итераций за один проход  $ITER = 40$ ; коэффициент уменьшения размера множества поиска  $\gamma = 0,8$ ; коэффициент восстановления начального множества поиска  $\eta = 0,89$ ; максимальное число неудачно выполненных испытаний на текущей итерации  $M = 20$ ,  $t_0 = 1$  – начальная величина шага,  $t_{\min} = 0,005$  – минимальная величина шага, максимальное число итераций адаптивного поиска  $N1 = 100$ , число  $\varepsilon_1 = 0,0001$  для контроля приращения по величине целевой функции; число  $\varepsilon_2 = 0,001$  для контроля эффективности изменения вектора  $x$ . Коэффициенты штрафной функции:  $c_1 = 28000$ ,  $c_2 = 26500$ ,  $c_3 = 14000$ ,  $c_4 = 14000$ . Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Решение, найденное в [6], и соответствующие ему значения целевой функции и ограничений:  $x^* = (13; 7; 42,098446; 176,636596)^T$ ,  $f(x^*) = 6059,714335$ ,  $g^1(x^*) = 0,000000$ ,  $g^2(x^*) = -0,035881$ ,  $g^3(x^*) = -0,028761$ ,  $g^4(x^*) = -63,363404$ .

Результаты работы гибридного метода сравнивались с результатами работы метода случайного поиска с последовательной редукцией области исследования (метода Luus – Jaakola), а также с решением, полученным в [9] при использовании методов «роевого» интеллекта.

Таблица 1  
Table 1

	Гибридный метод	Метод случайного поиска с последовательной редукцией области исследования
$x_1^*$	12,9725	12,9638
$x_2^*$	6,8903	6,8864
$x_3^*$	42,0392	42,1273
$x_4^*$	174,1935	176,8458
$f(x^*)$	5901,752	5848,9138

Полученный результат близок к решению, найденному в [6]. Решения, полученные при использовании гибридного метода, оказались ближе к точному решению задачи, чем при применении обычного метода случайного поиска с последовательной редукцией области исследования. В [9] были получены следующие результаты: при применении метода, имитирующего спиральную динамику  $x^* = (12,9597; 6,7304; 42,9877; 165,9206)^T$ ,  $f(x^*) = 5608,2889$ ; при применении метода, имитирующего поиск группой людей  $x^* = (12,0035; 7,4174; 41,6576; 186,2211)^T$ ,  $f(x^*) = 5849,349$ ; при применении метода стохастической диффузии  $x^* = (12,9579; 6,675; 42,0438; 178,667)^T$ ,  $f(x^*) = 5717,7236$ . При сравнении полученных значений целевой функции с точным решением видно, что гибридный метод по точности примерно соответствует методу, имитирующему поиск группой людей.

Задача определения параметров натяжной/компрессионной пружины. В рассматриваемой задаче требуется определить параметры натяжной/компрессионной пружины, учитывая физические ограничения [6]. Целью является определение минимальной по весу конструкции пружины, заключающееся в нахождении вектора параметров  $x = (x_1, x_2, x_3)^T$ , соответствующих диаметру проволоки, среднему диаметру витка и числу активных витков. Конструкция пружины должна удовлетворять ограничениям по минимальному отклонению, напряжению сдвига, частоте колебаний и ограничениям на внешний диаметр. Задача может быть формализована следующим образом:

$$f(x) = (x_3 + 2) \cdot x_1^2 \cdot x_2,$$

$$g^1(x) = 1 - \frac{x_2^3 \cdot x_3}{71875 \cdot x_1^4} \leq 0, \quad g^2(x) = \frac{4 \cdot x_2^2 - x_1 \cdot x_2}{12566 \cdot (x_1^3 \cdot x_2 - x_1^4)} + \frac{2,46}{12566 \cdot x_1^2} - 1 \leq 0,$$

$$g^3(x) = 1 - \frac{140,54 \cdot x_1}{x_2^2 \cdot x_3} \leq 0, \quad g^4(x) = \frac{x_1 + x_2}{1,5} - 1 \leq 0.$$

Множество допустимых решений  $D = [0,05; 2,0] \cdot [0,25; 1,3] \cdot [2,0; 15,0]$ .

Зададим следующие параметры алгоритма: количество генерируемых точек  $R = 100$ ; число проходов  $P = 10$ ; число итераций за один проход  $ITER = 40$ ; коэффициент уменьшения размера множества поиска  $\gamma = 0,8$ ; коэффициент восстановления начального множества поиска  $\eta = 0,89$ ; максимальное число неудачно выполненных испытаний на текущей итерации  $M = 20$ ,  $t_0 = 1$  – начальная величина шага,  $t_{\min} = 0,005$  – минимальная величина шага, максимальное число итераций адаптивного поиска  $N1 = 100$ , число  $\varepsilon_1 = 0,0001$  для контроля приращения по величине целевой функции; число  $\varepsilon_2 = 0,001$  для контроля эффективности изменения вектора  $x$ . Коэффициенты штрафной функции:  $c_1 = 6$ ,  $c_2 = 2$ ,  $c_3 = 1$ ,  $c_4 = 1$ . Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Решение, найденное в [6], и соответствующие ему значения целевой функции и ограничений:  $x^* = (0,05169; 0,35675; 11,287126)^T$ ,  $f(x^*) = 0,012665$ ,  $g^1(x^*) = -9,001053$ ,  $g^2(x^*) = 0,000020$ ,  $g^3(x^*) = -4,057026$ ,  $g^4(x^*) = -0,727707$ .

Результаты работы гибридного метода сравнивались с результатами работы метода случайного поиска с последовательной редукцией области исследования (метода Luus – Jaakola), а также с решением, полученным в [9] с применением методов «роевого» интеллекта.

Таблица 2  
Table 2

	Гибридный метод	Метод случайного поиска с последовательной редукцией области исследования
$x_1^*$	0,0527	0,05271
$x_2^*$	0,3496	0,3312
$x_3^*$	11,0628	11,007
$f(x^*)$	0,0113	0,0108

В [9] были получены следующие результаты: при применении метода, имитирующего спиральную динамику  $x^* = (0,0583; 0,334; 7,1934)^T$ ,  $f(x^*) = 0,0104$ ; при применении метода, имитирующего поиск группой людей  $x^* = (0,0534; 0,3913; 11,1691)^T$ ,  $f(x^*) = 0,0147$ ; при применении метода стохастической диффузии  $x^* = (0,0517; 0,3593; 11,3058)^T$ ,  $f(x^*) = 0,0128$ . Решение, полученное гибридным методом, уступает по точности решению, полученному методом стохастической диффузии, но дает лучший результат, чем метод, имитирующий спиральную динамику и метод, имитирующий поиск группой людей.

## ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан гибридный метод глобальной условной оптимизации, основанный на совместном использовании метода случайного поиска с последовательной редукцией области исследования, метода адаптивного случайного поиска и метода поиска наилучшей пробы. Метод относится к группе метаэвристических, не гарантирующих получения точного решения, но позволяющих найти достаточно точный ответ за приемлемое время. В среде C# создан комплекс программ, позволяющий подбирать наилучшие параметры метода для решаемой задачи на общепринятых модельных примерах со сложной структурой поверхностей уровня, а также находить решение задач оптимизации элементов технических систем, например определения параметров сосуда высокого давления и параметров натяжной/компрессионной пружины. Этот класс задач возникает при проектировании ракетно-космических и авиационных систем с целью минимизации стоимости или веса рассматриваемой конструкции при одновременном выполнении ряда ограничений. При решении данных задач использовался метод внешних штрафов: прикладные задачи, включающие в себя критерий оптимизации и ограничения на физические свойства системы, сводятся к задаче оптимизации вспомогательной функции с одновременным подбором параметров штрафа. Результаты сравнения работы гибридного метода, немодифицированного метода и методов «роевого» интеллекта позволяют сделать вывод об эффективности предложенного гибридного метода и созданного программного обеспечения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Luus R., Jaakola T.H.I. Optimization by direct search and systematic reduction of the size of search region // American Institute of Chemical Engineers Journal (AIChE). 1973. Vol. 19(4). Pp. 760–766.
2. Luus R. Iterative Dynamic Programming. CRC Press, 2000. 344 p.
3. Пантелеев А.В., Метлицкая Д.В., Алешина Е.А. Методы глобальной оптимизации. Метаэвристические стратегии и алгоритмы. М.: Вузовская книга, 2013. 244 с.
4. Родионова Д.А. Комплекс программных средств «Метод случайного поиска с последовательной редукцией области исследования» // Материалы XVIII Межд. конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСПС'2013), 2013, Алушта. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2013. С. 779–781.
5. Пантелеев А.В., Родионова Д.А. Применение метода случайного поиска с последовательной редукцией области исследования в задачах оптимального управления детерминированными системами // Известия института инженерной физики. 2014. № 3(33). С. 17–22.
6. Cagnina L.C., Esquivel S.C. Solving Engineering Optimization Problems with the Simple Constrained Particle Swarm Optimizer // Informatica. 2008. No. 32. Pp. 319–326.
7. Ragsdell K., Phillips D. Optimal Design of a Class of Welded Structures Using Geometric Programming // J. Eng. Ind. 1976. No. 98(3). Pp. 1021–1025.

8. **Golinski J.** An Adaptive Optimization System Applied to Machine Synthesis // Mech. Mash. Theory. 1973. No. 8(3). Pp. 419–436.

9. **Пантелеев А.В., Евдокимова М.Д.** Методы «роевого» интеллекта в задачах оптимизации параметров технических систем // Научный Вестник МГТУ ГА. 2017. Т. 20, № 2. С. 6–15.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Пантелеев Андрей Владимирович**, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий кафедрой математической кибернетики факультета «Прикладная математика и физика» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), avpanteleev@inbox.ru.

**Родионова Дарья Андреевна**, аспирант факультета «Прикладная математика и физика» Московского авиационного института (национального исследовательского университета), d.arya.rodionova@yandex.ru.

## APPLICATION OF HYBRID RANDOM SEARCH METHOD TO OPTIMISATION OF ENGINEERING SYSTEMS' PARAMETERS

**Andrei V. Panteleev<sup>1</sup>, Daria A. Rodionova<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

The study was conducted with support of the Russian Foundation for Basic Research grant №16-07-00419 A

### ABSTRACT

This paper presents a modification of the Luus-Jaakola global optimization method, which belongs to the class of metaheuristic algorithms. A hybrid method is suggested, using a combination of random search methods: Luus-Jaakola method, adaptive random search method and best trial method. The obtained method is applied to the optimization of parameters of different engineering systems. This class of problems appears during the design of aerospace and aeronautical structures; its goal is the cost or weight minimization of the construction. These problems belong to the class of constrained global optimization problems, where the level surface of the objective function has uneven relief and there is a large number of variables. This means that the classical optimization methods prove to be inefficient and these problems should be solved using metaheuristic optimization methods, which provide sufficient accuracy at reasonable operating time. In this paper, the constrained global optimization problem is solved using the penalty method. Thus, the problem of exterior penalty function optimization is considered, where the penalty coefficients are chosen in such a way as to avoid the violation of the constraints. Two applied problems are considered in the paper: the determination of the high-pressure vessel parameters and the anti rattle spring parameters determination. Using the suggested algorithm, a software complex was developed, which allows us to solve engineering optimization problems. The results obtained using the suggested methods were compared with the results obtained using the non-modified Luus-Jaakola method in order to demonstrate the efficiency of the suggested hybrid random search method.

**Key words:** metaheuristic methods, hybrid methods, global extremum, random search.

### REFERENCES

1. **Luus, R. and Jaakola, T.H.I.** (1973). *Optimization by direct search and systematic reduction of the size of search region*. American Institute of Chemical Engineers Journal (AIChE), vol. 4(19), pp. 760–766.
2. **Luus, R.** (2000). *Iterative Dynamic Programming*. CRC Press, 344 p.

3. **Panteleev A.V., Metlitskaya, D.V. and Aleshina, E.A.** (2013). *Metody global'noi optimizatsii. Metaevristicheskie strategii i algoritm* [Metaheuristic strategies and algorithms]. M.: Vuzovskaya kniga, 244 p. (in Russian)
4. **Rodionova, D.A.** (2013). *Kompleks programmnykh sredstv "Metod sluchainogo poiska s posledovatel'noi reduktsiei oblasti issledovaniya* [Complex of programming software "Method of random search with the successive reduction of the research sphere]. *Materialy XVIII Mezhd. konf. po vychislitel'noi mekhanike i sovremennym prikladnym programmnyim sistemam (VMSPPS'2013), 2013, Alushta* [Proceedings of the XVIII International Conference on computing mechanics and modern applied programming systems (VMSPPS 2013), Alushta 2013]. Moscow: Publ. house MAI-PRINT, pp. 779–781. (in Russian)
5. **Panteleev, A.V. and Rodionova, D.A.** (2014). *Primenenie metoda sluchainogo poiska s posledovatel'noi reduktsiei oblasti issledovaniya v zadachakh optimal'nogo upravleniya determinirovannymi sistemami* [Application of the method of random search with successive reduction of research sphere in problems of optimal management with determined systems]. *Izvestiya instituta inzhenernoi fiziki* [Herald of Institute of Engineering Physics], no. 33(3), pp. 17–22. (in Russian)
6. **Cagnina, L.C. and Esquivel, S.C.** (2008). *Solving Engineering Optimization Problems with the Simple Constrained Particle Swarm Optimizer*. *Informatica*, no. 32, pp. 319–326.
7. **Ragsdell, K. and Phillips, D.** (1976). *Optimal Design of a Class of Welded Structures Using Geometric Programming*. *J. Eng. Ind.*, no. 3(98), pp. 1021–1025.
8. **Golinski, J.** (1973). *An Adaptive Optimization System Applied to Machine Synthesis*. *Mech. Mash. Theory*, no. 3(8), pp. 419–436.
9. **Panteleev, A.V. and Evdokimova, M.D.** (2017). *Solving Engineering Optimization Problems With The Swarm Intelligence Methods* [Solving Engineering Optimization Problems With The Swarm Intelligence Methods]. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 20, no. 2, pp. 6–15. (in Russian)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Andrei V. Panteleev**, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Mathematics and Cybernetics Department, Moscow Aviation Institute (National Research University), [avpanteleev@inbox.ru](mailto:avpanteleev@inbox.ru).

**Daria A. Rodionova**, Postgraduate Student, Moscow Aviation Institute (National Research University), [d.arya.rodionova@yandex.ru](mailto:d.arya.rodionova@yandex.ru).

Поступила в редакцию 07.10.2017  
Принята в печать 15.05.2018

Received 07.10.2017  
Accepted for publication 15.05.2018

УДК 514.7

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-150-159

## О БЕСКОНЕЧНЫХ СЕРИЯХ НЕЛОКАЛЬНЫХ ЗАКОНОВ СОХРАНЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ

Н.Г. ХОРЬКОВА<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет им. Баумана, г. Москва, Россия

Популярное в математике понятие интегрируемости дифференциальных уравнений (и столь же разнообразно трактуемое) тесно связано с существованием симметрий и законов сохранения. Все известные интегрируемые дифференциальные уравнения обладают бесконечными сериями симметрий и (или) законов сохранения. Однако также имеется целый ряд уравнений, важных для приложений, но имеющих крайне скудный запас симметрий или законов сохранения. Попытки расширить понятия симметрии и закона сохранения предпринимались разными авторами, и на эту тему имеется обширная литература. В данной статье представлен следующий результат. Если  $\ell$ -нормальная система дифференциальных уравнений в частных производных имеет кохомологически нетривиальный закон сохранения, то этот закон сохранения порождает бесконечную серию нелокальных законов сохранения. Этот факт обобщает аналогичный результат статьи автора для дифференциальных уравнений (не систем). Результат получен в рамках геометрической теории дифференциальных уравнений в частных производных. Согласно геометрическому подходу, многообразие, снабженное конечномерным распределением, удовлетворяющим условиям интегрируемости Фробениуса, называется диффеотопом (diffiety), если локально оно имеет вид бесконечно продолженного уравнения  $\mathcal{E}^\infty$ . Диффеотопы являются объектами категории дифференциальных уравнений, введенной А.М. Виноградовым. Под симметриями уравнения понимают преобразования (конечные или инфинитизимальные) бесконечно продолжения уравнения, которые сохраняют распределение Картана, а под законами сохранения –  $(n-1)$ -е классы кохомологий горизонтального комплекса де Рама уравнения, где  $n$  – число независимых переменных уравнения. Накрытием называется эпиморфизм  $\tau: \tilde{\mathcal{E}} \rightarrow \mathcal{E}^\infty$  в категории дифференциальных уравнений, порождающий изоморфизм распределений. Симметрии и законы сохранения диффеотопа  $\tilde{\mathcal{E}}$  называются нелокальными симметриями и законами сохранения уравнения  $\mathcal{E}$ . Выбор подходящего накрытия позволяет получать новые (нелокальные) симметрии и законы сохранения исследуемого уравнения. В работе приведена конструкция одного накрытия и доказано существование бесконечных серий нелокальных законов сохранения у широкого класса систем дифференциальных уравнений в частных производных.

**Ключевые слова:** системы дифференциальных уравнений в частных производных, накрытия дифференциальных уравнений, нелокальные симметрии и законы сохранения.

### ВВЕДЕНИЕ

Популярное в математике понятие интегрируемости дифференциальных уравнений (и столь же разнообразно трактуемое) тесно связано с существованием симметрий и законов сохранения (см., например, [12, 13, 3, 6, 1]). Все «признанные» интегрируемые дифференциальные уравнения обладают бесконечными сериями симметрий и (или) законов сохранения. Однако также имеется целый ряд уравнений, важных для приложений, но имеющих крайне скудный запас симметрий или законов сохранения [14, 15]. Попытки расширить понятия симметрии и закона сохранения предпринимались разными авторами (см., например, [1, 6] и имеющиеся в этих работах списки литературы). В данной статье представлен следующий результат. Если  $\ell$ -нормальная система дифференциальных уравнений в частных производных имеет кохомологически нетривиальный закон сохранения, то этот закон сохранения порождает бесконечную серию нелокальных законов сохранения. Этот факт обобщает аналогичный результат статьи [11] для дифференциальных уравнений (не систем).

Статья организована следующим образом. В разделе 1 приводятся основные понятия и факты теории симметрий и законов сохранения дифференциальных уравнений [1, 2, 4–6]. В разделе 2 представлена конструкция одного специального накрытия [1, 8, 11]. Далее, в разделе 3 доказывается существование при определенных условиях бесконечных серий нелокальных законов сохранения.

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ

В этом разделе собраны необходимые для дальнейшего понятия и факты геометрической теории дифференциальных уравнений в частных производных. Подробное изложение теории может быть найдено в [1, 2, 4–6].

### ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Пусть дана система дифференциальных уравнений в частных производных

$$\mathcal{E}: F_i \left( x, u, \dots, \frac{\partial^{|\sigma|} u^j}{\partial x_\sigma}, \dots \right) = 0, \quad i = 1, \dots, r,$$

где  $u = (u^1, \dots, u^m)$  – неизвестная вектор-функция переменных  $x = (x_1, \dots, x_n)$ .

В рамках геометрической теории любая система дифференциальных уравнений рассматривается как подмногообразие пространства джетов  $k$ -го порядка  $J^k(\pi)$  расслоения  $\pi: E^{n+m} \rightarrow M^n$ , где  $k$  – максимальный порядок уравнений, входящих в систему,  $n$  – число независимых переменных, а  $m$  – неизвестных функций (зависимых переменных). Далее для краткости будем называть  $\mathcal{E}$  «дифференциальным уравнением» или просто «уравнением» и записывать в виде  $\mathcal{E} = \{F = 0\}$ ,  $F = (F_1, \dots, F_r)$ ,  $F_i \in C^\infty(J^k(\pi))$ .

На многообразии бесконечных джетов  $J^\infty(\pi)$  имеется  $n$ -мерное интегрируемое распределение  $\mathcal{C}$  (распределение Картана), задаваемое операторами полных производных  $D_1, \dots, D_n$ ,

$$D_i = \frac{\partial}{\partial x_i} + \sum_{j, \sigma} p_{\sigma+1i}^j \frac{\partial}{\partial p_\sigma^j}, \quad (1)$$

где  $(x_i, p_\sigma^j)$  – канонические координаты в пространстве бесконечных джетов  $J^\infty(\pi)$ .

Векторные поля (1) касаются бесконечного продолжения  $\mathcal{E}^\infty$  уравнения  $\mathcal{E}$ , которое является подмногообразием пространства бесконечных джетов  $J^\infty(\pi)$  и задается бесконечной системой  $D_\sigma(F_s) = 0$ , где  $D_\sigma = D_{i_1} \circ \dots \circ D_{i_r}$ ,  $\sigma = (i_1, \dots, i_r)$ . Поэтому распределение Картана на  $J^\infty(\pi)$  допускает ограничение  $\bar{\mathcal{C}} = \langle \bar{D}_1, \dots, \bar{D}_n \rangle$  на бесконечно продолженное уравнение  $\mathcal{E}^\infty \subset J^\infty(\pi)$  (здесь и далее черта обозначает ограничение на  $\mathcal{E}^\infty$ ). Распределения Картана на  $J^\infty(\pi)$  и  $\mathcal{E}^\infty$  вполне интегрируемы в смысле Фробениуса, т. е.  $[D_i, D_j] = [\bar{D}_i, \bar{D}_j] = 0$ . Многообразие, снабженное конечномерным распределением, удовлетворяющим условиям интегрируемости Фробениуса, называется диффеотопом (diffiety), если локально оно имеет вид  $\mathcal{E}^\infty$  (А.М. Виноградов, [4, 1]). Диффеотопы являются объектами категории дифференциальных уравнений. Примерами диффеотопов служат пространства бесконечных джетов  $J^\infty(\pi)$  и бесконечно продолженные уравнения  $\mathcal{E}^\infty$ .

### ЛОКАЛЬНЫЕ СИММЕТРИИ

Под симметриями уравнения  $\mathcal{E}$  понимают преобразования (конечные или инфинитизимальные) бесконечно продолженного уравнения  $\mathcal{E}^\infty$ , которые сохраняют распределение Картана на  $\mathcal{E}^\infty$ .

Алгебра инфинитизимальных симметрий уравнения  $\mathcal{E}$  (далее – локальных симметрий) изоморфна фактор-алгебре Ли

$$\text{Sym } \mathcal{E} = D_c(\mathcal{E}^\infty)/CD(\mathcal{E}^\infty),$$

где

$$CD(\mathcal{E}^\infty) = \left\{ \sum_{i=1}^n a_i \bar{D}_i \mid a_i \in C^\infty(\mathcal{E}^\infty) \right\},$$

а  $D_C(\mathcal{E}^\infty)$  состоит из таких векторных полей  $X$  на  $\mathcal{E}^\infty$ , что  $[X, CD(\mathcal{E}^\infty)] \subset CD(\mathcal{E}^\infty)$ . Можно показать, что любая локальная симметрия уравнения  $\mathcal{E}$  является ограничением на  $\mathcal{E}^\infty$  некоторого эволюционного дифференцирования  $\exists_\varphi = \sum_{\sigma,j} D_\sigma(\varphi^j) \frac{\partial}{\partial p_\sigma^j}$ ,  $\varphi = (\varphi^1, \dots, \varphi^m)$ ,  $\varphi^i \in C^\infty(J^\infty(\pi))$ . Эволюционное дифференцирование  $\exists_\varphi$  допускает ограничение на  $\mathcal{E}^\infty$ , если

$$\exists_\varphi(I(\mathcal{E}^\infty)) \subset I(\mathcal{E}^\infty), \quad (2)$$

где  $I(\mathcal{E}^\infty) \subset C^\infty(J^\infty(\pi))$  – идеал уравнения  $\mathcal{E}^\infty$ . Если  $\mathcal{E} = \{F = 0\}$ ,  $F = (F_1, \dots, F_r)$ ,  $F_i \in C^\infty(J^k(\pi))$ , то (2) равносильно системе уравнений  $\bar{\ell}_F(\bar{\varphi}) = 0$ ,  $\bar{\varphi} = \varphi|_{\mathcal{E}}$ , где  $\ell_F$  – оператор универсальной линейризации

$$\ell_F = \left\| \sum_{\sigma} \frac{\partial F_i}{\partial p_\sigma^j} D_\sigma \right\|, \quad \bar{\ell}_F = \ell_F|_{\mathcal{E}}.$$

Таким образом, любая локальная симметрия уравнения  $\mathcal{E}$  есть ограничение  $\bar{\exists}_\varphi$  на  $\mathcal{E}^\infty$  такого эволюционного дифференцирования  $\exists_\varphi$ , что

$$\bar{\ell}_F(\bar{\varphi}) = 0. \quad (3)$$

Векторное поле  $\bar{\exists}_\varphi$  однозначно определяется своей производящей функцией  $\bar{\varphi}$ .

### ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

Горизонтальным комплексом де Рама уравнения  $\mathcal{E}$  называется поднятие на  $\mathcal{E}^\infty$  комплекса де Рама многообразия  $M$ :

$$0 \rightarrow C^\infty(\mathcal{E}^\infty) \xrightarrow{\bar{d}} \bar{\Lambda}^1(\mathcal{E}^\infty) \xrightarrow{\bar{d}} \bar{\Lambda}^2(\mathcal{E}^\infty) \xrightarrow{\bar{d}} \dots \xrightarrow{\bar{d}} \bar{\Lambda}^n(\mathcal{E}^\infty) \rightarrow 0.$$

В локальных координатах любая горизонтальная форма  $\omega \in \bar{\Lambda}^p(\mathcal{E}^\infty)$  может быть представлена в виде

$$\omega = \sum a_{i_1 \dots i_p} dx_{i_1} \wedge \dots \wedge dx_{i_p}, \quad a_{i_1 \dots i_p} \in C^\infty(\mathcal{E}^\infty),$$

т. е. локально такая форма является линейной комбинацией форм на многообразии  $M$  с коэффициентами в  $C^\infty(\mathcal{E}^\infty)$ .

Действие дифференциала  $\bar{d}$  на горизонтальную форму  $\omega$  определяется формулой

$$\begin{aligned} \bar{d}\omega &= \sum \bar{d} a_{i_1 \dots i_p} \wedge dx_{i_1} \wedge \dots \wedge dx_{i_p} = \\ &= \sum_{i=1}^n \sum \bar{D}_i(a_{i_1 \dots i_p}) dx_i \wedge dx_{i_1} \wedge \dots \wedge dx_{i_p}. \end{aligned}$$

Когомологии горизонтального комплекса де Рама уравнения  $\mathcal{E}$  называются горизонтальными когомологиями и обозначаются  $\bar{H}^p(\mathcal{E}^\infty)$ .

Законом сохранения уравнения  $\mathcal{E}$  называется  $(n - 1)$ -й класс когомологий  $[\omega] \in \tilde{H}^{n-1}(\mathcal{E}^\infty)$  горизонтального комплекса де Рама уравнения  $\mathcal{E}$ , замкнутая горизонтальная форма  $\omega \in \tilde{\Lambda}^{n-1}(\mathcal{E}^\infty)$  называется сохраняющейся плотностью уравнения  $\mathcal{E}$ .

Если уравнение  $\mathcal{E}^\infty \ell$ -нормально, то закон сохранения  $[\omega] \in \tilde{H}^{n-1}(\mathcal{E}^\infty)$  определяется своей производящей функцией  $\psi$ , которая вычисляется по формуле  $\psi = \nabla^*(1)|_{\mathcal{E}}$ , где  $d\omega = \nabla(F)$  для некоторого  $\mathcal{C}$ -дифференциального оператора  $\nabla$ . Производящая функция  $\psi$  закона сохранения удовлетворяет уравнению

$$\tilde{\ell}_F^*(\psi) = 0. \quad (4)$$

Заметим, что не каждое решение уравнения (4) является производящей функцией некоторого закона сохранения [4, 5, 1].

Опишем действие локальных симметрий уравнения  $\mathcal{E} = \{F = 0\}$  на его законы сохранения. Пусть даны локальная симметрия  $\varphi$  и закон сохранения  $[\omega] \in \tilde{H}^{n-1}(\mathcal{E}^\infty)$  уравнения  $\mathcal{E}$  с производящей функцией  $\psi \in \ker \tilde{\ell}_F^*$ . Обозначим через  $\tilde{\exists}_\varphi(\omega)$  производную Ли  $L_{\tilde{\exists}_\varphi}(\omega)$  формы  $\omega$ . Тогда  $[\tilde{\exists}_\varphi(\omega)]$  снова закон сохранения уравнения  $\mathcal{E}$ , а его производящая функция имеет вид

$$\tilde{\exists}_\varphi(\psi) + \tilde{\Delta}^*(\psi), \quad (5)$$

где  $\mathcal{C}$ -дифференциальный оператор  $\Delta$  определяется условием  $\exists_\varphi(F) = \Delta(F)$ .

### НЕЛОКАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ: НАКРЫТИЯ, НЕЛОКАЛЬНЫЕ СИММЕТРИИ И ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

Будем говорить, что задано накрытие  $\tau: \tilde{\mathcal{E}} \rightarrow \mathcal{E}^\infty$  уравнения  $\mathcal{E}$ , если:

- имеется диффеотоп  $\tilde{\mathcal{E}}$  с  $n$ -мерным интегрируемым распределением  $\tilde{\mathcal{C}} = \{\tilde{\mathcal{C}}_\theta\}_{\theta \in \tilde{\mathcal{E}}}$ ,
- определено такое регулярное сюръективное отображение  $\tau: \tilde{\mathcal{E}} \rightarrow \mathcal{E}^\infty$ , что для любой точки  $\theta \in \tilde{\mathcal{E}}$  касательное отображение  $\tau_{*,\theta}$  является изоморфизмом  $\tilde{\mathcal{C}}_\theta$  на картановскую плоскость  $\mathcal{C}_{\tau(\theta)}$  уравнения  $\mathcal{E}$  в точке  $\tau(\theta)$ .

Многообразие  $\tilde{\mathcal{E}}$  локально является прямым произведением  $\tilde{\mathcal{E}} = \mathcal{E} \times \mathbb{R}^N$ , а отображение  $\tau$  – естественной проекцией  $\tau: \tilde{\mathcal{E}} = \mathcal{E} \times \mathbb{R}^N \rightarrow \mathcal{E}$ . Распределение  $\tilde{\mathcal{C}}$  порождается системой векторных полей

$$\tilde{D}_i = \bar{D}_i + \sum_{j=1}^N X_{ij} \frac{\partial}{\partial w_j}, \quad i = 1, \dots, n,$$

где  $X_i = \sum_{j=1}^N X_{ij} \frac{\partial}{\partial w_j}$ ,  $X_{ij} \in C^\infty(\tilde{\mathcal{E}})$ , –  $\tau$ -вертикальные поля на  $\tilde{\mathcal{E}}$ ,  $w_1, w_2, \dots, w_N$  – координаты в слое проекции  $\mathbb{R}^N$ , которые называются нелокальными переменными. Число  $N$  называется размерностью накрытия, возможен случай  $N = \infty$ . Условие интегрируемости Фробениуса  $[\tilde{D}_i, \tilde{D}_j] = 0, i, j = 1, \dots, n$ , эквивалентно системе уравнений

$$\tilde{D}_i(X_{jk}) = \tilde{D}_j(X_{ik}).$$

Нелокальными симметриями уравнения  $\mathcal{E}$  называются инфинитезимальные симметрии диффеотопа  $\tilde{\mathcal{E}}$ , более точно алгебра нелокальных симметрий типа  $\tau$  (или нелокальных  $\tau$ -симметрий) уравнения  $\mathcal{E}$  есть фактор-алгебра Ли

$$\text{Sym}_\tau \mathcal{E} = D_c(\tilde{\mathcal{E}})/CD(\tilde{\mathcal{E}}),$$

где

$$CD(\tilde{\mathcal{E}}) = \left\{ \sum_{i=1}^n a_i \tilde{D}_i \mid a_i \in C^\infty(\tilde{\mathcal{E}}) \right\},$$

а  $D_c(\tilde{\mathcal{E}})$  состоит из таких векторных полей  $X$  на  $\tilde{\mathcal{E}}$ , что  $[X, CD(\tilde{\mathcal{E}})] \subset CD(\tilde{\mathcal{E}})$ .

Легко видеть [7, 1], что если накрытие  $\tau: \tilde{\mathcal{E}} \rightarrow \mathcal{E}^\infty$  уравнения  $\mathcal{E} = \{F = 0\}$  задано, то любая нелокальная симметрия типа  $\tau$  имеет вид эволюционного дифференцирования

$$\tilde{\mathfrak{X}}_{\varphi, A} = \tilde{\mathfrak{X}}_\varphi + \sum_{j=1}^N a_j \frac{\partial}{\partial w_j},$$

где  $\varphi = (\varphi^1, \dots, \varphi^m)$ ,  $A = (a_1, \dots, a_N)$ ,  $\varphi^i, a_j \in C^\infty(\tilde{\mathcal{E}})$ , причем функции  $\varphi^i, a_j$  удовлетворяют следующей системе уравнений:

$$\tilde{\ell}_F(\varphi) = 0, \tag{6}$$

$$\tilde{D}_i(a_j) = \tilde{\mathfrak{X}}_{\varphi, A}(X_{ij}). \tag{7}$$

Если задано накрытие  $\tau: \tilde{\mathcal{E}} \rightarrow \mathcal{E}^\infty$  уравнения  $\mathcal{E}$ , то горизонтальный комплекс де Рама уравнения  $\mathcal{E}$  поднимается на диффеотоп  $\tilde{\mathcal{E}}$ . В локальных координатах любая горизонтальная форма  $\omega \in \tilde{\Lambda}^p(\tilde{\mathcal{E}})$  может быть представлена в виде

$$\omega = \sum a_{i_1 \dots i_p} dx_{i_1} \wedge \dots \wedge dx_{i_p}, \quad a_{i_1 \dots i_p} \in C^\infty(\tilde{\mathcal{E}}),$$

а дифференциал  $\tilde{d}$  на горизонтальную форму  $\omega$  действует следующим образом:

$$\begin{aligned} \tilde{d}\omega &= \sum \tilde{d} a_{i_1 \dots i_p} \wedge dx_{i_1} \wedge \dots \wedge dx_{i_p} = \\ &= \sum_{i=1}^n \sum \tilde{D}_i(a_{i_1 \dots i_p}) dx_i \wedge dx_{i_1} \wedge \dots \wedge dx_{i_p}. \end{aligned}$$

Когомологии горизонтального комплекса де Рама на  $\tilde{\mathcal{E}}$  будем обозначать  $\tilde{H}^p(\tilde{\mathcal{E}})$ . Группа  $\tilde{H}^{n-1}(\tilde{\mathcal{E}})$  называется группой нелокальных законов сохранения уравнения  $\mathcal{E}$ .

### КОНСТРУКЦИЯ НАКРЫТИЯ

Бесконечные серии нелокальных законов сохранения будут построены в одном специальном накрытии [8, 11, 1]. Приведем его конструкцию.

1. Пусть дано накрытие  $\tau: \tilde{\mathcal{E}} \rightarrow \mathcal{E}^\infty$  уравнения  $\mathcal{E} = \{F = 0\}$ , в котором распределение  $\tilde{\mathcal{C}}$  на  $\tilde{\mathcal{E}}$  задается полями

$$\tilde{D}_i = \bar{D}_i + \sum_{j=1}^N X_{ij} \frac{\partial}{\partial w_j}, \quad i = 1, \dots, n.$$

Положим  $\tilde{\mathcal{E}}_\tau = \tilde{\mathcal{E}} \times \mathbb{R}^\infty$ , координатами в  $\mathbb{R}^\infty$  (новыми нелокальными переменными) являются  $v_j^l, j = 1, \dots, N, l > 0$ ;  $p_\sigma^{j,k}, k > 0$ , где  $p_\sigma^{j,0} = p_\sigma^j$  – внутренние координаты на уравнении  $\mathcal{E}^\infty$ . Отображение  $\tau_S : \tilde{\mathcal{E}}_\tau \rightarrow \mathcal{E}^\infty$  является композицией проекции на первый сомножитель и отображения  $\tau$ . Распределение на  $\tilde{\mathcal{E}}_\tau$  зададим системой векторных полей

$$\tilde{D}_i^\tau = \bar{D}_i^S + \sum_{l \geq 0, j} (S_p + S_v)^l (X_{ij}) \frac{\partial}{\partial v_j^l}, i = 1, \dots, n, \quad (8)$$

где

$$\bar{D}_i^S = \frac{\partial}{\partial x_i} + \sum_{l \geq 0, \sigma} S_p^l (\bar{p}_{\sigma+1_i}^j) \frac{\partial}{\partial p_\sigma^{j,l}},$$

$$S_p = \sum_{l \geq 0, \sigma} p_\sigma^{j,l+1} \frac{\partial}{\partial p_\sigma^{j,l}}, S_v = \sum_{l \geq 0, j} v_j^{l+1} \frac{\partial}{\partial v_j^l}, v_j^0 = w_j.$$

Несложно показать, что:

- 1)  $[\tilde{D}_\alpha^\tau, \tilde{D}_\beta^\tau] = 0, \alpha, \beta = 1, \dots, n$ , т. е. система полей (8) определяет структуру накрытия на  $\tilde{\mathcal{E}}_\tau$ ;
- 2) векторное поле  $S_\tau = S_p + S_w$  является нелокальной  $\tau_S$ -симметрией уравнения.

2. Дадим альтернативное описание конструкции накрытия  $\tau_S: \tilde{\mathcal{E}}_\tau \rightarrow \mathcal{E}^\infty$  в случае тождественного накрытия  $\tau = \text{id}: \mathcal{E}^\infty \rightarrow \mathcal{E}^\infty$ .

Пусть дано уравнение  $\mathcal{E} = \{F = 0\}$ , причем  $F = (F_1, \dots, F_r), F_i \in C^\infty(J^k(\pi)), \pi: E^{n+m} \rightarrow M^n$ . Рассмотрим две копии  $\pi^{(k)}: E^{(k)} = E^{n+m} \rightarrow M^n, k = 0, 1$ , расслоения  $\pi$  и их сумму Уитни  $\pi^{(0)} \oplus \pi^{(1)}$ .

Если  $(x, p_\sigma^{j,k})$  – локальные координаты в расслоениях  $E^{(k)} \rightarrow M^n, k = 0, 1$ , соответственно, то  $(x, p_\sigma^{j,0}, p_\sigma^{j,1}), j = 1, \dots, m, |\sigma| \leq k$  – канонические координаты в расслоении джетов  $J^k(\pi^{(0)} \oplus \pi^{(1)})$ .

Определим оператор  $S^{(1)} = \sum_{j,\sigma} p_\sigma^{j,1} \frac{\partial}{\partial p_\sigma^{j,0}} \in D(J^k(\pi^{(0)} \oplus \pi^{(1)}))$  и уравнение

$$E_1 = \{F = 0, S^{(1)}F = 0\} \subset J^k(\pi^{(0)} \oplus \pi^{(1)}).$$

Операторы полных производных по переменной  $x_i$  в пространствах джетов  $J^\infty(\pi^{(0)})$  и  $J^\infty(\pi^{(0)} \oplus \pi^{(1)})$  соответственно определяются формулами

$$D_i = \frac{\partial}{\partial x_i} + \sum_{j,\sigma} p_\sigma^{j,0} \frac{\partial}{\partial p_\sigma^{j,0}}, D_i^{(1)} = D_i + \sum_{j,\sigma} p_\sigma^{j,1} \frac{\partial}{\partial p_\sigma^{j,1}}.$$

Определим проекцию  $\tau_{1,0}: \mathcal{E}_1^\infty \rightarrow \mathcal{E}^\infty$ :

$$\tau_{1,0}(x, p_\sigma^{j,0}, p_\sigma^{j,1}) = (x, p_\sigma^{j,0}).$$

Очевидно, что  $(\tau_{1,0})_*(\bar{D}_i^{(1)}) = \bar{D}_i$ , где  $\bar{D}_i^{(1)}$  и  $\bar{D}_i$  – ограничения полей  $D_i^{(1)}$  и  $D_i$  на уравнения  $\mathcal{E}_1^\infty$  и  $E^\infty = E_0^\infty$  соответственно. Следовательно, построено накрытие  $\tau_{1,0}: \mathcal{E}_1^\infty \rightarrow \mathcal{E}^\infty$ .

Аналогичным образом определяем накрытия

$$\tau_{k,k-1}: \mathcal{E}_k^\infty \rightarrow \mathcal{E}_{k-1}^\infty, \quad k > 1,$$

где

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_k: F = 0, SF = 0, \dots, S^k F = 0, \\ S = \sum_{j,l,\sigma} p_\sigma^{j,l+1} \frac{\partial}{\partial p_\sigma^{j,l}}. \end{aligned}$$

Пусть  $\tau_{SE}: SE \rightarrow \mathcal{E}^\infty$  – обратный предел цепочки отображений

$$\dots \xrightarrow{\tau_{k+1,k}} \mathcal{E}_k^\infty \xrightarrow{\tau_{k,k-1}} \mathcal{E}_{k-1}^\infty \xrightarrow{\tau_{k-1,k-2}} \dots \xrightarrow{\tau_{2,1}} \mathcal{E}_1^\infty \xrightarrow{\tau} \mathcal{E}^\infty.$$

Диффеотоп  $SE$  является бесконечно продолженным уравнением  $(\mathcal{E}_S)^\infty$ , где

$$\mathcal{E}_S: F = 0, SF = 0, \dots, S^k F = 0, \dots \quad (9)$$

**3. Пример.** Рассмотрим уравнение Кортевега – де Фриза  $\mathcal{E}: u_t = u_{xxx} + uu_x$ . Для упрощения обозначений положим  $p_\phi^{1,0} = u$ ,  $p_\phi^{1,1} = v$ ,  $p_\phi^{1,2} = w$ , производные функций  $u$ ,  $v$  и  $w$  будем обозначать с помощью индексов  $x$  и  $t$ . Тогда уравнение  $\mathcal{E}_2$  имеет вид

$$\begin{cases} u_t = u_{xxx} + uu_x, \\ v_t = v_{xxx} + uv_x + vu_x, \\ w_t = w_{xxx} + 2vw_x + wu_x + uw_x. \end{cases}$$

### ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ В НАКРЫТИИ $\tau_{SE}$

В этом разделе будет показано, что с помощью симметрии  $S$  можно построить бесконечную серию нелокальных законов сохранения для любого  $\ell$ -нормального дифференциального уравнения [5, 1], имеющего хотя бы один топологически нетривиальный закон сохранения, т. е. такой закон сохранения, сохраняющаяся плотность которого зависит хотя бы от одной производной. Напомним, что в  $\ell$ -нормальной системе число уравнений равно числу неизвестных функций ( $r = m$ ).

Заметим, что если уравнение  $\mathcal{E}^\infty$  является  $\ell$ -нормальным, то уравнения  $\mathcal{E}_k^\infty$  также будут  $\ell$ -нормальными для всех  $k$ . Следовательно, определено действие симметрии  $S$  на законы сохранения уравнений  $\mathcal{E}_k^\infty$ .

Если  $[\omega] \in \bar{H}^{n-1}(SE)$  – закон сохранения уравнения  $SE$ , то его сохраняющаяся плотность  $\omega$  является горизонтальной формой на некотором уравнении  $\mathcal{E}_S^\infty: \omega \in \bar{L}^{n-1}(\mathcal{E}_S^\infty)$ . Пусть  $(\psi_0, \psi_1, \dots, \psi_s, 0, 0, \dots)$ ,  $\psi_i \in C^\infty(\mathcal{E}_S^\infty)$  – производящая функция закона сохранения  $[\omega]$ . Легко видеть, что матрица  $\mathcal{C}$ -дифференциального оператора  $\Delta$  в формуле (5) для закона сохранения  $[S\omega]$  имеет вид

$$\Delta = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{1} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{1} & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{1} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \end{pmatrix},$$

где  $\mathbf{0}$  и  $\mathbf{1}$  – нулевая и единичная матрицы порядка  $m$  соответственно.

Используя (5), получаем

$$S(\psi) + \Delta^*(\psi) = (S\psi_0, S\psi_1 + \psi_0, \dots, S\psi_k + \psi_{k-1}, \psi_k).$$

Следовательно,  $(S\psi_0, S\psi_1 + \psi_0, \dots, S\psi_s + \psi_{s-1}, \psi_s, 0, \dots)$  – производящая функция закона сохранения  $[S\omega]$ .

Отсюда следует, что любой топологически нетривиальный закон сохранения  $[\omega]$  любой  $\ell$ -нормальной системы дифференциальных уравнений порождает бесконечную серию нелокальных законов сохранения  $[S^k(\omega)]$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бочаров А.В.** Симметрии и законы сохранения уравнений математической физики / А.М. Вербовецкий, А.М. Виноградов, С.В. Дужин, И.С. Красильщик, Ю.Н. Торхов, А.В. Самохин, Н.Г. Хорькова, В.Н. Четвериков. 2-е изд. М.: Факториал-Пресс, 2005. 380 с.
2. Symmetries and Conservation Laws for Differential Equation of Mathematical Physics // Translations of Mathematical Monographs / A.V. Bocharov and etc. Providence, RI: AMS, 1999. Vol. 182. 333 p.
3. **Виноградов А.М.** Интегрируемость и симметрии // Нелинейные волны. Структуры и бифуркации. М.: Наука, 1987. С. 279–290.
4. **Vinogradov A.M.** Local symmetries and conservation laws // Acta Appl. Math. 1984. Vol. 2, No. 1. Pp. 21–78.
5. **Vinogradov A.M.** The  $\mathcal{C}$ -spectral sequence, Lagrangian formalism, and conservation laws // J. Math. Anal. Appl. 1984. Vol. 100, No. 3. Pp. 1–129.
6. **Krasilshchik I.S., Vinogradov A.M.** Nonlocal trends in the geometry of differential equations: symmetries, conservation laws, and Bäcklund transformations // Acta Appl. Math. 1989. Vol. 15. Pp. 161–209.
7. **Хорькова Н.Г.** Законы сохранения и нелокальные симметрии // Математические заметки. 1988. Т. 44. С. 134–144.
8. **Хорькова Н.Г.** Законы сохранения и нелокальные симметрии // Труды МВТУ. 1988. № 512. С. 105–119.
9. **Kiso K.** Pseudopotentials and symmetries of evolution equation: preprint. 1986. 18 p.
10. **Kiso K.** Pseudopotentials and symmetries of evolution equation // Hokkaido Math. J. 1989. Vol. 18, No. 1. Pp. 125–136.
11. **Khor'kova N.G.** On some constructions in the nonlocal theory of partial differential equations // Differential Geometry and its Appl. 2017. Vol. 54. Pp. 226–235.
12. **Sokolov V.V., Shabat A.B.** Classification of integrable evolution equations // Sov. Scientific Rev. Section C. New York: Hardwood Acad. Publ., 1984. Vol. 4. Pp. 221–280.
13. **Konopelchenko B.G.** Nonlinear integrable equations (Recursion operators, group-theoretical and Hamilton structures of soliton equations) // Lecture Notes in Physics. Vol. 270. Berlin: Springer-Verlag, 1987.
14. CRC handbook of Lie group to differential equations. Vol. 1. Symmetries, exact solutions and conservation laws / Ed. N.H. Ibragimov. Boca Raton: CRC Press, 1994.
15. CRC handbook of Lie group to differential equations. Vol. 2. Applications in engineering and physical sciences / Ed. N.H. Ibragimov. Boca Raton: CRC Press, 1995.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Хорькова Нина Григорьевна**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики МГТУ им. Н.Э. Баумана, [nkhorkova@diffiety.ac.ru](mailto:nkhorkova@diffiety.ac.ru), [ninakhorkova@yandex.ru](mailto:ninakhorkova@yandex.ru).

## ON INFINITE SERIES OF NONLOCAL CONSERVATION LAWS FOR PARTIAL DIFFERENTIAL EQUATIONS

N.G. Khor'kova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia*

### ABSTRACT

The notion of integrability of differential equations is closely connected with the existence of symmetries and conservation laws. All known integrable differential equations have infinite series of symmetries and (or) conservation laws. However, there is also a number of equations that are important for applications, but with an extremely scarce stock of symmetries or conservation laws. Attempts to extend the concepts of symmetry and conservation law were made by different authors. This article presents the following result. If a  $\ell$ -normal system of partial differential equations has a cohomologically nontrivial conservation law, then this conservation law generates an infinite series of non-local conservation laws. This fact generalizes the analogous result of the author for differential equations (not systems). The result is obtained within the framework of geometrical theory of partial differential equations (PDE). A manifold supplied with an infinite-dimensional distribution satisfying the Frobenius complete integrability condition is called a diffiety, if it is locally in the form of  $\mathcal{E}^\infty$ . Diffieties are objects of the category of differential equations introduced by A.M. Vinogradov. Symmetries of PDE are transformations (finite or infinitesimal) of the infinite prolongation  $\mathcal{E}^\infty$  preserving the Cartan distribution, while conservation laws are  $(n - 1)$ -cohomology classes of the horizontal de Rham cohomology. If a covering  $\tau: \tilde{\mathcal{E}} \rightarrow \mathcal{E}^\infty$  is given, then symmetries and conservation laws of the diffiety  $\tilde{\mathcal{E}}$  are called nonlocal symmetries and conservation laws of the equation  $\mathcal{E}$ . In appropriate coverings one can get new (nonlocal) symmetries and conservation laws for an equation under consideration. In this paper we investigate one covering and prove the existence of infinite series of nonlocal conservation laws.

**Key words:** systems of partial differential equations, coverings of differential equations, nonlocal symmetries and conservation laws.

### REFERENCES

1. Bocharov, A.V., Verboveckij, A.M., Vinogradov, A.M., Duzhin, S.V., Krasil'shchik, I.S., Torhov, YU.N., Samohin, A.V. and Khor'kova, N.G. (2005). *Simmetrii i zakony sochraneniya uravneniy matematicheskoy fiziki* [Symmetries and Conservation Laws for Differential Equation of Mathematical Physics]. Ed. A.V. Bocharov. 2-e izd. Moscow: Factorial-Press, 380 p. (in Russian)
2. *Symmetries and Conservation Laws for Differential Equation of Mathematical Physics*. (1999). Ed. A.V. Bocharov and etc. Translations of Mathematical Monographs, vol. 182. Providence, RI: AMS, 333 p.
3. Vinogradov, A.M. (1987). *Integriruemost i simmetrii* [Integrability and Symmetries]. *Nelineinye volny. Structure i bifurkacii*. Moscow: Nauka, pp. 279–290. (in Russian)
4. Vinogradov, A.M. (1984). *Local symmetries and conservation laws*. Acta Appl. Math., vol. 2, no. 1, pp. 21–78.
5. Vinogradov, A.M. (1984). *The  $\mathcal{C}$ -spectral sequence, Lagrangian formalism, and conservation laws*. J. Math. Anal. Appl., vol. 100, no. 3, pp. 1–129.
6. Krasilshchik, I.S. and Vinogradov, A.M. (1989). *Nonlocal trends in the geometry of differential equations: symmetries, conservation laws, and Bäcklund transformations*. Acta Appl. Math., vol. 15, pp. 161–209.

7. **Khor'kova, N.G.** (1988). *Conservation laws and nonlocal symmetries*. Math. Notes, vol. 44, pp. 562–568.
8. **Khor'kova, N.G.** (1988). *Zakony sochraneniya i nelocal'nye simmetrii* [Conservation laws and nonlocal symmetries]. Trudy MVTU, no. 512, pp. 105–119. (in Russian)
9. **Kiso, K.** (1986). *Pseudopotentials and symmetries of evolution equation*: preprint, 18 p.
10. **Kiso, K.** (1989). *Pseudopotentials and symmetries of evolution equation*. Hokkaido Math. J., vol. 18, no. 1, pp. 125–136.
11. **Khor'kova, N.G.** (2017). *On some constructions in the nonlocal theory of partial differential equations*. Differential Geometry and its Appl., vol. 54, pp. 226–235.
12. **Sokolov, B.V. and Shabat, A.B.** (1984). *Classification of integrable evolution equations*. Sov. Scientific Rev. Section C. New York: Hardwood Acad. Publ., vol. 4, pp. 221–280.
13. **Konopelchenko, B.G.** (1987). *Nonlinear integrable equations (Recursion operators, group-theoretical and Hamilton structures of soliton equations)*. Lecture Notes in Physics, vol. 270. Berlin: Springer-Verlag.
14. *CRC handbook of Lie group to differential equations*. (1994). Vol. 1. Symmetries, exact solutions and conservation laws. Ed. N.H. Ibragimov. Boca Raton: CRC Press.
15. *CRC handbook of Lie group to differential equations*. (1995). Vol. 2. Applications in engineering and physical sciences. Ed. N.H. Ibragimov. Boca Raton: CRC Press.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Nina G. Khor'kova**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Applied Mathematics Chair of Bauman Moscow State Technical University, [nkhorkova@diffiety.ac.ru](mailto:nkhorkova@diffiety.ac.ru), [ninakhorkova@yandex.ru](mailto:ninakhorkova@yandex.ru).

Поступила в редакцию 15.09.2017  
Принята в печать 15.05.2018

Received 15.09.2017  
Accepted for publication 15.05.2018

УДК 621.396

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-160-168

## РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ РАССЕЯНИЯ И ВОССТАНОВЛЕНИЕ ФОРМЫ ОБЪЕКТА ПО СТРУКТУРЕ ПОЛЯ ОТРАЖЕННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ

А.И. КОЗЛОВ<sup>1</sup>, В.Ю. МАСЛОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет гражданской авиации,  
г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Московский технологический университет, г. Москва, Россия

Для расчета отраженного поля от объекта его можно описывать совокупностью точечных отражателей, координаты которых в плоскости падения электромагнитной волны соответствовали узлам двумерной сетки с достаточно мелким шагом. При этом в расчетах отраженного поля используется модель однократного рассеяния, не учитывающая переотражение и взаимное влияние точечных элементов. Использован алгоритм быстрого прямого и обратного преобразования. Предлагаются алгоритмы численного решения прямой и обратной задачи рассеяния на объекте. Метод использует лучевые представления полей рассеяния, базирующиеся на принципе Гюйгенса – Френеля. Представлена графическая схема взаимного расположения объекта и плоскости наблюдения отраженного от объекта электромагнитного поля. Графически изображена двойная отражающая гауссова поверхность. Представлены рисунки модуля и аргумента комплексной амплитуды напряженности электрического поля отраженной волны от двойной гауссовой поверхности. Для нахождения формы поверхности неизвестного объекта используется алгоритм восстановления формы объекта по фазе отраженной волны, основанный на нахождении по аргументам комплексных элементов матрицы зависимости абсолютной фазы, которая пропорциональна расстоянию до соответствующей точки объекта.

**Ключевые слова:** обратная задача рассеяния, восстановление формы объекта, поляризация радиоволн, матрица рассеяния радиоволн.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших проблем радиолокации является решение задачи дистанционного определения рельефа местности<sup>1</sup> [1, 10, 10, 11], относящейся, как известно, к классу так называемых «вечных» задач. Ниже приводится принципиально новый подход к ее решению, опирающийся на некоторые идеализированные модели процессы рассеяния на негладкой поверхности. Тем не менее излагаемый подход можно рассматривать как первый шаг, дающий в дальнейшем усложнять модели.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ

Для расчета отраженного поля от объекта его можно описывать совокупностью точечных отражателей, координаты которых в плоскости падения электромагнитной волны соответствовали узлам двумерной сетки с достаточно мелким шагом. При этом в расчетах отраженного поля используется модель однократного рассеяния, не учитывающая переотражение и взаимное влияние точечных элементов. Значение диаграммы направленности каждого точечного элемента в направлении на антенну предполагалось равным косинусу угла

<sup>1</sup> Обнаружение, распознавание и определение параметров образов объектов / под ред. А.В. Коренного. М.: Радиотехника, 2012. 112 с.

между нормалью к локальной точке поверхности и этим направлением. Известно [1], что массив отражателей адекватно описывает сплошную поверхность, когда шаг сетки как минимум на порядок меньше длины волны зондирующего сигнала.

Пусть на неизвестный трехмерный объект с гладкой поверхностью падает плоская электромагнитная волна. Поверхность объекта имеет комплексную функцию рассеяния. Необходимо восстановить форму поверхности объекта по измерениям значения электромагнитного поля отраженной волны на расстоянии  $r$  от объекта.

Метод численного решения этой задачи использует лучевые представления полей рассеяния, базирующиеся на принципе Гюйгенса – Френеля. Метод включает в себя специально разработанные для данного случая алгоритмы быстрого численного прямого и обратного преобразования Гюйгенса – Френеля [2] и алгоритм восстановления формы неизвестного объекта по распределению фазы отраженной волны.

Используем разработанный в работах [2, 3] алгоритм быстрого численного прямого и обратного преобразования Гюйгенса – Френеля.

Если на поверхность объекта падает плоская электромагнитная волна, то в точке наблюдения (рис. 1) комплексная амплитуда напряженности электрического поля отраженной волны находится по формуле

$$e_{m,n} = \int_{D(x,y)} \underline{S}_{x,y} \frac{e^{ik\rho}}{\rho} dx dy, \quad (1)$$

где  $\underline{S}_{x,y}$  – функция рассеяния объекта,  $\rho$  – расстояние между рассеивающей точкой на поверхности объекта и точкой, где определяется величина отраженного поля,  $k = 2\pi/\lambda$  – волновое число,  $\lambda$  – длина волны,  $D(x,y)$  – контур объекта. Начало координат совпадает с первыми элементами соответствующих двумерных массивов  $\underline{S}_{x,y}$  и  $e_{m,n}$ .

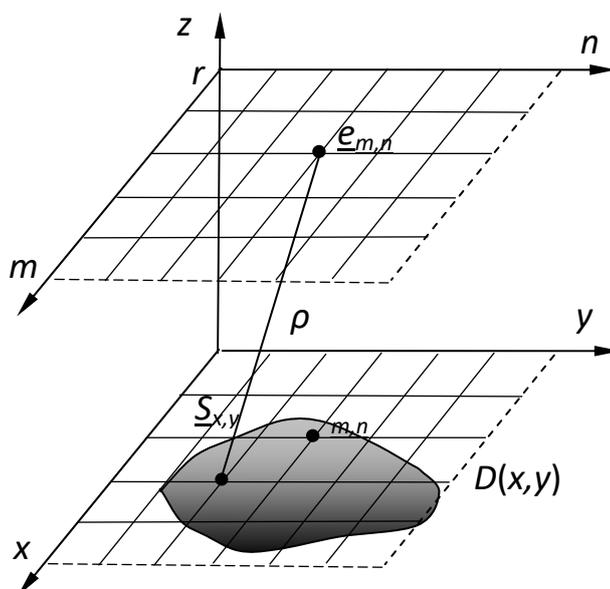


Рис. 1. Схема взаимного расположения объекта и плоскости наблюдения отраженного от объекта электромагнитного поля

Fig. 1. The scheme of a relative positioning of an object and plane of the observation reflected from an object of the electromagnetic field

Поэтому если поверхность трехмерного объекта описывается уравнением  $z = f_{x,y}$  и облучается плоской волной, нормаль к которой совпадает с осью  $z$ , то расстояние

$$\rho = \left[ d^2 \left( (x-m)^2 + (y-n)^2 \right) + \left( r + f_{x,y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (2)$$

Точки, в которых задается функция рассеяния объекта, и точки, где определяются величины отраженного поля, располагаются в параллельных плоскостях на расстоянии  $d$  друг от друга. В области, в которой отраженные волны имеют сферический фронт, в множителе  $1/\rho$  расстояние  $\rho$  полагается  $\rho \approx r$ , а расстояние  $\rho$  в показателе экспоненты можно представить в виде двух членов разложения в ряд Тейлора:

$$\rho \approx r + f_{x,y} + \frac{d^2 \left( (x-m)^2 + (y-n)^2 \right) + f_{x,y}^2}{2r} = \rho_0 + \rho_f, \quad (3)$$

где  $\rho_0 = r + \frac{d^2 \left( (x-m)^2 + (y-n)^2 \right)}{2r}, \quad \rho_f = f_{x,y} + \frac{f_{x,y}^2}{2r}.$

С учетом сделанных предположений комплексная амплитуда вектора напряженности электрического поля отраженной волны определяется как

$$\underline{e}_{m,n} = \sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^N \underline{S}_{x,y} \frac{e^{ik\rho}}{r} = \sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^N \underline{S}_{x,y} \frac{e^{ik(\rho_0 + \rho_f)}}{r}, \quad (4)$$

$$\underline{e}_{m,n} = \sum_{y=1}^N \sum_{x=1}^N \frac{e^{ik\rho_0}}{r} \underline{S}_{x,y} \frac{e^{ik\rho_f}}{r}, \quad (5)$$

где размерность двумерных массивов  $\underline{S}_{x,y}$  и  $\underline{e}_{m,n}$  равно произведению  $N \times N$ .

Выражение (5) можно представить в виде произведения матриц

$$\mathbf{G} = \Phi \mathbf{P}. \quad (6)$$

При этом двумерный массив  $\underline{p}_{x,y} = \underline{S}_{x,y} e^{ik \left( f_{x,y} + \frac{f_{x,y}^2}{2r} \right)}$  в уравнении (6) преобразуется в матрицу  $\mathbf{P}$  размером  $N^2 \times 1$

$$\mathbf{P} = \left( \underline{p}_{1,1} \quad \underline{p}_{1,2} \quad \cdots \quad \underline{p}_{1,N} \quad \underline{p}_{2,1} \quad \underline{p}_{2,2} \quad \cdots \quad \underline{p}_{N,N} \right)^T \frac{1}{r}. \quad (7)$$

Матрица  $\Phi$  размером  $N^2 \times N^2$  имеет элементы

$$\underline{\phi}_{m,n}^{x,y} = e^{ikd^2 \left( (x-m)^2 + (y-n)^2 \right) \frac{1}{2r}}. \quad (8)$$

Матрица  $\Phi$  зависит только от двух величин  $r$  и  $d$ , определяющих взаимное положение объекта и точек наблюдения отраженного поля. Поэтому при неизменных величинах  $r$  и  $d$  требуется лишь однократный расчет этой матрицы. Этим достигается высокое быстродействие предложенного алгоритма прямого преобразования Гюйгенса – Френеля [2, 6, 12].

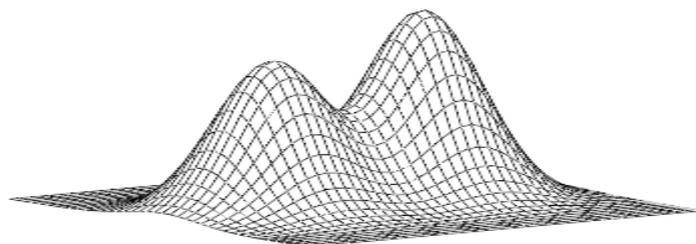
Полученную в результате расчета по формуле (6) матрицу  $G$  размером  $N^2 \times 1$

$$G = (\underline{e}_{1,1} \quad \underline{e}_{1,2} \quad L \quad \underline{e}_{1,N} \quad \underline{e}_{2,1} \quad \underline{e}_{2,2} \quad L \quad \underline{e}_{N,N})^T \quad (9)$$

следует затем преобразовать в двумерную матрицу размером  $N \times N$

$$G_0 = \begin{pmatrix} \underline{e}_{1,1} & L & \underline{e}_{1,N} \\ M & & M \\ \underline{e}_{N,1} & L & \underline{e}_{N,N} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

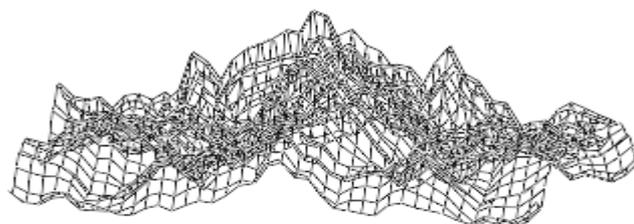
На рис. 2 в качестве отражающего объекта изображена двойная гауссова поверхность с постоянной функцией рассеяния  $\underline{S}_{x,y}$ .



**Рис. 2.** Двойная отражающая гауссова поверхность ( $N = 40$ )  
**Fig. 2.** The double reflecting Gaussian surface ( $N = 40$ )

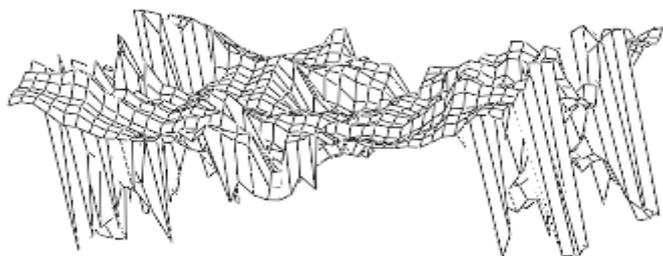
Результаты расчета по формуле (6) модуля и аргумента комплексной амплитуды напряженности электрического поля отраженной волны  $\underline{e}_{m,n}$  на расстоянии  $r$  от двойной отражающей гауссовой поверхности представлены соответственно на рис. 3 и 4.

Для получения радиоизображения исследуемого объекта зарегистрированные значения комплексной амплитуды напряженности электрического поля отраженной волны  $\underline{e}_{m,n}$  должны быть подвергнуты процедуре восстановления.



**Рис. 3.** Массив значений модуля комплексной амплитуды напряженности электрического поля отраженной волны  $\underline{e}_{m,n}$  от двойной гауссовой поверхности

**Fig. 3.** Array of values of the module of complex amplitude of strength of electrical fields of the reflected mode  $\underline{e}_{m,n}$  from a double Gaussian surface



**Рис. 4.** Массив значений аргумента комплексной амплитуды напряженности электрического поля отраженной волны  $\underline{e}_{m,n}$  от двойной гауссовой поверхности

**Fig. 4.** Array of argument values of complex amplitude of strength of electric field of the reflected mode  $\underline{e}_{m,n}$  from a double Gaussian surface

Алгоритм обратного преобразования Гюйгенса – Френеля заключается в нахождении матрицы  $\mathbf{P}$  размером  $N^2 \times 1$ , элементы которой характеризуются функцией рассеяния объекта  $\underline{S}_{x,y}^{2,3}$  [4, 5]. Эта задача сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений вида

$$\Phi \mathbf{P} = \mathbf{G}. \quad (11)$$

В уравнении (11) матрица  $\Phi$  определяется из соотношения (8) при заданных геометрических величинах  $r$  и  $d$ , определяющих взаимное положение объекта и точек наблюдения отраженного поля. Матрица  $\mathbf{G}$  размером  $N^2 \times 1$  образуется из массива комплексных значений отраженного поля  $\underline{e}_{m,n}$  (9). Для решения системы (11) можно использовать, например, алгоритм  $LU$ -разложения. При постоянных величинах  $r$  и  $d$ , определяющих взаимное положение объекта и точек наблюдения отраженного поля, требуется однократное нахождение разложения матрицы

$$\Phi = \mathbf{LU}, \quad (12)$$

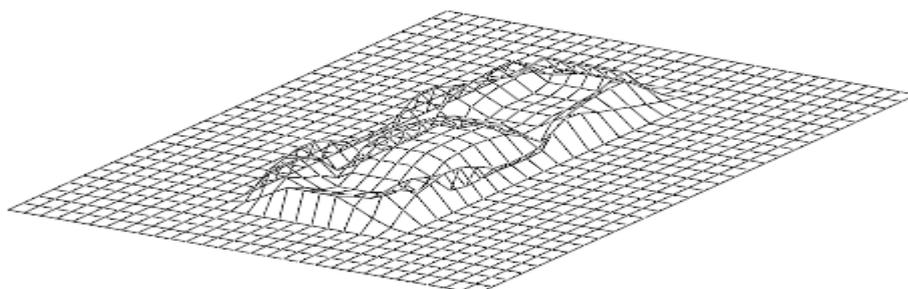
где  $\mathbf{L}$  – нижняя треугольная, а  $\mathbf{U}$  – верхняя треугольная матрицы. Этим обстоятельством определяется высокое быстродействие предложенного алгоритма обратного преобразования Гюйгенса – Френеля.

После нахождения искомой матрицы  $\mathbf{P}$  ее надо преобразовать в квадратную матрицу  $\mathbf{P}_0$  размером  $N \times N$ . На рис. 5 и 6 представлены соответственно массивы модуля и аргумента комплексных элементов матрицы  $\mathbf{P}_0$ .

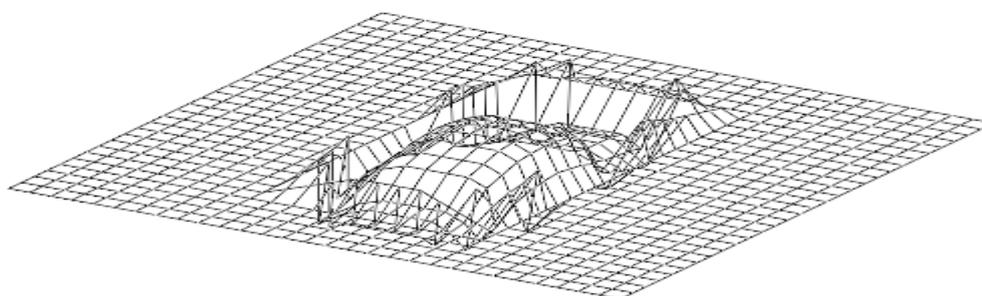
Для нахождения формы поверхности неизвестного объекта используется алгоритм восстановления формы объекта по фазе отраженной волны [3], основанный на нахождении по аргументам комплексных элементов матрицы  $\mathbf{P}_0$  зависимости абсолютной фазы, которая пропорциональна расстоянию до соответствующей точки объекта  $k\rho_{m,n}$  ( $k = 2\pi/\lambda$ ).

<sup>2</sup> Справочник по радиолокации. В 2-х кн. / под ред. М. Сколник. М.: Техносфера, 2014. 680 с.

<sup>3</sup> Справочник. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория / под ред. Я.Д. Ширман. М.: Радиотехника, 2007. 515 с.

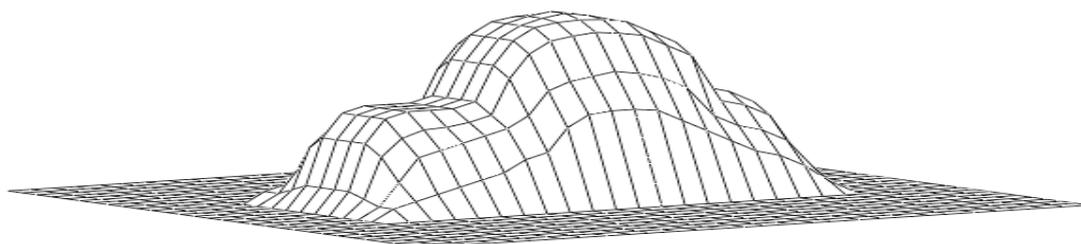


**Рис. 5.** Массив значений модулей комплексных элементов матрицы  $P_0$  объекта  
**Fig. 5.** Array of modules values of complex elements of a matrix  $P_0$  of an object



**Рис. 6.** Массив значений аргументов комплексных элементов матрицы  $P_0$  объекта  
**Fig. 6.** Array of argument values of complex elements of a matrix  $P_0$  of an object

На рис. 7 приводится восстановленная форма поверхности объекта по аргументам комплексных элементов матрицы  $P_0$  обратного преобразования Гюйгенса – Френеля.



**Рис. 7.** Восстановленная форма объекта  
**Fig. 7.** Restored object shape

Рассмотренный подход к решению задачи дистанционного определения рельефа местности и ее строгое решение, опирающееся на идеализированные модели рассеяния, дает возможность перейти к следующему шагу в уточнении построенного рельефа.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А. Поляризация радиоволн. Кн. 2. Радиолокационная поляриметрия. М.: Радиотехника, 2007. 644 с.
2. Козлов А.И., Маслов В.Ю. Численный метод решения трехмерной обратной задачи рассеяния электромагнитных волн на препятствии // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 179. С. 135–139.

3. Козлов А.И., Маслов В.Ю. Восстановление формы поверхности объекта по поляризационной структуре поля отраженной волны // Научный Вестник МГТУ ГА. 2016. Т. 19, № 5. С. 45–53.
4. Козлов А.И., Маслов В.Ю. Численный метод определения неоднородной комплексной диэлектрической проницаемости плоской поверхности объектов по поляризационной структуре поля отраженной электромагнитной волны // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 179. С. 140–144.
5. Козлов А.И., Маслов В.Ю. Дистанционное определение диэлектрической проницаемости поверхности в оптическом диапазоне // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 210(12). С. 40–42.
6. Козлов А.И., Маслов В.Ю. Дифференциальные уравнения эволюции матрицы рассеяния // Научный Вестник МГТУ ГА. 2014. № 210(12). С. 43–46.
7. Богородский В.В., Канарейкин Д.Б., Козлов А.И. Поляризация рассеянного и собственного радиоизлучения земных покровов. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 279 с.
8. Богородский В.В., Козлов А.И. Микроволновая радиометрия земных покровов. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 272 с.
9. Кондратенков Г.С., Фролов А.Ю. Радиовидение. Радиолокационные системы дистанционного зондирования Земли. М.: Радиотехника, 2005. 368 с.
10. Островитянов Р.В., Басалов Ф.А. Статистическая теория радиолокации протяженных целей. М.: Радио и связь, 1982. 232 с.
11. Верба В.С. Авиационные комплексы радиолокационного дозора и наведения. Принципы построения, проблемы разработки и особенности функционирования. М.: Радиотехника, 2014. 525 с.
12. Хорн Р., Джонсон Ч. Матричный анализ. М.: Мир, 1989. 655 с.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Козлов Анатолий Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта Московского государственного технического университета гражданской авиации, vilandes@yandex.ru.

**Маслов Виктор Юрьевич**, доктор технических наук, профессор, профессор Московского технологического университета, vilandes@yandex.ru.

## THE INVERSE-SCATTERING PROBLEM SOLUTION AND SHAPE FROM THE REFLECTED ELECTROMAGNETIC WAVE FIELD STRUCTURE

Anatoliy I. Kozlov<sup>1</sup>, Viktor Yu. Maslov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Moscow Technological University, Moscow, Russia

#### ABSTRACT

The reflected field calculation from the object can be described with the set of point reflectors with the coordinates in electromagnetic wave plane of incidence corresponding to two-dimensional grid nodes with rather small-sized step. At the same time, the single scattering model which does not consider the re-reflection and point elements cross impact is used in the reflected field calculations. The rapid direct and inverse transformation algorithm is used. The numerical solution

algorithms of the direct and inverse scattering problems on the object are offered. The method uses the ray representations scattering fields which are based on the Huygens-Fresnel principle. The graphic diagram of the reciprocal object positioning and the observation plane from the reflected electromagnetic field object is represented. The double reflecting Gaussian surface is graphically figured. The figures of the module and the complex amplitude electric field strength of the reflected wave from a double Gaussian surface argument are provided. To shape the surface of the unknown object the recovery shape algorithm is used, by means of reflected wave phase. This algorithm is based on finding the complex matrix elements in dependence on absolute phase, which is proportional to the appropriate point object distance.

**Key words:** inverse scattering problem, the recovery of the object shape, the radio waves polarization, radio waves scattering matrix.

## REFERENCES

1. **Kozlov, A.I., Logvin, A.I. and Sarychev, V.A.** (2007). *Polyarizaciya radiovoln. Kn. 2. Radiolokacionnaya polyarimetriya* [Polarization of radio waves. Book 2. Radar polarimetry]. Moscow: Radio engineering, 644 p. (in Russian)
2. **Kozlov, A.I. and Maslov, V.Yu.** (2012). *Chislennyj metod reshenija trehmernoj obratnoj zadachi rassejanija jelektromagnitnyh voln na prepjatstvii* [Numerical method of the decision of a three-dimensional inverse problem of dissipation of the electromagnetic waves on obstacle]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 179, pp. 135–139. (in Russian)
3. **Kozlov, A.I. and Maslov, V.Yu.** (2016). *Vosstanovlenie formy poverhnosti ob'ekta po poljarizacionnoj strukture polja otrazhennoj volny* [Shape restoration of object surface on polarization structure of reflected electromagnetic wave field]. Civil Aviation High Technologies, vol. 19, no. 5, pp. 45–53. (in Russian)
4. **Kozlov, A.I. and Maslov, V.Yu.** (2012). *Chislennyj metod opredelenija neodnorodnoj kompleksnoj dijelektricheskoj pronicaemosti ploskoj poverhnosti ob'ektov po poljarizacionnoj strukture polja otrazhennoj jelektromagnitnoj volny* [Numerical method of the determination complex permeability to flat surface object on polarization structure of the field of the reflected electromagnetic wave]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 179, pp. 140–144. (in Russian)
5. **Kozlov, A.I. and Maslov, V.Yu.** (2014). *Distancionnoe opredelenie dijelektricheskoj pronicaemosti poverhnosti v opticheskom diapazone* [Remote sensing of dielectric permeability of surface in optical range]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 12(210), pp. 40–42. (in Russian)
6. **Kozlov, A.I. and Maslov, V.Yu.** (2014). *Differencial'nye uravnenija jevoljucii matricy rassejanija* [Differential equations to evolutions of scattering matrix]. Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, no. 1(210), pp. 43–46. (in Russian)
7. **Bogorodskii, V.V., Kanareykin, D.B. and Kozlov, A.I.** (1981). *Poljarizacija rassejannogo i sobstvennogo radioizluchenija zemnyh pokrovov* [Polarization of scattered and own radio emission of terrestrial covers]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 280 p. (in Russian)
8. **Bogorodskii, V.V. and Kozlov, A.I.** (1985). *Mikrovolnovaja radiometrija zemnyh pokrovov* [Microwave radiometry of terrestrial covers]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 260 p. (in Russian)
9. **Kondratenkov, G.S. and Frolov, A.Ju.** (). *Radiolokacionnie sistemi distancionnogo zondirovanija Zemli* [Radio-wave imaging. Radar systems of Earth's remote sensing]. Moscow: Radio Engineering, 2005, 368 p. (in Russian)
10. **Ostrovitjanov, R.V. and Basalov, F.A.** (1982). *Statisticheskaja teorija radiolokacii pronjaczennich celej* [Statistical theory of extended radar targets]. Moscow: Radio i svjaz [Radio and Communication], 232 p. (in Russian)

**11. Verba, V.S.** (2014). *Aviacionnije kompleksi radiolokacionnogo dozora i navedenija* [Aviation complexes of radar patrol and guidance. Principles of design, problems of development and maintenance features]. Moscow: Radio Engineering, 525 p. (in Russian)

**12. Horn, R. and Johnson, C.** (1989). *Matrichnyj analiz* [Matrix analysis]. Moscow: Mir, 655 p. (in Russian)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Anatoliy I. Kozlov**, Professor, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Chair of Technical Maintenance of Radio Electronic Equipment for Air Transport of the Moscow State Technical University of Civil Aviation, vilandes@yandex.ru.

**Viktor Yu. Maslov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Moscow Technological University, vilandes@yandex.ru.

Поступила в редакцию 12.09.2017  
Принята в печать 15.05.2018

Received 12.09.2017  
Accepted for publication 15.05.2018

УДК 621.396.96

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-3-169-177

## ДИСКРЕТИЗАЦИЯ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СИГНАЛА

П.Е. КОРНЕЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Егорьевский технологический институт (филиал)  
ФГБОУ «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,  
г. Егорьевск, Россия*

Зачастую решение мониторинговыми системами задач дистанционного зондирования, распознавания (классификации, различения) радиолокационных объектов методами радиополяриметрии требуется в режиме реального масштаба времени с отображением актуальной информации на мониторе радиолокатора. Мониторинговые системы могут быть как стационарными (чаще наземными) так и подвижными (базируемыми на различных транспортных носителях). При проектировании таких систем, наряду с обеспечением требуемого быстродействия и производительности вычислительной машины, важно также обеспечить унификацию блоков и узлов, снижение массогабаритных характеристик, упрощение настройки, повышение эксплуатационной надежности. В этом случае требуется применение блоков цифровой обработки информации. При цифровой обработке поляризованных сигналов необходимо преобразовать входной аналоговый сигнал в цифровую форму, то есть произвести дискретизацию по времени и частоте и осуществить квантование по уровню. В статье рассматриваются особенности дискретизации по времени радиолокационного поляризованного сигнала. Выводятся аналитические выражения для входного поляризованного сигнала с учетом геометрических параметров эллипса поляризации. Приводятся формулы для синфазной и квадратурной составляющих поляризованного сигнала и для комплексной огибающей сигнала. Утверждается, что квадратурная обработка поляризованного сигнала приводит к снижению требований к микросхемам аналого-цифрового преобразования из-за существенного снижения частоты дискретизации. После преобразований, представленных в статье, в мониторинговых системах можно применять электронные компоненты, которые уже сегодня находятся в производстве у Российских компаний радиоэлектронной промышленности. Описанные в статье преобразования поляризованного сигнала во временной области приводят к определенным преобразованиям в частотной области. Речь ведется о преобразовании двухстороннего спектра сигнала в односторонний спектр с переносом его в область видеочастот. Такое преобразование помогает снизить частоту дискретизации с гигагерц до мегагерц. Аналитические выражения во временной области сопровождаются в статье графической интерпретацией спектров сигнала в частотной области. Приводится схема демодуляции синфазной и квадратурной составляющих поляризованного сигнала. Описываются функциональные особенности блоков фильтрации в схеме, акцентируется внимание разработчиков систем цифровой обработки сигналов на требования теоремы Котельникова о дискретизации.

**Ключевые слова:** Поляризация радиолокационных сигналов, радиополяриметрия, дискретизация сигналов, цифровая обработка сигналов.

### ВВЕДЕНИЕ

Интерес к методам радиополяриметрии в последние годы неуклонно растет в самых разных областях науки и техники. Радиополяриметрия – наука о формировании поляризационной структуры радиоволн и радиосигналов, а также об управлении этой структурой для обеспечения приема, передачи, обработки и хранения информации [2]. Отраженные от исследуемых объектов радиоволны несут в себе гораздо больше информации о радиолокационных целях и рассеивающих объектах, если учитывать поляризационную структуру сигналов. Под поляризацией радиоволн понимается свойство электромагнитного поля, соответствующего радиоволнам, определяемое пространственно-временной структурой векторов, составляющих поле, инвариантной к динамике распространения поля и к временной зависимости его источников [2].

В настоящее время наблюдается возрастающая роль задач дистанционного зондирования поверхности и распознавания радиолокационных целей [2, 3]. Зачастую решение этих задач требуется в режиме реального масштаба времени с отображением актуальной информации на

мониторе радиолокатора для принятия незамедлительных решений. В этой связи возникает необходимость применения методов цифровой обработки поляризованных сигналов. Переход к цифровой обработке поляризованных сигналов позволяет максимально унифицировать блоки и узлы поляризационного радиолокатора, автоматизировать их разработку и проектирование, снизить массогабаритные характеристики, упростить настройку и повысить эксплуатационную надежность.

Несущие частоты радиолокатора при решении задач распознавания целей с высокой разрешающей способностью в любое время дня и ночи, при разнообразных метеоусловиях могут составлять единицы – десятки (до 100) ГГц, при информационной полосе радиолокационного сигнала единицы – десятки МГц. В этом случае достаточно сложно применять традиционные методы цифровой обработки сигналов по ряду причин. Одна из таких причин – необходимость производить дискретизацию сигнала с очень высокой частотой дискретизации. При этом реалии таковы, что в серийном производстве российской радиоэлектронной промышленности быстродействующих аналого-цифровых преобразователей (АЦП) с частотами дискретизации единицы – десятки ГГц нет (на сегодняшний день существуют опытные образцы с быстродействием порядка 40 MSPS (MSPS – миллион выборок в секунду) при разрядности АЦП 12–14). У зарубежных производителей в серийном производстве существуют микросхемы АЦП с быстродействием 3 GSPS (GSPS – миллиард выборок в секунду) при разрядности АЦП 12–14. При этом цена 1 микросхемы быстродействующего АЦП от зарубежных производителей составляет порядка 120000 рублей с определенными сложностями поставки этих микросхем в Россию (из-за действующих в отношении нашей страны политических санкций).

## КВАДРАТУРНАЯ ОБРАБОТКА ПОЛЯРИЗОВАННОГО СИГНАЛА

Произведем преобразования принимаемого радиолокационного поляризованного сигнала в аналоговой области для успешной последующей цифровой обработки (с учетом применения имеющейся в России элементной базы).

Рассмотрим узкополосный радиолокационный эллиптически поляризованный сигнал с несущей частотой  $f_0$ , который образован суммированием двух колебаний с круговой поляризацией встречного вращения, имеющих одинаковую частоту  $|f_0|$ , но различающихся по модулю амплитуды  $a$  и начальной фазы  $\varphi$ . Из [4] известно, что эллиптически поляризованный аналитический сигнал  $x_a(t)$  описывается следующей комплексной функцией:

$$x_a(t) = a_+ e^{j(2\pi f_0 t + \varphi_+)} + a_- e^{-j(2\pi f_0 t + \varphi_-)}, \quad (1)$$

где  $a_+, \varphi_+$  – амплитуда и начальная фаза левосторонне поляризованного колебания,  $a_-, \varphi_-$  – амплитуда и начальная фаза правосторонне поляризованного колебания соответственно,  $j$  – мнимая единица.

Выражение (1) дает самое общее описание поляризованного гармонического сигнала. Очевидно, что при  $a_+ = 0$  или  $a_- = 0$  эллиптически поляризованный сигнал обращается в сигнал с круговой поляризацией, а при  $a_+ = a_- = a$  – в линейно поляризованный гармонический сигнал [4]. Нужно также отметить, что сигнал (1) описывает эллиптически поляризованный сигнал в параметрах двухстороннего спектра  $a_+, \varphi_+$  и  $a_-, \varphi_-$ . Преобразуем выражение (1) в сигнал с параметрами одностороннего спектра, которые непосредственно характеризуют поляризационную структуру сигнала. Речь идет о следующих параметрах:  $A$  – амплитуда эллиптически

ски поляризованного сигнала,  $\varphi_0$  – начальная фаза,  $\varepsilon$  – угол эллиптичности и  $\beta$  – угол ориентации эллипса поляризации. На рис. 1 приведена геометрическая интерпретация поляризационной структуры сигнала.

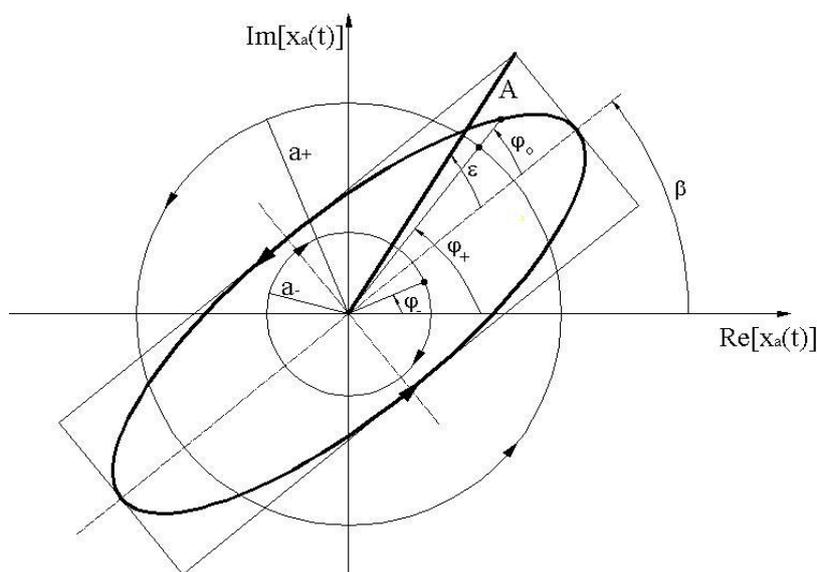


Рис. 1. Поляризационная структура сигнала  
Fig. 1. Polarization structure of the signal

Приведем (1) к общему виду аналитического сигнала

$$x_a(t) = x(t) + jx_r(t), \quad (2)$$

используя формулу Эйлера, где  $x(t)$  – действительный радиолокационный поляризованный сигнал,  $x_r(t)$  – Гильбертов сигнал.

$$x_a(t) = [a_+ \cos(2\pi f_0 t + \phi_+) + a_- \cos(2\pi f_0 t - \phi_-)] + j[a_+ \sin(2\pi f_0 t + \phi_+) - a_- \sin(2\pi f_0 t - \phi_-)] \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, что

$$x(t) = a_+ \cos(2\pi f_0 t + \phi_+) + a_- \cos(2\pi f_0 t - \phi_-). \quad (4)$$

Раскрывая косинус суммы и разности двух аргументов, получаем

$$x(t) = [a_+ \cos(\phi_+) + a_- \cos(\phi_-)] \cos(2\pi f_0 t) + [a_- \sin(\phi_-) - a_+ \sin(\phi_+)] \sin(2\pi f_0 t). \quad (5)$$

Определим синфазную  $x_c(t)$  и квадратурную  $x_s(t)$  составляющие сигнала:

$$x_c(t) = a_+ \cos(\phi_+) + a_- \cos(\phi_-); \quad (6)$$

$$x_s(t) = a_- \sin(\phi_-) - a_+ \sin(\phi_+). \quad (7)$$

Введем комплексную огибающую  $\gamma(t)$ :

$$\gamma(t) = x_c(t) + jx_s(t). \quad (8)$$

При этом сигнал  $x(t)$  равен

$$x(t) = \text{Re}[\gamma(t) \cdot e^{j2\pi f_0 t}], \quad (9)$$

где  $\text{Re}[\cdot]$  – операция взятия действительной части комплексного числа.

По теореме смещения спектра [5, 6, 13] произведение  $\gamma(t) \cdot e^{j2\pi f_0 t}$  во временной области соответствует переносу спектра вправо на  $f_0$ .

Учитывая, что  $A \cos(\varepsilon) = a_+ + a_-$  и  $A \sin(\varepsilon) = a_+ - a_-$ , и пользуясь тригонометрическими выражениями суммы и разности косинуса и синуса одного аргумента, получаем

$$\begin{aligned} a_+ &= \frac{\sqrt{2}}{2} A \cos\left(\frac{\pi}{4} - \varepsilon\right), \\ a_- &= \frac{\sqrt{2}}{2} A \sin\left(\frac{\pi}{4} - \varepsilon\right). \end{aligned} \quad (10)$$

Аналогично, принимая во внимание, что  $\varphi_0 = \frac{\varphi_+ - \varphi_-}{2}$  и  $\beta = \frac{\varphi_+ + \varphi_-}{2}$ , имеем

$$\begin{aligned} \varphi_+ &= \beta + \varphi_0, \\ \varphi_- &= \beta - \varphi_0. \end{aligned} \quad (11)$$

При этом  $-\pi < \varphi_0 \leq \pi$ ,  $0 \leq \beta \leq \pi$ ,  $-\frac{\pi}{4} \leq \varepsilon \leq \frac{\pi}{4}$ .

Учитывая (6), (7), (10) и (11), получаем следующие выражения для синфазной  $x_c(t)$  и квадратурной  $x_s(t)$  составляющих сигнала:

$$x_c(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} A \left[ \cos\left(\frac{\pi}{4} - \varepsilon\right) \cdot \cos(\beta + \varphi_0) + \sin\left(\frac{\pi}{4} - \varepsilon\right) \cdot \cos(\beta - \varphi_0) \right]; \quad (12)$$

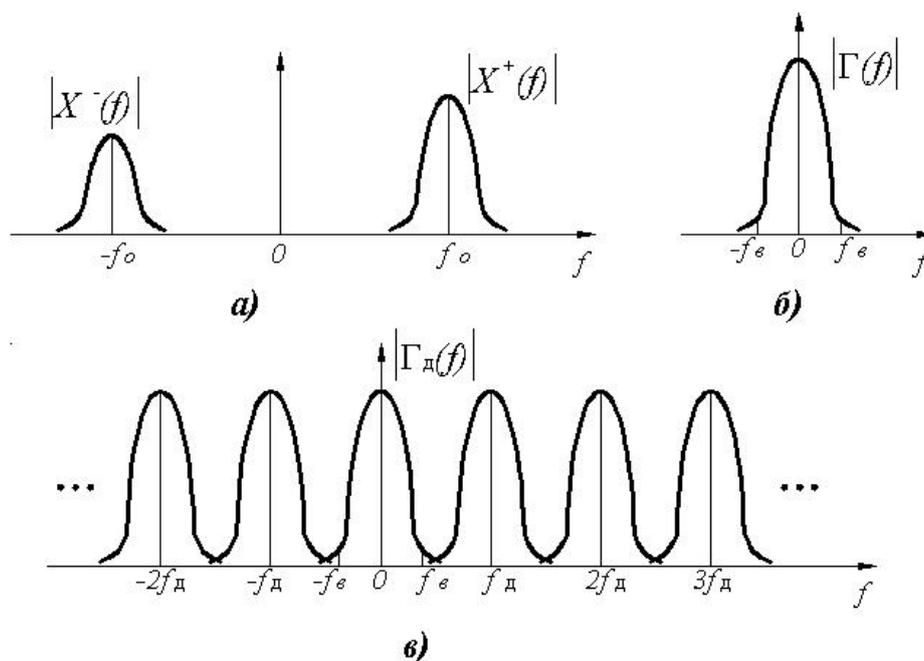
$$x_s(t) = \frac{\sqrt{2}}{2} A \left[ \sin\left(\frac{\pi}{4} - \varepsilon\right) \cdot \sin(\beta - \varphi_0) - \cos\left(\frac{\pi}{4} - \varepsilon\right) \cdot \sin(\beta + \varphi_0) \right]. \quad (13)$$

Тогда общее выражение для  $x(t)$  с параметрами, характеризующими поляризационную структуру сигнала, будет иметь вид

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{\sqrt{2}}{2} A \left[ \cos\left(\frac{\pi}{4} - \varepsilon\right) \cdot \cos(\beta + \varphi_0) + \sin\left(\frac{\pi}{4} - \varepsilon\right) \cdot \cos(\beta - \varphi_0) \right] \cdot \cos(2\pi f_0 t) + \\ &+ \frac{\sqrt{2}}{2} A \left[ \sin\left(\frac{\pi}{4} - \varepsilon\right) \cdot \sin(\beta - \varphi_0) - \cos\left(\frac{\pi}{4} - \varepsilon\right) \cdot \sin(\beta + \varphi_0) \right] \cdot \sin(2\pi f_0 t). \end{aligned} \quad (14)$$

На рис. 2, *а* приведен двухсторонний спектр эллиптически-поляризованного сигнала по модулю  $|X^+(f)|$  и  $|X^-(f)|$  на несущей частоте  $f_0$ . На рис. 2, *б* представлен модуль спектра  $|\Gamma(f)|$  сигнала  $\gamma(t)$ , равный сумме спектров двух сигналов противоположной поляризации, перенесенный в область видеочастот ( $f_e$  – верхняя частота спектра,  $2f_e$  – информационная полоса поляризованного сигнала). Теперь дискретизацию сигнала во временной области можно осуществлять в соответствии с теоремой Котельникова о дискретизации (с частотой дискретизации  $f_d \geq 2f_e$ ), с одной оговоркой, что перед дискретизацией нужно обеспечить финитность спектра  $\Gamma(f)$  [10, 13]. Как известно [5], при дискретизации сигнала во временной области происходит «размножение» спектра в частотной области (с частотой повторения кратной частоте дискретизации  $f_d$ ). На рис. 2, *в* представлен модуль «размноженного» спектра  $|\Gamma_d(f)|$  дискретизированного во времени сигнала. Аналитическая запись данного спектра представлена формулой (15) [5].

$$\Gamma_d(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \Gamma(f - nf_d) \tag{15}$$



**Рис. 2.** *а* – двухсторонний спектр поляризованного сигнала, *б* – спектр  $|\Gamma(f)|$ , перенесенный в область видеочастот, *в* – «размноженный» спектр  $|\Gamma_d(f)|$  из-за дискретизации во временной области

**Fig. 2.** *a* – two-side spectrum of the polarized signal, *б* – spectrum  $|\Gamma(f)|$ , transferred to the video frequencies range, *в* – «multiplied» spectrum  $|\Gamma_d(f)|$  due to the discretization in the time region

На рис. 3 представлена схема демодуляции синфазной и квадратурной составляющих поляризованного сигнала с последующей дискретизацией в АЦП этих сигналов во временной области.

Фильтр 1 на рис. 3 – это фильтр, необходимый для получения конечного спектра  $\Gamma(f)$  перед дискретизацией во временной области (это необходимое условие для применения теоремы Котельникова о дискретизации). Другая функция этого фильтра – уменьшение наложения боковых лепестков спектра  $|\Gamma_D(f)|$  при его «размножении» с частотой повторения кратной  $f_D$ . В монографии [8] дается детальное изложение методов расчета таких цепей с особенностями синтеза фильтров в СВЧ-диапазоне. Роль фильтров 2 и 3 на рис. 3 – подавление гармоник двойной несущей частоты  $2f_0$ , которые появляются при умножении поляризованного сигнала  $x(t)$  на  $\cos(2\pi f_0 t)$  и  $\sin(2\pi f_0 t)$  (от когерентного гетеродина). Дискретизация сигналов в синфазном и квадратурном каналах происходит в АЦП1 и АЦП2, синхронно работающих. Параметр  $\Delta t$  на рис. 3 есть шаг дискретизации, равный  $\Delta t = \frac{1}{f_D}$ . При этом  $\Delta t \leq \frac{1}{2f_0}$  в каждом канале обработки.

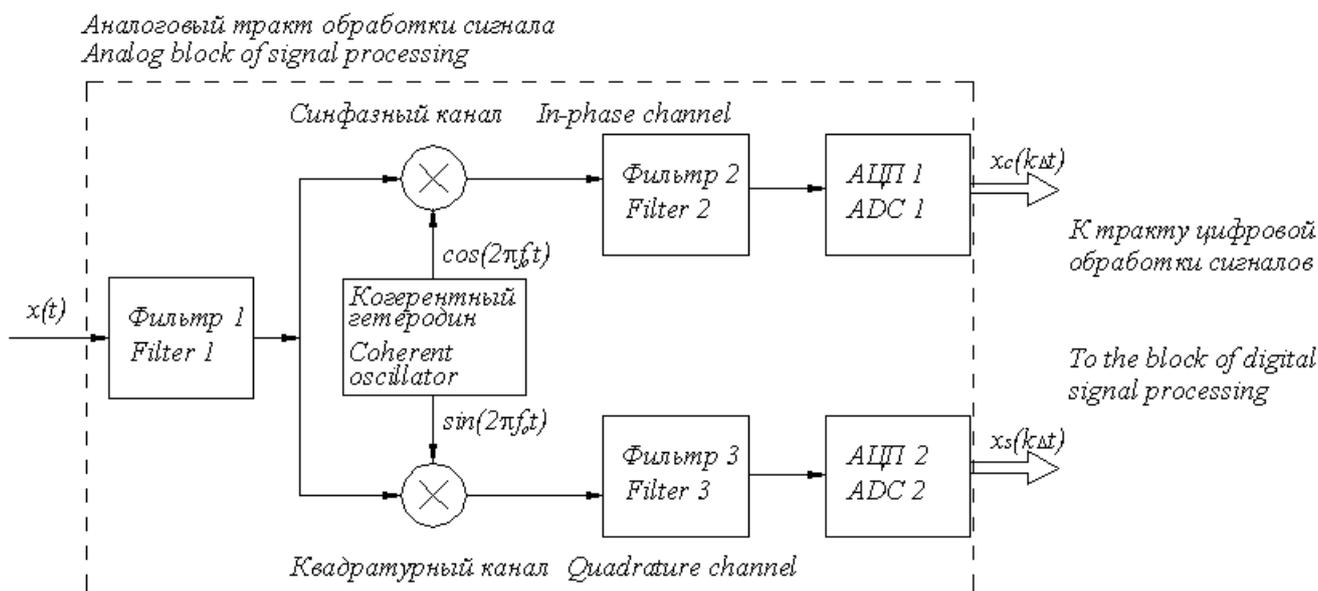


Рис. 3. Схема демодуляции синфазной и квадратурной составляющих поляризованного сигнала  
Fig. 3. Demodulation scheme for in-phase and quadrature components of the polarized signal

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработке мониторинговых систем дистанционного зондирования, распознавания радиолокационных объектов для отображения информации на мониторе радиолокатора в режиме реального масштаба времени необходимо применять цифровые методы обработки поляризованных сигналов. Блокам цифровой обработки в радиолокаторе предшествует аналоговый тракт, в котором производятся очень важные преобразования входного радиолокационного

сигнала. При допущении ошибок в проектировании аналогового тракта, разработчик не сможет достоверно восстановить первоначальный сигнал после его цифровой обработки. Может быть потеряна очень важная информация!

В статье рассмотрены особенности дискретизации по времени при квадратурной обработке сигнала. У входного радиолокационного поляризованного сигнала выделяется синфазная и квадратурная составляющие. В частотной области первоначальный двухсторонний спектр входного сигнала на несущей частоте преобразуется в односторонний спектр с переносом его в область видеочастот. В этом случае частота дискретизации может быть снижена в 1000 раз! А это значит, что квадратурная обработка сигнала приводит к существенному снижению требований к микросхемам АЦП. Таким образом, при разработке мониторинговых систем с квадратурной обработкой сигнала можно применять микросхемы АЦП исключительно российского производства, что крайне актуально в условиях политических санкций, действующих в отношении нашей страны.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Канарейкин Д.Б., Павлов Н.Ф., Потехин В.А.** Поляризация радиолокационных сигналов. М.: Сов. радио, 1966. 440 с.
2. **Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А.** Поляризация радиоволн. Поляризационная структура радиолокационных сигналов. М.: Радиотехника, 2005. 704 с.
3. **Козлов А.И., Логвин А.И., Сарычев В.А.** Поляризация радиоволн. Кн. 3. Радиополяриметрия сложных по структуре сигналов. М.: Радиотехника, 2008. 688 с.
4. **Коростелев А.А.** Пространственно-временная теория радиосистем. М.: Радио и связь, 1987. 320 с.
5. **Оппенгейм А., Шафер Р.** Цифровая обработка сигналов. 3-е изд., испр. М.: Техносфера, 2012. 1048 с.
6. **Гадзиковский В.И.** Цифровая обработка сигналов. М.: СОЛОН-Пресс, 2013. 769 с.
7. **Баскаков С.И.** Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Высшая школа, 2000. 462 с.
8. **Матханов П.Н.** Основы синтеза линейных электрических цепей. М.: Высшая школа, 1976. 208 с.
9. **Вагапов Р.Х.** Дистанционные методы исследования морских льдов / В.П. Гаврило, А.И. Козлов, Г.А. Лебедев, А.И. Логвин. СПб.: Гидрометеиздат, 1993. 341 с.
10. **Сергиенко А.Б.** Цифровая обработка сигналов. 3-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 768 с.
11. **Bartle, R.G.** The Elements of Real Analysis. 3<sup>rd</sup> ed. New York: John Wiley and Sons, 2000.
12. **Bertsekas D., Tsitsilis J.** Introduction to Probability. 2<sup>nd</sup> ed. Athena Scientific, Belmont, MA, 2008.
13. **Bellanger M.** Digital Processing of Signals. 3<sup>rd</sup> ed. New York: Wiley, 2000.
14. **Gray R.M., Davidson L.D.** Introduction to Statistical Signal Processing. Cambridge University Press, 2004.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

**Корнеев Павел Евгеньевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры Технологий автоматизированного производства, ЕТИ ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», paul-korn@yandex.ru.

## THE DISCRETIZATION OF THE POLARIZED SIGNAL

Pavel E. Korneev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Branch MSTU "STANKIN", Egorievsk, Russia

### ABSTRACT

Often, the monitoring systems solution of remote sensing problems, recognition (classification, discrimination) of radar objects using radio polarimetry methods is required in real time mode with the display of the current information on the radar monitor. Monitoring systems can be either stationary (more often terrestrial) or mobile (based on various transport vehicles). When designing such systems, along with ensuring the required speed and performance of the computer, it is also important to ensure the unification of the units and assemblies, the reduction of weight and size characteristics, simplification of the tuning, increase of the operational reliability. In this case, the use of blocks of digital information processing is required. When digitally processing polarized signals, it is necessary to convert the input analog signal to digital form, i.e. to sampled by time and frequency and perform level quantization. The peculiarities of the discretization of the radar polarized signal over time are considered in the article. Analytical expressions for the input polarized signal are derived with considering the geometric parameters of the polarization ellipse. Formulas are given for the in-phase and quadrature components of the polarized signal, for a complex signal envelope. It is alleged that quadrature processing of the polarized signal leads to a decrease in the requirements for analog-to-digital conversion chips due to a significant reduction in the sampling frequency. After the transformations presented in the article, electronic components, which are already in production by Russian companies in the radio electronic industry, can be used in monitoring systems. The transformations of a polarized signal in the time domain described in the article lead to certain transformations in the frequency domain. We are talking about converting the two-side signal spectrum into a one-side spectrum with its transfer to the video frequency region. Such a conversion helps to reduce the sampling rate from gigahertz to megahertz. Analytic expressions in the time domain are accompanied in the article by a graphic interpretation of the signal spectra in the frequency domain. A scheme for demodulating the in-phase and quadrature components of the polarized signal is given. Functional features of filtering units in the scheme are described, the attention of the designers of the digital signal processing systems to the requirements of the Kotel'nikov's sampling theorem is emphasized.

**Key words:** polarized signal, discretization, digital signal processing, sampling frequency, radio polarimetry.

### REFERENCES

1. Kanarejkin, D.B., Pavlov, N.F. and Potehin, V.A. (1966). *Poljarizacija radiolokacionnyh signalov* [Polarization of the radar signals]. Moscow: Sov. Radio, 440 p. (in Russian)
2. Kozlov, A.I., Logvin, A.I. and Sarychev, V.A. (2005). *Poljarizacija radiovoln. Poljarizacionnaja struktura radiolokacionnyh signalov* [Polarization of the radio waves. Polarization structure of the radar signals]. Moscow: Radiotekhnika, 704 p. (in Russian)
3. Kozlov, A.I., Logvin, A.I. and Sarychev, V.A. (2008). *Poljarizacija radiovoln. Kn. 3. Radiopoljarimetrija slozhnyh po strukture signalov* [Polarization of the radio waves. Radiopolyarimetry of the structurally complex signals]. Moscow: Radiotekhnika, 688 p. (in Russian)
4. Korostelev, A.A. (1987). *Prostranstvenno-vremennaja teorija radiosistem* [The space-time theory of the radio systems]. Moscow: Radio i svjaz', 320 p. (in Russian)
5. Oppengejm, A. and Shafer, R. (2012). *Cifrovaja obrabotka signalov. 3-e izd., ispr.* [Digital signal processing]. Moscow: Tehnosfera, 1048 p. (in Russian)
6. Gadzikovskij, V.I. (2013). *Cifrovaja obrabotka signalov* [Digital signal processing]. Moscow: SOLON-Press, 769 p. (in Russian)
7. Baskakov, S.I. (2000). *Radiotekhnicheskie cepi i signaly* [Radio circuits and signals]. Moscow: Vysshaja shkola, 462 p. (in Russian)
8. Mathanov, P.N. (1976). *Osnovy sinteza linejnyh jelektricheskikh cepej* [Basics of synthesis of the linear electric circuits]. Moscow: Vysshaja shkola, 208 p. (in Russian)

9. Vagapov, R.H., Gavrilov, V.P., Kozlov, A.I., Lebedev, G.A. and Logvin, A.I. (1993). *Distancionnye metody issledovanija morskikh l'dov* [Remote methods for studying sea ice]. St.Petersburg: Gidrometeoizdat, 341 p. (in Russian)
10. Sergienko, A.B. (2011). *Cifrovaja obrabotka signalov* [Digital signal processing]. 3-e izd. St.Petersburg: BHV-Peterburg, 768 p. (in Russian)
11. Bartle, R.G. (2000). *The Elements of Real Analysis*, 3<sup>rd</sup> ed., New York: John Wiley and Sons.
12. Bertsekas, D. and Tsitsilis, J. (2008). *Introduction to Probability*. 2<sup>nd</sup> ed., Athena Scientific, Belmont, MA.
13. Bellanger, M. (2000). *Digital Processing of Signals*. 3<sup>rd</sup> ed. New York: Wiley.
14. Gray, R.M. and Davidson, L.D. (2004). *Introduction to Statistical Signal Processing*. Cambridge University Press.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**Pavel E. Korneev**, Candidate of Technical Science, Associate Professor at the Department of the industrial automation technologies, Branch MSTU “STANKIN” in Egorievsk, paul-korn@yandex.ru.

Поступила в редакцию 09.01.2018  
Принята в печать 15.05.2018

Received 09.01.2018  
Accepted for publication 15.05.2018

ББК 05  
Н 34  
Св. план 2018

Научный Вестник МГТУ ГА  
Том 21, № 03, 2018  
Civil Aviation High TECHNOLOGIES  
Vol. 21, No. 03, 2018

Свидетельство о регистрации в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор) ПИ № ФС77-47989 от 27 декабря 2011 г.

---

Подписано в печать 18.06.18 г.

Печать цифровая

Формат 60×90/8

22,25 усл. печ. л.

Заказ № 340 / 79

Тираж 100 экз.

---

Московский государственный технический университет ГА  
125993, Москва, Кронштадтский бульвар, д. 20  
Изготовлено в ИД Академии имени Н.Е. Жуковского  
125167, Москва, 8-го Марта 4-я ул., дом 6А  
Тел.: (495) 973-45-68  
E-mail: mail@phzhukovskogo.ru

Подписной индекс в каталоге Роспечати 84254  
© Московский государственный  
технический университет ГА, 2018